

**Н.Н. Кривин**

**МЕТОДОЛОГИЯ  
СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ЭЛЕКТРОННЫХ  
И РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ  
СРЕДСТВ**

**Часть 1**

**Н.Н. КРИВИН \*\*\* МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЭС —**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

**Н.Н. Кривин**

**МЕТОДОЛОГИЯ СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ  
И РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

**Учебное пособие**

**В двух частях**

**Часть 1**

Томск  
Издательство ТУСУРа  
2022

УДК 658.512.22.011.56(075.8)  
ББК 30.2-5-05я73+32-02-05я73  
К820

Рецензенты:

**Русановский С.А.**, канд. техн. наук;  
**Губарев Ф.А.**, канд. техн. наук

Печатается по решению научно-методического совета ТУСУРа  
(протокол № 5 от 24.03.2021 г.)

**Кривин, Николай Николаевич**

К820

Методология системотехнического проектирования электронных и радио-электронных средств. В 2 ч. Ч. 1 : учеб. пособие для бакалавриата, специалитета и магистратуры / Н.Н. Кривин. – Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2022. – 383 с.

ISBN 978-86889-940-9 (Ч. 1)

ISBN 978-5-86889-939-3

Изложена методология системотехнического проектирования технических средств, работа которых основана на принципах электроники и радиотехники.

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

Для студентов бакалавриата, специалитета и магистратуры образовательных организаций высшего образования конструкторского, радиотехнического, электронного и приборостроительного профилей, а также аспирантов, преподавателей, проектировщиков и разработчиков электроники, практических и научных работников.

УДК 658.512.22.011.56(075.8)  
ББК 30.2-5-05я73+32-02-05я73

ISBN 978-5-86889-940-9 (Ч. 1)  
ISBN 978-5-86889-939-3

© Кривин Н.Н., 2022  
© Томск. гос. ун-т систем упр.  
и радиоэлектроники, 2022

## Оглавление

Предисловие.....	5
<b>1 ОБОСНОВАНИЕ ПОТРЕБНОСТИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ И РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ</b>	
1.1 Общая характеристика электронных и радиоэлектронных средств.....	10
1.1.1 Основные понятия и определения .....	10
1.1.2 Иерархия электронных и радиоэлектронных средств и их положение в общей классификации систем .....	13
1.1.3 Иерархия описаний электронных и радиоэлектронных средств.....	22
1.1.4 Жизненный цикл технической системы .....	30
1.1.5 Задачи проектирования электронных и радиоэлектронных средств.....	46
1.1.6 Законы развития технических систем.....	51
1.1.7 Программные системы электронных и радиоэлектронных средств .....	72
1.2 Определение и классификация потребностей в проектной деятельности .....	86
1.3 Выявление и исследование потребностей в проектной деятельности .....	99
1.3.1 Анализ дихотомии существования технической системы и потребности в её проектировании .....	99
1.3.2 Исследование окружения технической системы .....	106
1.3.3 Перечни контрольных вопросов Мэтчетта .....	108
1.3.4 Перечни контрольных вопросов Холла .....	109
1.3.5 Маркетинговое исследование .....	114
1.3.6 Патентное исследование .....	123
1.3.7 Прогнозирование будущих потребностей .....	126
1.4 Формализованное описание назначения технической системы .....	138
1.5 Формализация научно-исследовательских и проектных задач системотехники.....	142
1.6 Обобщённый алгоритм обоснования потребности в проектировании.....	147
Выводы .....	152
Контрольные вопросы .....	154
Упражнения .....	156
Рекомендуемая литература.....	159
Список литературы.....	160
<b>2 ФОРМУЛИРОВКА ТРЕБОВАНИЙ К ОБЪЕКТУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ</b>	
2.1 Постановка задачи.....	165
2.2 Элементы инженерии требований .....	171
2.2.1 Понятие «инженерия требований» .....	171
2.2.2 Роль инженерии требований в проектной деятельности.....	172
2.2.3 Понятие «требование» .....	175
2.2.4 Понятие «заинтересованная сторона» .....	177
2.2.5 Требования к требованиям.....	177
2.2.6 Требования и жизненный цикл технической системы .....	179
2.2.7 Требования в области проблем и в области решений .....	180
2.2.8 Исходные требования и производные требования .....	184
2.3 Источники требований к объекту проектирования и формулировка требований .....	185
2.3.1 Формулировка требований с позиции эволюции потребностей и законов развития технических систем .....	185

2.3.2	Формулировка требований с позиций участников стадий жизненного цикла технических систем.....	186
2.3.3	Формулировка требований с позиции уровней иерархии описания технической системы.....	192
2.4	Классификация требований и их характеристика.....	194
2.4.1	Свойства технических систем.....	194
2.4.2	Категории свойств технических систем .....	196
2.4.3	Ключевые требования .....	200
2.4.4	Критерии развития, показатели качества и недостатки технических объектов .....	201
2.4.5	Классификация общих технических требований к электронным и радиоэлектронным средствам .....	210
2.5	Обеспечение выполнения требований .....	216
2.5.1	Установление свойств и отношений между ними .....	216
2.5.2	Прослеживание требований .....	219
2.5.3	Анализ функционирования и проектирование .....	233
2.6	Оформление и представление требований к объекту проектирования .....	236
	Выводы .....	239
	Контрольные вопросы .....	241
	Упражнения .....	241
	Рекомендуемая литература.....	244
	Список литературы.....	245
<b>3 ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТА ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОДЕЛЬЮ «ЧЕРНОГО ЯЩИКА»</b>		
3.1	Постановка задачи.....	246
3.2	«Черный ящик» как элементарная модель технической системы.....	247
3.2.1	Определение «черного ящика» .....	247
3.2.2	Целевая и техническая функции «черного ящика» .....	254
3.2.3	Классификация входов и выходов «черного ящика» .....	258
3.2.4	Интерфейсы «черного ящика» .....	275
3.2.5	Типология задач «черного ящика» .....	290
3.2.6	Типы и характеристики избранных технических систем .....	298
3.3	Математические методы описания и представления процессов в системах.....	322
3.3.1	Классификация процессов .....	322
3.3.2	Способы описания процессов .....	329
3.4	Математические методы описания и представления систем.....	339
	Выводы .....	348
	Контрольные вопросы .....	350
	Упражнения .....	351
	Список рекомендуемой литературы.....	352
	Список литературы.....	352
	Список сокращений .....	355
	Приложение 1. Уровни готовности технологии (TRL) .....	359
	Приложение 2. Стадии разработки программ и программной документации.....	362
	Приложение 3. Требования к содержанию и оформлению программных документов .....	363
	Приложение 4. Перечень электронных и радиоэлектронных средств.....	368
	Приложение 5. Пример оформления технического задания .....	374
	Приложение 6. Характеристика и отличительные признаки операций Коллера.....	379

## Предисловие

Рост масштабов и усложнение способов организации деятельности по созданию инженерных объектов, повышение степени ответственности за ее результаты, быстрое возрастание сложности возникающих при этом научных, технических и управленческих проблем привели к появлению в середине XX века новой прикладной системной методологии – системной инженерии (Systems Engineering). Важность обучения системной инженерии была осознана в нашей стране в 70-х годах XX века. Именно на это время приходится период быстрого становления системной инженерии в СССР, где она получила название «системотехника».

В современных разработках зарубежных специалистов системная инженерия рассматривается как комплексный, мультидисциплинарный подход и методика создания сложных систем и признается в качестве фундамента, на основе которого можно обеспечить и гарантированно поддерживать надежную и устойчивую связь между миссией, стратегическими целями, конкретными задачами и измеримыми результатами инженерной деятельности. Недаром один из видных зарубежных специалистов по системной инженерии Дерек Хитчинс (Derek K. Hitchins) назвал системную инженерию системной методологией XXI века<sup>1</sup>.

Впечатляющие преобразования, происходящие сегодня в области создания сложных инженерных объектов и обусловленные революцией в сфере информатизации, глобализацией систем и быстрым внедрением инноваций; появление новых классов инженерно-насыщенных систем, включая социотехнические системы, распределённые энергетические, транспортные, оборонные и коммуникационные системы масштаба страны, а также развитие мегасистем привели в нашей стране к пониманию необходимости проведения работ и подготовки кадров в области системной инженерии.

Учебно-методические материалы по системотехнике на русском языке практически отсутствуют. Последний отечественный учебник по этой проблематике был издан в СССР в 1985 году, а переведенный с английского языка и изданный в 2014 году один из наиболее востребованных в мире учебников по системной инженерии – книга профессора А. Косякова и соавторов «Системная инженерия. Принципы и практика» – наряду с важнейшими достоинствами, такими как нацеленность на овладение студентами подходом системного инженера, обладает и безусловными недостатками, среди которых можно выделить ориентированность на сложившуюся в США практику организации и управления работами по созданию крупных систем, которая отличается от подобной практики в нашей стране.

---

<sup>1</sup> Hitchins D.K. Systems Engineering. A 21<sup>st</sup> Century Systems Methodology. Wiley, 2007.

Также необходимо указать на отсутствие в настоящее время отечественных учебных пособий, рассматривающих на доступном для студентов уровне методологические вопросы системотехнического проектирования электронных и радиоэлектронных средств. Это и стало причиной создания данного учебного пособия.

Целью автора являлось создание учебного пособия, которое, помимо формирования достаточно полного представления об обширной предметной области дисциплины, позволило бы на основе алгоритмического подхода к последовательности изложения материала сформировать у студентов системотехническое мышление в области проектирования технических систем, работа которых основана на принципах электроники и радиотехники. В качестве отправного пункта для синтеза содержания дисциплины были взяты требования ФГОС ВО 3+ и 3++ к формированию нижеприведенных компетенций.

*По направлению бакалавриата 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств»:*

– готовность осуществлять сбор и анализ исходных данных для расчёта и проектирования деталей, узлов и модулей электронных средств (ПК-5);

– готовность выполнять расчёт и проектирование деталей, узлов и модулей электронных средств в соответствии с техническим заданием с использованием средств автоматизации проектирования (ПК-6);

– способность выполнять расчет и проектирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения в соответствии с техническим заданием с использованием средств автоматизации проектирования (ПКР-3).

*По направлениям магистратуры 11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств» и 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника»:*

– способность определять цели, осуществлять постановку задач проектирования электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения, подготавливать технические задания на выполнение проектных работ (ПКР-15);

– способность проектировать устройства, приборы и системы электронной техники с учетом заданных требований (ПКР-16).

*По специальности 25.05.03 «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования»:*

– готовность к проектированию и разработке сервисного, вспомогательного оборудования, схемных решений и средств автоматизации процессов эксплуатации (ПК-23).

Поясим также смысл использования термина «методология» в названии учебного пособия.

Методология – это учение об организации деятельности. Предмет методологии – организация деятельности. При этом термин «организация» понимается в значениях свойства (внутренняя упорядоченность, согласованность взаимодействия более или менее дифференцированных и автономных частей

целого, обусловленная его строением) и процесса (совокупность процессов или действий, ведущих к образованию и совершенствованию взаимосвязей между частями целого).

В свою очередь известно, что человеческая деятельность разделяется на репродуктивную и продуктивную.

Репродуктивная деятельность копирует чужую или собственную деятельность, освоенную в предшествующем опыте. Другими словами, специалисты высшей категории и профессионалы своего дела в методологии не нуждаются, так как у них уже сформировано соответствующее мышление и оптимально организована деятельность.

Другое дело – продуктивная деятельность, направленная на получение объективно нового или субъективно нового результата. Любая научно-исследовательская деятельность, если она осуществляется более или менее грамотно, по определению всегда направлена на объективно новый результат. Инновационная деятельность специалиста-практика может быть направлена как на объективно новый, так и на субъективно новый (для данного специалиста или для данного предприятия, учреждения) результат. *Учебная деятельность* всегда направлена на субъективно новый (для каждого конкретного обучающегося) результат. Поэтому в случае продуктивной деятельности и возникает необходимость ее организации, то есть необходимость применения методологии.

На взгляд автора учебного пособия, самое общее, полное и непротиворечивое изложение методологии приведено в работе А.М. Новикова и Д.А. Новикова<sup>2</sup>. Оно легло в основу организации структуры второго и третьего разделов первой части данного учебного пособия.

В нем рассматриваются вопросы системотехнического проектирования электронных и радиоэлектронных средств (ЭРЭС), в частности обоснование потребности в проектировании технической системы, элементы инженерии требований, представление проектируемой системы моделью «черного ящика», декомпозиция целевой функции «черного ящика», компьютерное моделирование системы и перспективы развития системотехники.

Для введения в предметную область разработан специальный пропедевтический курс «Введение в методологию системо- и схемотехнического проектирования электронных и радиоэлектронных средств»<sup>3</sup>, где содержатся сведения об основных понятиях предметной области, рассматриваются основания методологии системо- и схемотехнического проектирования ЭРЭС, раскрывается содержание схемы методологии проектной деятельности по созданию

---

<sup>2</sup> Новиков А.М., Новиков Д.А. Методология. М.: Синтег, 2007. 668 с.

<sup>3</sup> Кривин Н.Н. Введение в методологию системо- и схемотехнического проектирования электронных и радиоэлектронных средств : учеб. пособие для бакалавриата, специалитета и магистратуры. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2020. 250 с.



технических систем, даётся общая характеристика ЭРЭС: их положение в общей классификации систем, иерархия, жизненный цикл, уровни готовности создаваемой техники, законы эволюции ЭРЭС, классификация программных систем, а также приводится описание обобщённого алгоритма системного и схмотехнического проектирования электронных и радиоэлектронных средств.

Системотехника – это междисциплинарный подход к созданию больших и сложных систем, которые соответствуют определённому набору экономических и технических требований. В аэрокосмической и оборонной промышленности системная инженерия используется уже давно<sup>4</sup> и многие из полученных опытным путём знаний применяются в других сферах деятельности человека. Автомобили, телефоны, телевизоры становятся все «умнее» и для их разработки и производства требуются технологии эпохи покорения космоса. Очевидно, что большую и сложную техническую систему не под силу создать одному инженеру-системотехнику. Эта задача может быть решена только коллективными усилиями множества специалистов из самых разных областей науки и техники. Автор надеется, что предлагаемое учебное пособие поможет будущим системотехникам осознать всю важность коллективного мышления, коммуникации и деятельности в своей профессиональной области, а также сформировать соответствующие этой деятельности компетенции.

В результате систематического изучения материала пособия студенты будут:

**знать** основания и схему методологии системного и схмотехнического проектирования электронных и радиоэлектронных средств; связи дисциплины с предметными областями смежных наук; принципы системного подхода в проектной деятельности; обобщённый алгоритм системотехнического проектирования электронных и радиоэлектронных средств; общие характеристики электронных и радиоэлектронных средств; основные законы и закономерности развития технических и программных средств; классификацию программных систем;

**уметь** прогнозировать и обосновывать потребность в проектировании технических средств; формулировать технические требования к объекту проектирования и оформлять их в виде технического задания; представлять объект проектирования как «чёрный ящик» и осуществлять декомпозицию его целевой функции; моделировать электронные и радиоэлектронные средства на системном и компонентном уровнях;

---

<sup>4</sup> Дружинин В.В., Конторов Д.С. Вопросы военной системотехники. М.: Ордена Трудового Красного Знамени Военное издательство Министерства обороны СССР, 1976. 224 с.; Гуд Г.Х., Макол Р.Э. Системотехника. Введение в проектирование больших систем / пер. с англ. К.Н. Трофимова, С.Е. Жорно, И.В. Соловьёва; под ред. Г.Н. Поварова. М.: Советское радио, 1962. 390 с.

*владеть* методологией системотехнического проектирования электронных и радиоэлектронных средств; навыками системного мышления.

Автор выражает признательность за поддержку сотрудникам Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники: декану радиоконструкторского факультета доценту кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры (КИПР) Озёркину Денису Витальевичу, доценту кафедры КИПР Чернышеву Александру Анатольевичу, а также организаторам конкурса «Новые кадры для оборонно-промышленного комплекса».

Данное учебное пособие представляет результат работы, выполнявшейся в период с 2014 по 2020 гг. при финансовой поддержке МОН РФ в рамках конкурса «Новые кадры для оборонно-промышленного комплекса».

# 1 ОБОСНОВАНИЕ ПОТРЕБНОСТИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ И РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Ученые настолько ушли с головой каждый в свое,  
что не видят ни одного явления в целом,  
включая собственные исследования.

*Принцип полноты картины*

Гений – это один процент вдохновения  
и девяносто девять процентов пота.

*Т.А. Эдисон*

Правильно сформулированная задача  
есть половина успеха.

## 1.1 Общая характеристика электронных и радиоэлектронных средств

### 1.1.1 Основные понятия и определения

Электронные и радиоэлектронные средства относятся к классу технических средств, которые призваны облегчать людям жизнь, помогать решать задачи, неразрешимые естественными силами человека. Технические средства, т.е. все то, что создано руками человека, все, что составляет содержание техносферы и окружает нас в быту, на работе, в пути, являются продолжением человеческих органов в пространства физических величин, которые недоступны «невооружённому», естественному телу человека [1].

---

**Примеры:** компьютерная мышь – это продолжение руки человека; компьютер – «продолжение» мозга человека, «усилитель» его вычислительных способностей;

---

Человеком придумано такое количество разнообразных технических средств, устройств, приборов и систем, что ориентироваться в этом множестве можно только с помощью системы классификаций.

**Электронное средство (ЭС)** – это изделие и его составные части, в основу функционирования которых положены физические принципы электроники.

---

**Примеры ЭС:** электронные часы, монитор компьютера, компьютерный системный блок, электронные весы, трз-плеер, калькулятор, роботылесос и т.д.

---

**Электроника** – научно-техническая область, связанная с исследованиями законов взаимодействия электронов и других носителей зарядов с электромагнитными полями с целью создания электронных приборов, в которых это взаимодействие используется для передачи, обработки и хранения информации, автоматизации производственных процессов, создания энергетических устройств, контрольно-измерительной аппаратуры, средств научного эксперимента и т.п.

**Радиоэлектронное средство (РЭС)** – это изделие и его составные части, в основу функционирования которых положены физические принципы радиотехники и электроники [2].

---

*Примеры РЭС: рация, телевизор, радиоприемник, мобильный телефон, радиотелефон, радиолокационная система, RFID-метка и т.д.*

---

**Радиотехника** – наука об электромагнитных колебаниях и волнах длиной от десятков километров до десятых долей миллиметра, методах их генерации, усиления, преобразования, излучения, распространения, приема, помехоустойчивой обработки; отрасль техники, связанная с использованием электромагнитных колебаний и волн для передачи информации (системы связи, управления, радиовещания, телевидения), её извлечения (радиолокация, радионавигация, научные исследования, технологические процессы), а также для радиопротиводействия передаче и извлечению информации [3].

Развитие радиотехники базируется на достижениях радиофизики, физики диэлектриков и полупроводников, акустики, автоматики, электроники (вакуумной и полупроводниковой техники, микроэлектроники, функциональной электроники), вычислительной техники и других смежных областей, многие из которых в свою очередь возникли и развились на основе радиотехники.

Среди основных разделов радиотехники следует выделить генерирование электрических колебаний, приём и обработку дискретных и аналоговых сигналов; излучение и распространение радиоволн в свободном пространстве, различных средах и направляющих системах; теорию информации, статистический синтез информационных систем, оптимальные методы обработки, автоматическое регулирование радиосистем, запись и воспроизведение передаваемой информации.

Если в первые годы своего развития радиотехника служила только для беспроводной телеграфии, то современная радиотехника характеризуется проникновением практически во все сферы человеческой деятельности: бытовую технику, радиовещание, связь, транспорт, управление, промышленность, медицину, военное дело и др. Широко используются радиотехнические методы и устройства для проведения научных исследований в физике, астрономии, метеорологии, автоматике, кибернетике, биологии, медицине и т.д.

ЭС и РЭС входят в более общую категорию **технических средств** (ТС) или **технических объектов** (ТО). Далее по тексту при употреблении терминов ТС или ТО будем подразумевать ЭС и РЭС, если иное не будет специально отмечено.

**Уровень разукрупнения радиоэлектронного средства** – это уровень структуры внутренней организации радиоэлектронного средства и соотношения его элементов [2].

Рассмотрим понятие «система». Современное представление (конструктивные определения) о системе подразумевает наличие функции или цели системы с точки зрения наблюдателя или исследователя, который при этом явно или неявно вводится в определение.

Приведем конструктивные определения понятия «система».

**Система** – комбинация взаимодействующих элементов, организованных для достижения одной или нескольких поставленных целей [4].

**Система** – конечное множество функциональных элементов и отношений между ними, выделенное из среды в соответствии с определенной целью в рамках определенного временного интервала (В.Н. Сагатовский).

**Система** – отражение в сознании субъекта (исследователя, наблюдателя) свойств объектов и их отношений в решении задачи исследования, познания (Ю.И. Черняк).

**Система** – совокупность интегрированных и регулярно взаимодействующих или взаимозависимых элементов, созданная для достижения определенных целей, причем отношения между элементами определены и устойчивы, а общая производительность или функциональность системы лучше, чем у простой суммы элементов.

Также приведем достаточно вольное, но ёмкое и оригинальное «рекурсивное» определение системы, которое цитируется по [5].

**Система** – это элемент другой системы, обладающий протяженностью в пространстве и времени и предназначенный для выполнения определенного набора функций в другой системе в интересах ограниченного набора сторон, а также состоящий из элементов, функции которых отличны от функций определяемой системы, а функции определяемой системы не являются результатом сложения функций ее элементов.

Данное определение подчеркивает относительность понятия «система», зависимость этого определения от точки зрения или аспекта, в которых система рассматривается, так как всегда для любой системы существуют подсистемы и надсистемы, элементом которых она является. Другими словами, любую систему можно разложить на составляющие её компоненты и определить суперсистему, в которую данная система входит в качестве элемента. При этом функции системы, подсистем и надсистем образуют определенную иерархию и, как правило, не совпадают.

---

### **Примеры систем**

*Автоматическая телефонная станция может считаться системой, а вся телефонная сеть – системой систем.*

*Глобальная сеть Интернет является системой систем.*

*Примером более простой и знакомой, но инженерно насыщенной системы является пассажирский автомобиль в полной комплектации. Можно считать, что это младший представитель более сложных транспортных систем. Он состоит из большого числа разнородных компонентов и для его создания требуется использовать достижения различных областей техники и технологий. Для правильного функционирования автомобиля его компоненты должны безошибочно и эффективно работать сообща. Хотя принципы действия автомобиля давно и хорошо известны, современные автомобили необходимо проектировать так, чтобы они работали эффективно в условиях тщательного контроля выхлопных газов, а для этого требуются сложные современные электронные датчики и управляемые компьютером механизмы впрыскивания воздушно-топливной смеси. Для защиты пассажиров, круиз-контроля, автоматической навигации, автономного вождения и парковки применяются компьютерные технологии. Строгие требования, предъявляемые к стоимости, надежности, функциональности, комфортабельности, безопасности и множеству других параметров, ставят перед системным инженером целый ряд непростых проблем.*

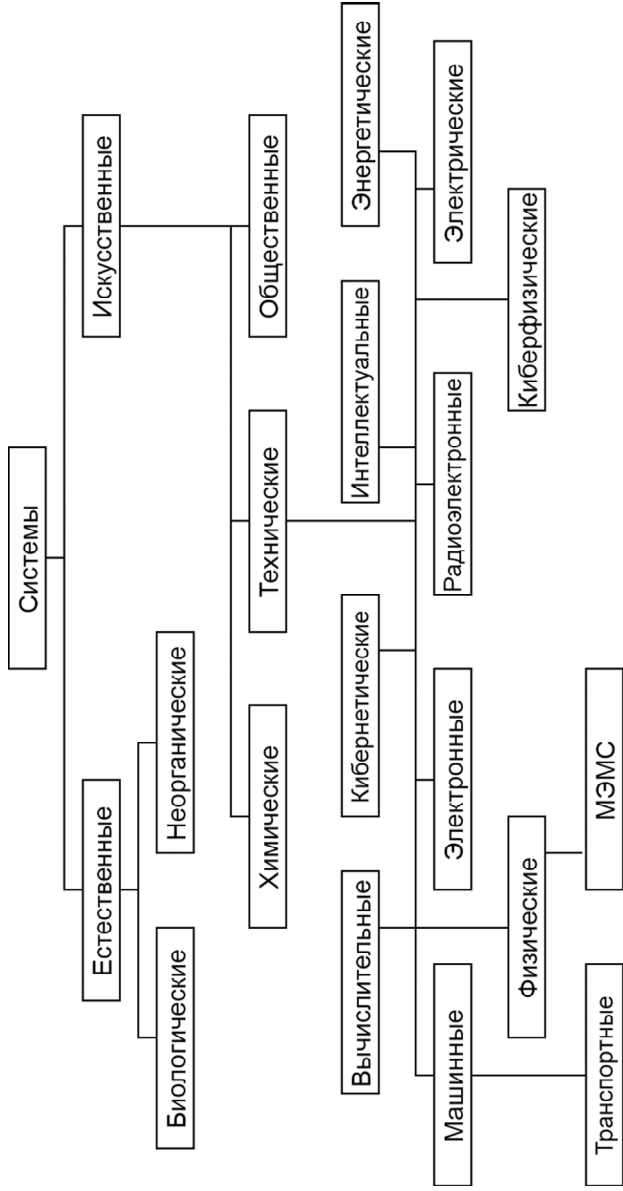
---

### **1.1.2 Иерархия электронных и радиоэлектронных средств и их положение в общей классификации систем**

Исходя из понятия системы, можно разделить системы на классы по принципу их происхождения (рисунок 1.1,а) [6].

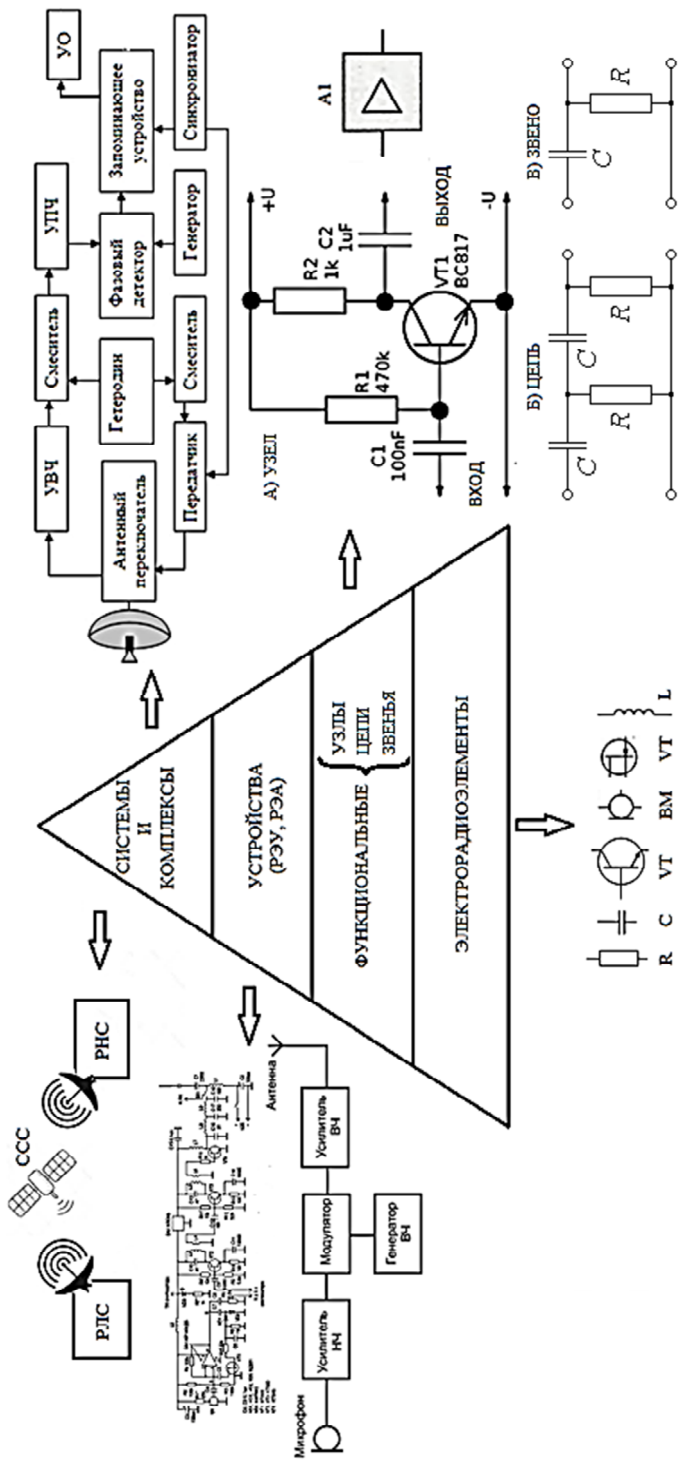
Из этой схемы понятие системы становится яснее, так как в ней отдельные элементы структуры определяются на основании общепринятой классификации областей знания.

Классы, представленные на рисунке 1.1,а, соответствуют известным отраслям техники – машиностроению, электротехнике, энергетике, строительству, транспорту, кибернетике и т.д. Однако такой подход не дает точного определения понятия «техническое средство», так как его можно трактовать и как объект машиностроения, и как объект электротехники, и т.д. Упорядочение систем в соответствии с принципами их действия – механическим, электрическим, гидравлическим и т.п. – также не позволяет унифицировать свойства и однозначно определить классы элементов систем, поскольку в настоящее время уже существуют гибридные системы. К примеру, на более высоком системном уровне существуют биотехнические (в частности, человеко-машинные) сложные системы.



*a*

Рисунок 1.1 – Разделение систем по их происхождению (а) и иерархия электронных и радиоэлектронных систем (б) (начало, окончание см. на с. 14)



б

Рисунок 1.1 – Разделение систем по их происхождению (а) и иерархия электронных и радиоэлектронных систем (б) (окончание, начало см. на с. 13)



В зависимости от вида и назначения ТС, его частей, целевых функций и состояния они подразделяются на классы и подклассы [7]. Рассмотрим известные классификационные признаки ТС.

ТС могут быть классифицированы:

- по функции;
- типу операнда (системы преобразования материи, энергии, информации);
- принципу осуществления рабочего действия (механическом, гидравлическом, пневматическом, электронном, химическом, оптическом, акустическом и других принципах);
- характеру функционирования (мощностные, скоростные, импульсные);
- характеру назначения (производящие, управляющие, обслуживающие, обеспечивающие);
- степени сложности (элементы, компоненты, функциональные узлы, устройства, комплексы, системы);
- способу упорядочивания более низких уровней систем (по действиям, технологии изготовления);
- степени оригинальности (доработанные, модифицированные, оригинальные);
- характеру функций (специализированные, многофункциональные и универсальные).

Для специализированных ТС характерны единственность назначения элементов и узкая профессиональная специализация обслуживающего персонала.

Универсальные ТС реализуют множество функций на одной и той же структуре. При этом функции по виду и количеству не определены в полной мере.

Как было сказано выше, ЭС и РЭС принадлежат к классу технических систем, работа которых основана на принципах электроники и радиотехники. При этом границы классов могут пересекаться, так как в настоящее время ЭС и РЭС нашли широкое распространение во многих отраслях и сферах деятельности человека.

На рисунке 1.1,б приведена иерархия электронных и радиоэлектронных систем, а также примеры принципиальных и структурных электрических схем средств различного уровня. Согласно системному подходу элемент каждого уровня иерархии с позиции той или иной науки можно рассматривать как систему.

---

*Например, такие средства, как радиолокатор, спутниковая система связи и навигации, радиопередающее и радиоприемное устройства, являются системами разной степени сложности с точки зрения системотехники ЭРЭС. Функциональные узлы (усилители, генераторы, фильтры, модуляторы, детекторы, смесители, умножители, аттенюаторы и т.д.) являются системами с позиций схемотехники ЭРЭС. В свою очередь*

*электрорадиоэлементы (транзисторы, резисторы, конденсаторы, диоды, катушки индуктивности и т.д.) как объекты, на материальном уровне реализующие физические и физико-технические принципы, эффекты и законы природы, являются системами с точки зрения таких наук, как физика, химия и материаловедение.*

---

Электронные и радиоэлектронные средства составляют иерархию электронных и радиоэлектронных систем, на базовом уровне которых располагаются электрорадиоэлементы. Из электрорадиоэлементов на принципиальном уровне слагаются функциональные узлы, назначение которых заключается в преобразовании величин параметров технического процесса. В свою очередь разные функциональные узлы, связанные друг с другом по определенным правилам, образуют электронные и радиоэлектронные устройства. Устройства, связанные друг с другом, образуют электронные/радиоэлектронные комплексы и системы. Эту иерархию можно продолжать и далее. Так, объединение функционально связанных систем уже будет называться мегасистемой или, как принято в системной инженерии, системой систем [8, 9].

**Системотехника** (от греч. *techné* – искусство) – это научно-техническая дисциплина, охватывающая вопросы проектирования, создания, испытания и эксплуатации сложных систем или (и) больших систем (систем большого масштаба, *large scale systems*). Сложность определяется количеством связей между входящими в состав системы элементами: чем больше связей, тем сложнее система.

При разработке сложных систем возникают проблемы, относящиеся не только к свойствам их составных частей (элементов, подсистем), но и к закономерностям функционирования объекта в целом (общесистемные проблемы); появляется широкий круг специфических задач, таких как определение общей структуры системы, организация взаимодействия между подсистемами и элементами, учет влияния внешней среды, выбор оптимальных режимов функционирования, оптимального управления системой и т. д. По мере усложнения систем все более значительное место отводится общесистемным вопросам, они и составляют основное содержание системотехники. Научной, главным образом, математической базой системотехники служит теория сложных систем.

Для сложных систем характерна своеобразная организация проектирования – в две стадии: макропроектирование (внешнее проектирование), в процессе которого решаются функционально-структурные вопросы системы в целом, и микропроектирование (внутреннее проектирование), связанное с разработкой элементов системы как физических единиц оборудования. Системотехника объединяет точки зрения, подходы и методы по вопросам внешнего проектирования сложных систем.

Макропроектирование начинается с формулировки проблемы, которая включает, по крайней мере, три основных раздела:

- 1) определение целей создания системы и круга решаемых ею задач;
- 2) оценка действующих на систему факторов и определение их характеристик;
- 3) выбор показателей эффективности системы.

Цели и задачи системы определяют, исходя из потребностей их практического использования, с учетом тенденций и особенностей технического прогресса, а также народно-хозяйственной целесообразности. Существенное значение при этом приобретает опыт применения имеющихся аналогичных систем, а также четкое понимание роли проектируемой системы в народном хозяйстве. Для оценки внешних и внутренних факторов, действующих на систему, помимо опыта эксплуатации аналогичных систем, используют статистические данные, полученные в результате специальных экспериментальных исследований. В качестве показателей эффективности выбирают числовые характеристики, оценивающие степень соответствия системы задачам, поставленным перед ней. Например, для системы слепой посадки самолетов показателем эффективности может служить вероятность успешной посадки, для междугородной телефонной связи – среднее время ожидания соединения с абонентом, для производственного процесса – среднее число изделий, выпускаемых за смену и т.д. Материалы по изучению целей и задач и результаты проведенных экспериментов используют для обоснования технического задания на разработку системы [10, 11].

В соответствии с техническим заданием намечают один или несколько вариантов системы, которые, по мнению проектировщиков, заслуживают дальнейшего рассмотрения и подробного исследования. Анализ вариантов системы (системный анализ) проводится по результатам математического моделирования, которое на практике представляет собой компьютерное имитационное моделирование системы. Имитационная модель представляет собой некий алгоритм, при помощи которого вычислительная система вырабатывает информацию, характеризующую поведение элементов моделируемой системы и их взаимодействие в процессе функционирования. Получаемая информация позволяет определить показатели эффективности системы, обосновать её оптимальную структуру и составить рекомендации по совершенствованию исследуемых вариантов. Существуют и аналитические методы оценки свойств сложных систем, основанные на результатах применения теории вероятностных (случайных) процессов.

Зарубежным аналогом системотехники является системная инженерия. Согласно [4] и международному стандарту ISO/IEC 15288 системная инженерия – это подход к организации междисциплинарной инженерной деятельности, в котором значительная часть времени посвящена согласованию постановки задачи между всеми участниками проекта из разных процессов и стадий

жизненного цикла на основе пакета моделей (системной архитектуры), чтобы максимально снизить риски.

**Системотехника электронных и радиоэлектронных средств** – это раздел системотехники, охватывающий вопросы проектирования, создания, испытания и эксплуатации сложных технических систем, работа которых основана на принципах электроники и радиотехники, а также их сочетании с другими физическими принципами (оптики, квантовой механики, электромагнетизма и т.д.). В таблице 1.1 приведены примеры инженерно насыщенных комплексных систем [8, 9].

Таблица 1.1 – Примеры инженерно насыщенных комплексных систем

Система	Входы	Процесс	Выходы
Метеорологический спутник	Изображения	Хранение данных Передача данных	Кодирование изображения
Система управления воздушным движением в зоне аэропорта	Сигналы бортовых маяков	Опознавание Слежение	Опознавательный код Воздушная трасса Связь
Система слежения за грузовиками	Запросы о направлении грузов	Прокладка маршрута на карте Связь	Информация о маршруте Доставленный груз
Система бронирования авиабилетов	Запрос о маршруте поездки	Управление данными	Бронирование Билеты
Медицинская информационная система	Код пациента Результаты анализов Диагноз	Управление информацией	Состояние пациента История болезни Лечение
Система автоматического пилотирования самолета	Положение и ориентация самолета в пространстве Данные о физических параметрах самолета (скорость, ускорение, масса, лобовое сопротивление воздуха)	Обработка данных в режиме реального времени	Заданная траектория полета

**Схема** (от греч. schema – наружный вид, форма, набросок, очерк):

- 1) изображение, описание, изложение чего-либо в общих, главных чертах;
- 2) чертеж, воспроизводящий с помощью условных обозначений и без соблюдения масштаба основную идею какого-либо устройства, сооружения и т.д.

**Схема в конструкторской документации** – документ, на котором условными графическими обозначениями показаны составные части изделия (или установки) и соединения или связи между ними. Схемы выполняются, как правило, без учета масштаба и действительного пространственного расположения составных частей изделия. В зависимости от типа элементов изделий и вида связей между ними схемы подразделяют на электрические, пневматические, гидравлические, кинематические и комбинированные; в соответствии с назначением различают схемы структурные, функциональные, принципиальные, соединений, подключений, общие, расположения.

**Схемотехника ЭРЭС** (от греч. *techné* – искусство) – научно-техническое направление, охватывающее проблемы проектирования и исследования схем электронных устройств радиотехники и связи, вычислительной техники, автоматики и других областей техники. Основная задача схемотехники – синтез (определение структуры) электронных схем, обеспечивающих выполнение определенных функций, и расчет параметров входящих в них элементов.

Термин «схемотехника» появился в 60-х гг. XX века в связи с разработкой унифицированных схем, пригодных одновременно для множества применений.

На основе электронной схемы создают соответствующее устройство (входящее в состав некоторой технической системы). К устройству предъявляется требование надежной работы в течение заданного времени в реальных условиях производственного разброса параметров элементов и их старения, влияния внешней среды и возмущающих воздействий. Поэтому при разработке схем наряду с расчетом номинальных значений параметров элементов необходимо рассчитывать эксплуатационные допуски на них, предусматривать в схеме средства, повышающие надежность устройства (обеспечивающие устойчивую работу схемы при внешних воздействиях), а также позволяющие контролировать его исправность.

Элементной базой для создания электронных устройств служат дискретные электро- и радиоэлементы (резисторы, конденсаторы, диоды, транзисторы и т.д.) и интегральные схемы (ИС). Если электронная схема используется в виде ИС либо нескольких ИС, то говорят о микросхемотехнике, под которой понимают область микроэлектроники, связанную с проектированием ИС. Помимо синтеза и расчета электронных схем, микросхемотехника решает задачу разработки на основе электронных схем структуры (топологии) ИС. Основные этапы разработки: расчет геометрических размеров элементов ИС; рациональное размещение элементов на поверхности или в объеме подложки ИС; нахождение оптимальных соединений элементов (возможные критерии оптимальности – обеспечение минимальных длин проводников, либо числа их пересечений, либо взаимного влияния и т.д.). Так как создание новой ИС комплексная проблема, то её решают совместно специалисты по микросхемотехнике, физики, технологи, конструкторы, используя комплексные опытно-

теоретические методы, в том числе компьютерное моделирование как самой схемы, так и условий её работы.

Теоретической базой схемотехники (и микросхемотехники) служат теория линейных и нелинейных электрических цепей, электродинамика, математическое программирование, теория автоматов и др. При создании электронных схем первостепенную роль в настоящее время играет использование методов компьютерного моделирования и систем автоматизированного проектирования (САПР).

**Системотехник, проектировщик сложных технических систем, системный инженер (systems engineer, systems designer)** – это специалист широкого профиля, инженер, обладающий достаточными знаниями в конкретной области техники, имеющий повышенную математическую подготовку, а также знающий основы вычислительной техники, автоматизации управления, исследования операций [12, 13] и особенности их практического применения. Проектировщик сложных ТС работает преимущественно на комплексном и системном уровнях, а также на уровне системы систем. Помимо него, в группу внешнего проектирования сложных систем обычно включают специалистов по системному анализу и математическому моделированию, а также инженеров, способных организовать взаимодействие между элементами системы.

Существенные особенности имеют испытания сложных систем. Натурный эксперимент в чистом виде используется только для оценки параметров важнейших элементов системы. В комплексных же испытаниях системы значительную роль играют имитационные модели. В частности, на их основе строят имитаторы воздействий внешней среды, генераторы фиктивных сигналов и сообщений, формируют реализации процессов функционирования элементов, участие которых в натурном эксперименте нецелесообразно.

Если отталкиваться от ISO 15288, то можно сказать, что *системные инженеры* – это специалисты, реализующие один или несколько процессов из блока технических процессов [4]. *Системно-инженерные менеджеры* – это специалисты, реализующие один или несколько процессов из блока процессов технического управления. За все технические процессы отвечает *главный системный инженер*, а за все процессы технического управления – *руководитель проекта*, но работать им приходится всегда вместе, потому что все очень связано. За обеспечивающие процессы обычно отвечает *технический директор*.

**Схемотехник ЭРЭС** – это специалист электронного и/или радиоэлектронного профиля, обладающий достаточными знаниями в своей области техники и работающий преимущественно на уровне электрической принципиальной схемы, т.е. на уровнях электронной компонентной базы (ЭКБ), функциональных узлов (ФУ) и радиоэлектронных устройств (ЭУ/РЭУ) иерархии ЭРЭС.

### 1.1.3 Иерархия описаний электронных и радиоэлектронных средств

Объект тождествен объективной реальности. Предмет – это часть объекта, какая-то сторона этой объективной реальности. Однако в силу того что проектная деятельность направлена на описание будущего изделия, которое реально ещё не существует, а присутствует только в голове проектировщика в виде неосязаемого образа (при этом смысл и значение объекта проектирования постепенно овеществляются в виде графических схем, диаграмм жизненного цикла, конструкторской документации (КД) и т.п. посредством знаковых форм и разнообразных профессиональных языков), перед проектировщиком стоит сложная задача максимально детального и точного, а значит, всестороннего описания этого образа. Основное отличие проектирования от познания вообще состоит в том, что объект проектирования (ОП) ещё не существует, однако его образ воспринимается субъектом как реальный с присущими ему внутренней динамичностью и противоречивостью, с конкретными свойствами [14].

Каждый проектируемый ТО может быть представлен описаниями, имеющими иерархическую соподчиненность (рисунок 1.2).

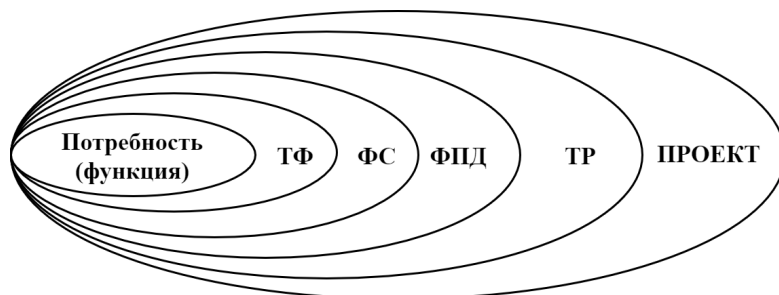


Рисунок 1.2 – Иерархия описаний объекта проектирования

Описания характеризуются двумя свойствами [15]:

- каждое последующее описание является более детальным и более полно характеризует ТО по сравнению с предыдущим;
- каждое последующее описание включает в себя предыдущее.

Согласно теории технических систем [6] каждый ТО, и ЭРЭС в частности, представляется перечнем описаний, в который входят:

- потребность, или функция, – общепринятое и краткое описание на естественном языке назначения ТО или цели его создания (существования). При описании потребности проектировщик отвечает на вопрос: «Что (какой результат) желательно иметь (получить) и каким особым условиям и ограничениям при этом нужно удовлетворить?»;

- техническая функция (ТФ), связывающая потребность с физической операцией (физическое превращение, преобразование, физико-технический эффект (ФТЭ)), с помощью которой эта потребность реализуется;

– функциональная структура (ФС), описывающая функциональные (конструктивная функциональная структура) и потоковые (потоки преобразуемой материи, энергии, информации) связи между элементами, из которых состоит ТО;

– физический принцип действия (ФПД), строящийся на основе потоковой функциональной структуры путем замены наименований физических операций наименованиями электронных компонентов, работа каждого из которых основана на определенном физико-техническом эффекте. Отдельный ФТЭ, обозначаемый  $W$ , можно описать тремя компонентами по формуле  $W = ABC$ . Качественный синтез ФПД основывается на использовании массива качественно описанных ФТЭ (таблица 1.2) [7]. Описание ФПД содержит изображение принципиальной схемы ТО, в которой в упрощенно-идеализированной форме показаны основные конструктивные элементы и связи между ними, обеспечивающие реализацию данного ФПД;

– техническое решение (ТР), представляющее собой конструктивное описание функциональной структуры ТС, включающее информацию о функциональных компонентах (блоках, модулях, узлах, элементах), способах соединения элементов и последовательности их взаимодействия, об особенностях конструктивного исполнения элементов по форме, материалу, соотношению важнейших параметров и т.п.;

---

*ТР представляет собой как бы безразмерное описание технической системы, которое может иметь самые различные реализации по параметрам.*

*Поскольку каждый элемент ТС можно в свою очередь разделить на свои элементы и описать указанным способом, то ТР ТС может быть описано с любой степенью детализации. Для этого используют иерархический набор многоуровневых описаний ТР, т.е. сначала описывают ТР устройства в целом, затем – ТР каждого блока, затем – каждого узла.*

*Описание ТР должно содержать:*

- перечень основных элементов;*
  - взаимное расположение элементов в пространстве;*
  - способы и средства соединения и связи элементов между собой;*
  - последовательность взаимодействия элементов во времени;*
  - особенности конструктивного исполнения элементов (геометрическая форма, материалы и т.д.)*
  - принципиально важные соотношения параметров для ТС в целом или отдельных элементов.*
- 

– проект в виде рабочих чертежей и другой конструкторской документации.



Таблица 1.2 – Примеры описания физико-технических эффектов

Физико-технический эффект	Входное воздействие (А)	Физический или технический объект (В)	Выходной эффект (С)
Закон Ома	Электрическое напряжение	Проводник с сопротивлением	Электрический ток
Закон Джоуля – Ленца	Электрический ток	Проводник с сопротивлением	Теплота
Термоэлектронная эмиссия	Теплота (нагревание)	Оксидная суспензия	Поток электронов
Сонолюминесценция	Акустическая волна	Люминофор (глицерин, нитробензол, этиловый спирт и т.д.)	Электромагнитное излучение (видимая часть спектра)
Пьезоэлектрический	Механическое напряжение	Пьезокристалл (кварц, турмалин, сахар и т.д.)	Электрическое поле
Сверхпроводимость	Температура (ниже определённого предела: $T < T_{кр}$ )	Полупроводник или металл (алюминий, индий, свинец, галлий и т.д.)	Резкое увеличение проводимости (электрической)
Ультразвуковой капиллярный	Акустическая волна (ультразвук)	Жидкость в капилляре	Повышение уровня подъёма жидкости
Свето-гидравлический (открытие № 65)	Электромагнитное излучение (луч квантового генератора)	Жидкость	Гидравлическая волна (большой амплитуды)
Образование высокотемпературной плазмы в высокочастотном разряде	Электрический разряд (высоко-частотный)	Газ (гелий, водород, дейтерий и т.д.)	Образование плазмы (высокотемпературной)

*Под проектом ТС понимается комплекс технической документации, на основании которого можно определить устройство объекта и все необходимые данные по разработке его конструкции, изготовлению, контролю, приёмке, испытаниям, эксплуатации и ремонту.*

*К технической документации относятся:*

*– теоретический чертёж – документ, определяющий геометрическую форму (обводы) изделия и координаты расположения составных частей;*

*– габаритный чертёж – документ, содержащий контурное (упрощённое) изображение изделия с габаритными, установочными и присоединительными размерами;*

*– чертёж общего вида – документ, определяющий конструкцию изделия, взаимодействие его основных частей и поясняющий принцип работы изделия;*

- 
- сборочный чертеж – документ, содержащий изображение изделия и сведения, необходимые для сборки (изготовления) и контроля;
  - монтажный чертеж – документ, содержащий контурное (упрощённое) изображение изделия, а также сведения, необходимые для его установки;
  - схема – документ, на котором показаны в виде условных изображений или обозначений составные части изделия и связи между ними;
  - чертежи деталей – документы, содержащие изображение деталей и сведения, необходимые для их изготовления и контроля;
  - спецификация – документ, определяющий состав сборочной единицы, комплекса или комплекта;
  - ведомость ссылочных документов – документ, содержащий перечень документов, на которые имеются ссылки в конструкторских документах изделия;
  - ведомость спецификаций – документ, содержащий перечень всех спецификаций составных частей изделия с указанием их числа;
  - ведомость покупных изделий – документ, содержащий перечень покупных изделий, применённых в разрабатываемом изделии;
  - ведомость согласования применения изделия – документ, подтверждающий согласование с соответствующими организациями применения покупных изделий в разрабатываемом изделии;
  - ведомость держателей подлинников – документ, содержащий перечень предприятий, на которых хранятся подлинники документов, разработанных для данного изделия;
  - ведомость технического предложения – перечень документов, входящих в техническое предложение;
  - ведомость эскизного проекта – перечень документов, входящих в эскизный проект;
  - ведомость технического проекта – перечень документов, входящих в технический проект;
  - пояснительная записка – документ, содержащий описание устройства и принципа действия разрабатываемого объекта, а также обоснование принятых при его разработке технических и технико-экономических решений;
  - технические условия – документ, содержащий потребительские (эксплуатационные) показатели объекта и методы контроля его качества;
  - программа и методика испытаний – документ, содержащий технические данные, подлежащие проверке при испытании объекта, а также порядок и методы их контроля;
-

- 
- расчеты – документ, содержащий расчеты параметров<sup>5</sup> и величин;
  - эксплуатационные документы – документы, предназначенные для использования при эксплуатации, обслуживании и ремонте объекта в процессе его использования по назначению;
  - ремонтные документы – документы, содержащие данные для проведения ремонтных работ на специализированных предприятиях.
- 

В очередной раз следует подчеркнуть, что функции некоторых ТС инвариантны к их физической природе, т.е. ТС, выполняющие одну и ту же функцию, можно реализовать на абсолютно разных ФПД.

---

*Например, часы, выполняющие функцию отсчета времени, можно реализовать на физических принципах механики (механические часы), ядерной физики (атомные часы) или электроники (электронные часы). Заметим, что даже в основе электронных часов лежит все тот же механический принцип – явление механического резонанса кварцевой пластины, которое является сердцем электронных часов.*

---

Этот пример в очередной раз демонстрирует глубину взаимосвязей и взаимопроникновение абсолютно различных разделов физики. Однако в рамках данной дисциплины нас в первую очередь будут интересовать ТС, работающие на физических принципах электроники, радиотехники, радиоэлектроники и смежных дисциплин.

При разработке любого ТО, когда ставится цель создать изделие выше уровня мировых образцов, проектировщику предстоит разработать иерархическую последовательность задач выбора проектно-конструкторских решений. Эта последовательность имеет полное соответствие с иерархией описаний ТО [15]. Рассмотрим различные типы задач.

*Задача 1 – составление или уточнение описания потребности (функции).* Наряду с качественным описанием указывают основные количественные характеристики действия, объекта, условий и ограничений.

*Задача 2 – выбор физической операции.* Чаще всего для реализации одной и той же потребности существует несколько альтернативных физических операций (ФО) (рисунки 1.3, 1.4). Проектировщику предстоит выбрать наиболее перспективную из них.

*Задача 3 – выбор функциональной структуры.* Для реализации одной и той же ТФ исходя из описаний потребности и ФО и с учетом ФС, близких и аналогичных ТО, возможно построение нескольких альтернативных ФС, из которых также предстоит выбрать наиболее рациональную.

---

<sup>5</sup> Параметр величина, характеризующая какое-нибудь основное свойство технической системы.

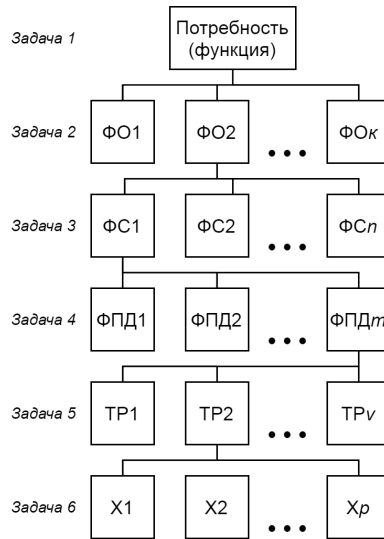


Рисунок 1.3 – Иерархия задач выбора проектно-конструкторских решений

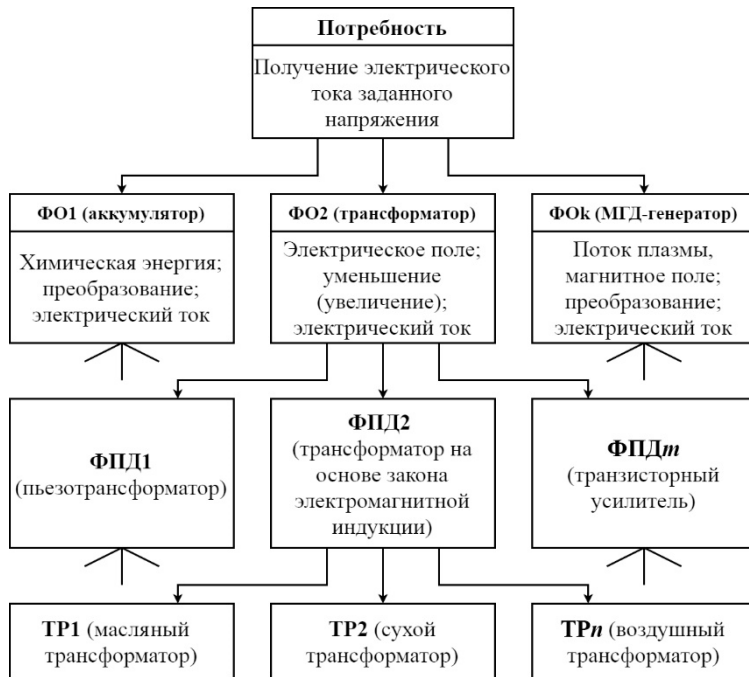


Рисунок 1.4 – Пример иерархии или систематики ТО

*Задача 4 – выбор физического принципа действия.* У одной и той же потоковой ФС различные элементы могут быть реализованы на основе различных физико-технических эффектов. В связи с этим иногда может быть синтезировано большое число возможных ФПД, из которых выбирается наиболее эффективный вариант.

*Задача 5 – выбор технического решения.* Один и тот же ФПД может быть реализован несколькими, а иногда очень большим числом (сотни) практически приемлемых вариантов ТР, из которых предстоит выбрать лучшее.

*Задача 6 – выбор параметров ТО и его элементов.* При решении этой задачи выполняется иерархическая последовательность подзадач поиска и выбора оптимальных параметров ТО и его элементов. В каждой такой подзадаче производится выбор, по существу, на бесконечном множестве возможных вариантов.

Хотя все эти типы задач можно отнести к творческим инженерным задачам, наиболее ярко выраженную принадлежность к таковым имеют задачи 3–5.

Выделенные типы задач и последовательность их решения имеют определенную идеализацию и условность, поскольку на практике проектирование и конструирование идут итерационно, с многочисленными возвратами, а решение смежных задач часто сокращается.

Перечисленные задачи поиска и выбора проектно-конструкторских решений имеют одно интересное свойство. С повышением уровня задачи (от 6-го до 1-го типа) её успешное решение дает больший экономический эффект, вызывает более заметный технический прогресс в данной области и обеспечивает разработку изделий с большим сроком морального старения. Так, например, решение задачи 6 обычно улучшает интересующие технико-экономические показатели изделий на 10–15%, задачи 5 – на 20–30%, задачи 4 – на 30–50% (иногда в несколько раз). Ещё более важными оказываются изобретение и обоснование новых ФО и выявление новых потребностей.

Следует заметить, что существуют многочисленные стандарты, инструкции и методические материалы по описанию технических и рабочих проектов; в области патентоведения и в специальной технической литературе имеются инструкции и методики по описанию технических решений. Однако для описания потребности (функции), ТФ, ФС, ФПД не существует инструктивной и методической литературы. Это затрудняет разработку методов постановки и решения задач типов 1–4 и делает проблематичным изменение отношения к этим задачам при подготовке инженеров.

**Нисходящее и восходящее проектирование.** Концепция иерархии описаний является основой нисходящего проектирования, т.е. ведения разработки объекта последовательно от общих черт к детальным (рисунок 1.5) [16, 17]. Его результатом являются требования к отдельным частям и узлам. Возможен ход разработки от частного к общему, что образует процесс восходящего проектирования. Такое проектирование встречается, если одна или несколько частей уже готовые (покупные или разработанные) изделия.

В ходе системотехнического проектирования ЭРЭС выбираются и формулируются цели проектирования, обосновываются исходные данные и определяются принципы построения систем. При этом формируется структура проектируемого объекта, его составных частей (функционально завершенных

блоков), определяются энергетические и информационные связи между составными частями. В результате разрабатываются частные технические задания на проектирование отдельных частей объекта.

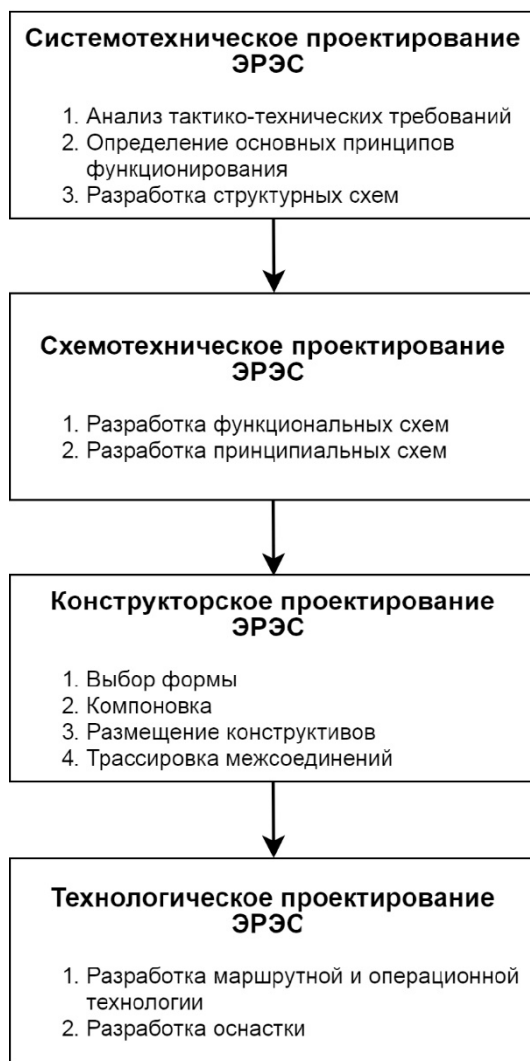


Рисунок 1.5 – Этапы нисходящего проектирования ЭРЭС

При схемотехническом проектировании ЭРЭС осуществляется аппаратурная реализация составных частей систем и устройств. Выбор элементной базы, принципиальной схемы, структурный и параметрический синтез электронных и радиоэлектронных схем (оптимизация параметров) производится с расчетом обеспечения наилучшего функционирования (и эффективного производства). При выборе элементной базы и синтезе принципиальных схем необходимо учитывать конструкторско-технологические требования.

В процессе технического проектирования (конструирования) ЭРЭС решаются задачи компоновки и размещения элементов и узлов, выполнения печатных и проводных соединений, а также задачи теплоотвода, электрической прочности, защиты от внешних воздействий и т.п. На этом этапе разрабатывается техническая документация для изготовления и эксплуатации ЭРЭС.

В ходе технологической подготовки производства осуществляется разработка технологических процессов изготовления отдельных блоков и всей системы в целом.

И нисходящее, и восходящее проектирование обладают своими достоинствами и недостатками. Так, при нисходящем проектировании возможно появление требований, впоследствии оказывающихся нереализуемыми по технологическим, экологическим или иным соображениям. При восходящем проектировании возможно получение объекта, не соответствующего заданным требованиям. В реальной жизни, вследствие итерационного характера проектирования оба его вида взаимосвязаны.

---

*Так разрабатывая при нисходящем проектировании смартфон (от общей схемы к его частям, например к блоку цифровой обработки сигналов), необходимо заранее иметь представление об ассортименте современной электронной компонентной базы, поскольку есть риск начать разрабатывать в масштабе дискретных элементов то, что уже существует в готовом виде на уровне интегральной схемы. Другими словами, вместо того чтобы разрабатывать электрическую принципиальную схему блока цифровой обработки сигналов с целью её дальнейшей реализации, к примеру, на дискретных SMD-компонентах, можно просто купить на рынке этот функциональный узел, реализованный уже в интегральном исполнении. При этом может возникнуть проблема выбора производителя: если электронная компонентная база производится в других странах, всегда существуют риски срыва поставок вследствие разного рода причин (изменение внешней политики государства, санкции, экономическая диверсия конкурирующих производителей, ликвидация производства и т.п.).*

---

### 1.1.4 Жизненный цикл технической системы

Состояние любой технической системы динамично, т.е. изменяется во времени. ТС, как и любая биологическая система, включая человека, рождается, живет и умирает, образуя жизненный цикл (ЖЦ).

**Жизненный цикл технической системы** – это последовательность стадий и этапов существования объектов искусственного происхождения от начала их создания до момента исчезновения (рисунок 1.6) [18].

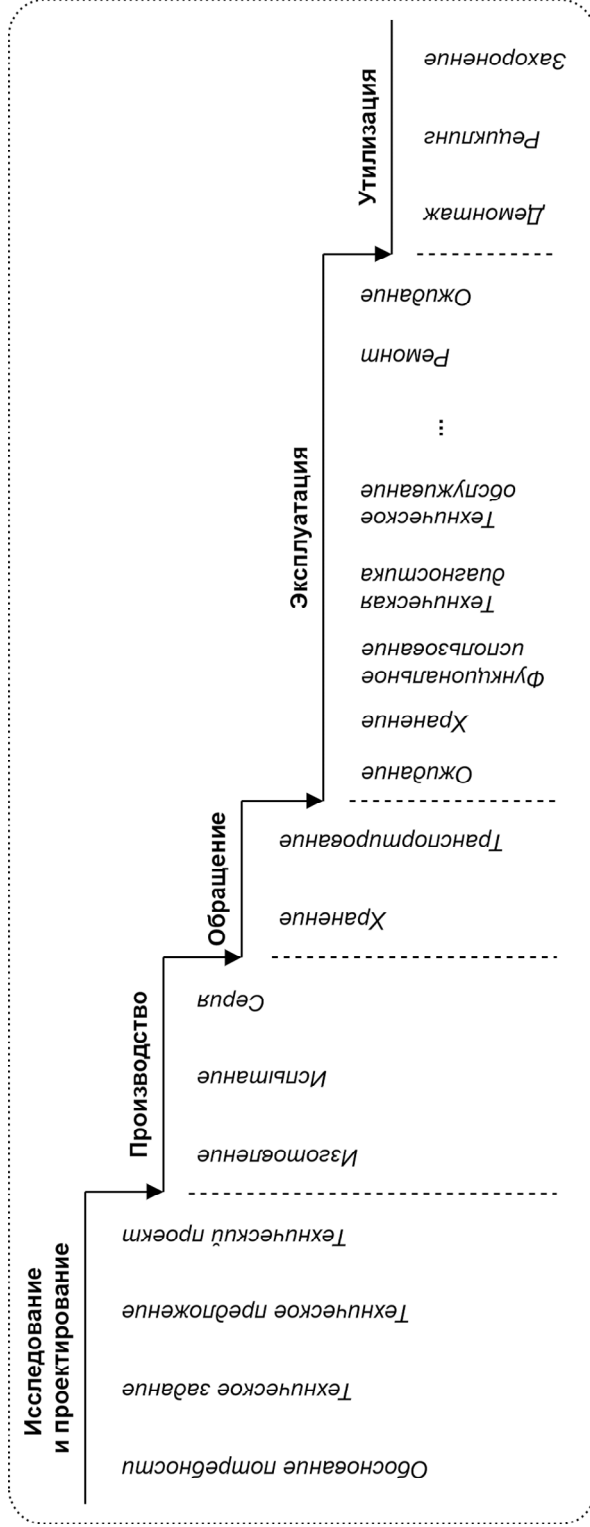


Рисунок 1.6 – Стадии жизненного цикла технической системы



Типичный состав стадий ЖЦ:

- 1) исследование и проектирование;
- 2) изготовление;
- 3) обращение;
- 4) эксплуатация;
- 5) утилизация.

Стадии состоят из этапов. На каждом этапе объект имеет относительно стабильный набор характеристик. Типичный состав этапов:

1) определение функциональных и потребительских качеств ТС, что соответствует составлению технического задания;

2) выбор функциональной структуры, принципа действия и технического решения, что соответствует разработке технического предложения или (и) технического проекта;

3) рабочее проектирование, связанное с расчетом и оптимизацией параметров ТС, выбором и разработкой технологии изготовления, составлением проектной документации;

4) изготовление, контроль и испытание ТС;

5) транспортировка и хранение ТС;

6) функциональное использование (использование по назначению), диагностика неисправностей и ремонт ТС;

7) утилизация ТС как результат её физического или морального старения.

Наибольшее число задач технического творчества возникает на 1-й и 2-й стадиях; характерны такие задачи и для 4, 6, 7-й стадий. Разные классы ТС могут иметь несколько различающиеся наборов стадий и этапов жизненного цикла.

При разработке новых ТС проектировщику необходимо учитывать информацию об этих системах от заинтересованных сторон. Для её выявления разработчику нужно занять позицию определенной заинтересованной стороны и задать соответствующие ключевые вопросы общего характера. В случае идеальной коммуникации каждый специалист должен сформулировать свои вопросы к каждому из остальных специалистов, участвующих в жизненном цикле ТС. В качестве примера приведем главные вопросы ключевых позиций.

Позиция исследователя:

– использование каких существующих физических принципов действия может улучшить показатели ТС;

– перспективы развития каких наук и отраслей техники помогут усовершенствовать существующую систему?

Позиция системотехника:

– какую систему нужно проектировать;

– нужно ли вообще проектировать данную ТС;

– какова величина спроса на ТС;

– как много экземпляров изделий ТС нужно сделать;

– окупится ли производство ТС серии заданного объема;

– существуют ли аналоги разрабатываемой системы; если «да», то в какой форме (идея, патент, рабочий прототип, ноу-хау, серийно выпускаемый и продаваемый образец и т.д.);

– какова должна быть максимальная себестоимость ТС;

– каким образом ТС будет влиять на окружающие объекты, пользователей и общество;

– как долго будет востребована функция данной ТС её потребителями;

– какие дополнительные функции должна выполнять ТС; в каких случаях использования эти функции будут наиболее востребованы;

– как упростить электрическую структурную схему ТС?

Позиция схемотехника:

– какие существуют замечания к электрической структурной схеме?

– какие принципиальные схемотехнические решения функциональных узлов структурной электрической схемы существуют сегодня; какие из них могут подойти для данной проектной ситуации;

– в каких условиях будет эксплуатироваться ТС;

– какие схемотехнические решения могут обеспечить требования электромагнитной совместимости электрической схемы;

– на какой элементной базе нужно реализовать ТС, чтобы обеспечить баланс между противоречивыми требованиями к себестоимости её изготовления, массо-габаритным показателям печатного узла, его надежности, технологичности и т.п.?

Позиция программиста:

– какие вычислительные алгоритмы и программные решения нужно использовать для обеспечения работы ТС в режиме реального времени;

– насколько эргономичным должен быть пользовательский интерфейс;

– какие могут быть замечания к выбору микропроцессоров и микроконтроллеров;

– насколько типовыми должны быть интерфейсы ТС;

– что экономически целесообразнее – использовать готовое ПО или разработать собственное;

– какие действия по поддержке программного продукта могут потребоваться на стадии эксплуатации ТС?

Позиция конструктора:

– насколько надежной должна быть ТС;

– насколько конструкция ТС должна быть эстетична и эргономична;

– каковы должны быть массо-габаритные показатели ТС;

– как обеспечить технологичность конструкции;

– как обеспечить серийность ТС;

– какие материалы следует использовать;

– в каких условиях будет эксплуатироваться ТС;

– насколько типовой (унифицированной) должна быть конструкция ТС;

– какие могут быть замечания к электрической принципиальной схеме?

Позиция технолога:

- как свести время и затраты изготовления ТС к минимуму;
- как в максимальной степени автоматизировать процесс изготовления ТС;
- какие могут быть замечания к конструкции ТС;
- какие могут быть замечания к электронной компонентной базе ТС?

Позиция специалиста по сбыту:

- как долго ТС может храниться;
- как ТС должна транспортироваться;
- какие могут быть замечания к конструкции ТС?

Позиция специалиста по эксплуатации:

- требуется ли ТС обслуживание, диагностика, ремонт;
- как свести время простоя ТС, время технического обслуживания и ремонта к минимуму;
- как улучшить удобство эксплуатации, технической диагностики, технического обслуживания и ремонта ТС;
- как свести к минимуму амортизационные расходы по эксплуатации ТС;
- как увеличить срок использования ТС;
- как увеличить срок активного использования ТС до первого отказа;
- какие могут быть замечания к структурной и принципиальной электрическим схемам;
- какие могут быть замечания к конструкции ТС; что может показать опыт эксплуатации данной ТС?

Позиция специалиста по утилизации:

- насколько ценны составные компоненты, материалы и вещества, входящие в состав ТС;
- насколько опасны для окружающей среды компоненты, материалы и вещества, входящие в состав ТС;
- как в максимальной степени автоматизировать процесс утилизации ТС;
- можно ли использовать компоненты, материалы и вещества, входящие в состав ТС, повторно в производстве других технических объектов;
- как повысить долю добываемых в процессе утилизации полезных компонентов, материалов и веществ;
- как осуществить процесс доставки ТС до пункта утилизации;
- как повысить долю ТС, возвращаемых пользователями в пункт утилизации;
- как минимизировать долю ТС, не возвращаемых пользователями в пункт утилизации;
- как свести время стадии утилизации к минимуму;
- как долго будут разлагаться материалы и вещества, входящие в состав ТС и попавшие в природу; к чему это может привести с позиции окружающей среды;
- какие могут быть замечания к структурной и принципиальной электрическим схемам?

– какие могут быть замечания к конструкции ТС; что может показать опыт утилизации данной ТС?

Кроме вышеприведенного, существуют и другие определения жизненного цикла ТС.

**Жизненный цикл** – это не временной период существования, а процесс последовательного изменения состояния, обусловленный видом производимых воздействий [19].

**Жизненный цикл системы** – это стадии процесса, охватывающие различные состояния системы, начиная с момента возникновения необходимости в такой системе и заканчивая её полным выводом из эксплуатации [20]; конечный набор общих фаз и этапов, через которые система может проходить в течение своей жизни [21]; эволюция новой системы в виде нескольких ступеней, включающих такие важные стадии, как концепция, разработка, производство, эксплуатация и окончательное выведение из эксплуатации [9].

В стандартах системной инженерии описаны четыре основных принципа моделирования жизненного цикла, а именно:

– в течение своей жизни система развивается, проходя через определенные стадии;

– на каждой стадии жизненного цикла должны быть доступны подходящие обеспечивающие системы (англ. *enabling systems*), только в этом случае могут быть достигнуты результаты, запланированные для данной стадии;

– на определенных стадиях жизненного цикла такие атрибуты, как технологичность, удобство использования, пригодность к обслуживанию и возможность удаления отходов, должны быть специфицированы и практически реализованы;

– переход к следующей стадии возможен только при условии полного достижения результатов, запланированных для текущей стадии.

В полном жизненном цикле любой системы всегда присутствуют типовые стадии, каждая из которых имеет характерные только для неё цели и вносит свой вклад в полный жизненный цикл [22].

Модели жизненного цикла системы получили значительное распространение в последние два десятилетия. Некоторые модели развивались как дополнительные уникальные и пользовательские приложения в исследованиях. Кроме того, разработка программного обеспечения повлекла за собой формирование новых моделей разработки, которые впоследствии были приняты системным сообществом [9].

Не существует единой модели жизненного цикла, удовлетворяющей требованиям любой возможной задачи. Различные организации по стандартизации, правительственные учреждения и инженерные сообщества публикуют собственные модели и технологии, которые могут быть использованы для конструирования. Таким образом, нецелесообразно говорить о существовании единственно возможного алгоритма построения модели жизненного цикла (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Типовые модели жизненного цикла технической системы

Название типовой модели	Стадии жизненного цикла ТС	Примечание
1. Типовая модель жизненного цикла по ISO/IEC 15288	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Замысел</li> <li>2. Разработка</li> <li>3. Производство</li> <li>4. Применение</li> <li>5. Поддержка применения</li> <li>6. Прекращение применения и списание</li> </ol>	<p>В 2002 году Международная организация по стандартизации и Международная электротехническая комиссия выпустили результат многолетней работы – стандарт ISO/IEC 15288:2002. Согласно стандарту процессы и действия жизненного цикла определяются, соответствующим образом настраиваются и используются в течение стадии жизненного цикла для полного удовлетворения целей и результатов на этой стадии. В различных стадиях жизненного цикла могут принимать участие разные организации. Не существует единой универсальной модели жизненных циклов систем. Те или иные стадии жизненного цикла могут отсутствовать или присутствовать в зависимости от каждого конкретного случая разработки системы</p>
2. Типовая модель жизненного цикла по версии Министерства обороны США	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Анализ</li> <li>2. Разработка технологии</li> <li>3. Инженерная и производственная разработка</li> <li>4. Производство и развертывание</li> <li>5. Функционирование и поддержка</li> </ol>	<p>Для управления рисками в области применения передовых технологий и сведения к минимуму дорогостоящих технических или управленческих ошибок МО США разработало руководство, содержащее все необходимые принципы разработки систем. Эти принципы вошли в специальный перечень директив DoD 5000</p>
3. Типовая модель жизненного цикла системы Национального общества профессиональных инженеров (NSPE)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Концепция</li> <li>2. Техническая реализация</li> <li>3. Разработка</li> <li>4. Коммерческая валидация и подготовка производства</li> <li>5. Полномасштабное производство</li> <li>6. Поддержка конечного продукта</li> </ol>	<p>Данная модель адаптирована для развития коммерческих систем. Она в основном направлена на развитие новых продуктов, обычно являющихся результатом технического прогресса. Модель NSPE представляет собой альтернативный взгляд на модель версии МО США. Жизненный цикл по модели NSPE разбивается на шесть стадий</p>

Окончание таблицы 1.3

Название типовой модели	Стадии жизненного цикла ТС	Примечание
4. Типовая модель жизненного цикла продукции согласно руководящему документу Р 50-605-80-93	Для промышленной продукции гражданского назначения предложены следующие стадии. 1. Исследование и проектирование 2. Изготовление 3. Обращение и реализация 4. Эксплуатация или потребление	В руководящем документе Р 50-605-80-93 тщательно проработан жизненный цикл промышленного изделия, в том числе военной техники. В рамках жизненного цикла промышленной продукции гражданского назначения предложено рассматривать 73 вида работ и 23 типа стейкхолдеров (участников работ по терминологии документа)
	Для промышленной продукции военного назначения предложены следующие стадии. 1. Исследование и обоснование разработки 2. Разработка 3. Производство 4. Эксплуатация 5. Капитальный ремонт	В рамках жизненного цикла промышленной продукции военного назначения предложено рассматривать 25 видов работ и 7 типов стейкхолдеров (участников работ)

**Автоматизация жизненного цикла технических систем.** Реализация процессов проектирования и производства современных ЭРЭС невозможна без использования информационных технологий, а сами процессы не могут рассматриваться отдельно друг от друга и других этапов ЖЦ продукции: маркетинга, планирования, проектирования, производства, а также при реализации, эксплуатации и утилизации РЭС. Только широкое использование информационных технологий и реализующих их информационных систем (CALS-технологий) позволяет предприятиям выйти на качественно новый уровень управления и производства (рисунок 1.7) [14].

CALS-технологии (Continuous Acquisition and Lifecycle Support – непрерывная поддержка производства и жизненного цикла) призваны служить средством, интегрирующим промышленные автоматизированные системы в единую многофункциональную систему. Цель интеграции автоматизированных систем проектирования и управления заключается в повышении эффективности создания и использования сложной техники и выражается в следующем [12]:

1) улучшается качество изделий за счет более полного учета имеющейся информации при проектировании и принятии управленческих решений;

2) сокращаются материальные и временные затраты на проектирование и изготовление изделий;

3) значительно снижаются затраты на эксплуатацию благодаря реализации функций интегрированной логистической поддержки, облегчается решение проблем ремонтпригодности, интеграции продукции в различного рода системы и среды, адаптации к меняющимся условиям эксплуатации и т.п.

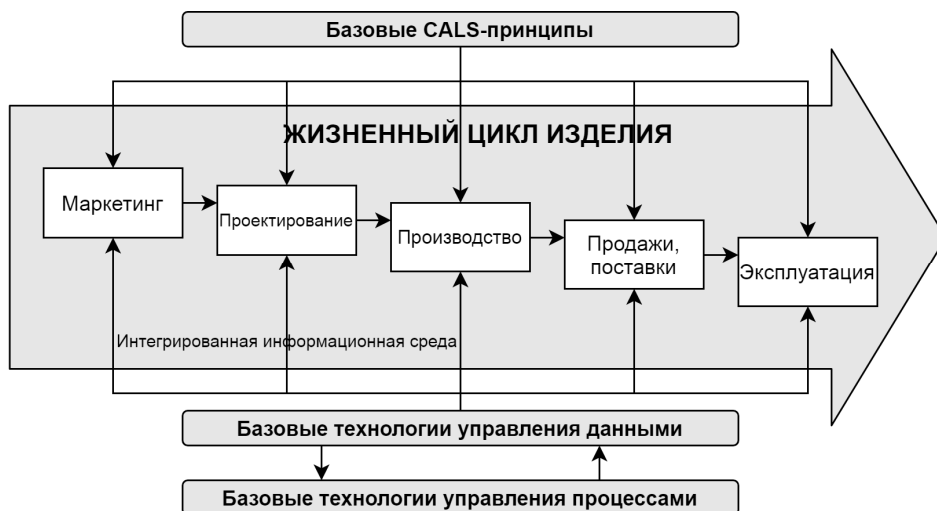


Рисунок 1.7 – Концептуальная модель CALS

Основные стадии ЖЦ промышленных изделий представлены на рисунке 1.8 [23]. На рисунке указаны основные типы автоматизированных систем, используемых в ЖЦ изделий:

CAE – Computer Aided Engineering (автоматизированные расчеты и анализ);

CAD – Computer Aided Design (автоматизированное конструкторское проектирование);

CAM – Computer Aided Manufacturing (автоматизированная технологическая подготовка производства);

PDM – Product Data Management (управление проектными данными);

ERP – Enterprise Resource Planning (планирование и управление предприятием);

MRP-2 – Manufacturing Requirement Planning (планирование производства);

MES – Manufacturing Execution System (производственная исполнительная система);

SCM – Supply Channel Management (управление последовательностью поставок);

CRM – Customer Relationship Management (управление взаимоотношениями с заказчиками);

SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition (диспетчерское управление производственными процессами);

CNC – Computer Numerical Control (компьютерное числовое управление);

S&SM – Sales and Service Management (управление продажами и обслуживанием);

CPC – Collaborative Product Commerce (совместный электронный бизнес).

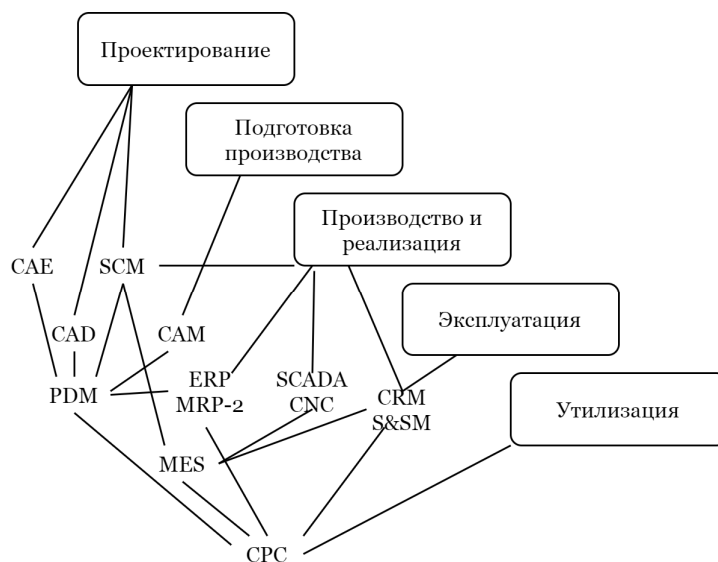


Рисунок 1.8 – Этапы жизненного цикла промышленных изделий и системы их автоматизации

Итак, CALS-технологии – это технологии комплексной компьютеризации сфер промышленного производства, причем комплексность обеспечивается унификацией и стандартизацией описания состава (спецификаций) промышленных изделий на всех этапах их ЖЦ. Основные спецификации представлены проектной, технологической, производственной, маркетинговой, эксплуатационной документацией. В CALS-системах предусмотрено хранение, обработка и передача информации в компьютерных средах, оперативный доступ к данным в нужное время и в нужном месте.

В 1990-х годах разработан и к настоящему времени принят ряд серий международных стандартов, представляющих CALS-технологии, среди которых наиболее значим ISO 10303 STEP (Standart of Exchange of Product data). В контрактах, заключаемых на поставку зарубежным заказчикам военной техники, требования к изделиям и документации на них, как правило, формулируются с позиций международных CALS-стандартов и военных стандартов DoD (с префиксом MIL). Успех на рынках сложной технической продукции



немыслим вне CALS-технологий. В связи с возникшими практическими потребностями рядом комиссий и комитетов в рамках международных организаций были начаты работы по созданию информационных технологий взаимодействия предприятий и выражающих их международных стандартов. Например, в Международной организации стандартизации (International Standard Organisation – ISO) этими вопросами занимается подкомитет SC4 комитета TC184. В SC4 имеется несколько рабочих групп, занимающихся конкретными сериями стандартов. В настоящее время в ведущих индустриальных странах мира созданы национальные органы, координирующие работу в области CALS-технологий. В России в рамках Госстандарта создан технический комитет № 431 «CALS-технологии».

Главная задача создания и внедрения CALS-технологий – обеспечение единообразных описаний и интерпретации данных независимо от места и времени их получения в общей системе, имеющей масштабы вплоть до глобальных. Поэтому развитие CALS-технологий стимулирует образование виртуальных производств, при которых процесс создания документации с информацией для программно-управляемого технологического оборудования, достаточной для изготовления изделия, может быть распределен во времени и пространстве между многими организационно автономными проектными организациями. Кроме того, одна и та же конструкторская документация может быть использована многократно в разных проектах, а одна и та же технологическая документация адаптирована к разным производственным условиям, что позволяет существенно сократить и удешевить общий цикл проектирования и производства.

CALS-технологии не отвергают существующие автоматизированные системы проектирования и управления, а являются средством их эффективного взаимодействия. Поэтому интеграция автоматизированных систем на современных предприятиях должна быть основана на CALS-технологиях. Их внедрение требует модернизации существующих технологий под CALS-стандарты, решения концептуальных проблем управления сложностью проектов и интеграции программного обеспечения, включая вопросы декомпозиции проектов, распараллеливания проектных работ, целостности данных, межпрограммных интерфейсов и т.д.

**Жизненный цикл технической системы и креативные методы проектировщика.** Креативные методы – это эвристические творческие методы, облегчающие поиск оригинальных решений проектных задач.

Креативные методы предназначены для активизации творческого, инновационного мышления проектировщика и устранения психологических барьеров, возникающих у него в процессе разработки новых или модернизации существующих ТС.

Креативные методы условно можно разделить на две большие группы:

- 1) дивергентные и конвергентные;
- 2) индивидуальные и групповые.

Дивергентные методы помогают вырабатывать множество оригинальных решений, для которых характерны следующие свойства: беглость – генерирование множества ответов или идей; гибкость – изменение формы предоставления информации или изменение самой информации, смещение точек зрения; оригинальность – создание необычных или новых идей; проработка, нюансировка – детализация идей. Конвергентные творческие методы качественно отличаются от дивергентных методов тем, что с их помощью проектировщик пытается определить одно или несколько оптимальных решений из более широкого набора доступных для данной проблемы. Из второй группы некоторые творческие методы в первую очередь подходят для отдельных лиц, тогда как другие творческие методы в первую очередь подходят для проектных групп и команд. Также существуют дополнительные методы, которые традиционно не относятся к категории творческих, однако являются весьма важными инструментами мышления в арсенале проектировщика. Поэтому они вынесены в самостоятельную группу (таблица 1.4) [24].

Таблица 1.4 – Креативные методы мышления проектировщика

Креативные методы	Индивидуальные	Групповые
Дивергентные (генерация множества альтернатив)	Латеральное мышление (Де Боно) Разрешение противоречий (ТРИЗ, Г. Альтшуллер) Биомимикрия Визуальные (концептуальная карта (Д. Новак); концептуальный «вентилятор» (Де Боно); интеллект-карта, ментальная карта (Т. Бьюзан))	Мозговой штурм (А. Осборн) Шесть шляп мышления (Де Боно) SWOT-анализ (А. Хамфри) SCAMPER-анализ (А. Осборн) Фокус-группы (Р. Мертон)
Конвергентные (выбор альтернатив и принятие решений)	РМІ-анализ (Де Боно) Морфологический анализ (Ф. Цвики) Анализ дерева решений (Д. Маги) Анализ ценностей/ Инженерия ценностей (Л. Майлз) Парето-анализ (В. Парето)	Метод Дельфи (Н. Далки и О. Хелмер из Rand Corporation) SAST-анализ (Ч. Чёрчмен, Р. Мейсон, И. Митрофф) Диаграмма причин и следствий (К. Исикава) Анализ модели Кано (Н. Кано) Групповые решения – теоретический контекст Групповые решения – практические методы (неформальный, формальный и количественный, многокритериальное принятие решений)

#### Окончание таблицы 1.4

Креативные методы	Индивидуальные
Другие	Карта процессов Девять экранов (Г. Альтшуллер) Технологическое прогнозирование / технофорсайт (с использованием ТРИЗ-методологии) Матричный анализ структуры проекта Анализ последствий режима отказа (Failure Mode Effect Analysis, FMEA) Анализ корневой причины (Root cause analysis, RCA) Диверсионный анализ (упреждающее определение отказов, Г. Альтшуллер) Анализ и разрешение конфликтов

Рекомендации по использованию креативных методов в анализе процессов жизненного цикла ТС приведены в таблице 1.5 [24].

В процессе разработки (приобретения) инновационной концепции или системы в качестве способа оценки степени её зрелости используют уровни готовности технологий (technology readiness levels (TRL)). Этот западноевропейский метод классификации базируется на оценочной шкале от 1 до 9: первый уровень означает зарождающуюся технологию, девятый уровень – самую зрелую.

TRL был впервые разработан в 1970-х годах Стэнном Сэдиным из NASA. Сегодня метод TRL широко используется международным инженерным сообществом.

Главной целью использования TRL является помощь в управлении принятием решений, касающихся разработки и передачи технологий. Метод следует рассматривать как один из нескольких инструментов, необходимых для управления процессами исследования и разработки внутри проектной организации (приложение 1) [24].

Главные достоинства метода:

- обеспечение общего понимания технологического статуса разработки;
- управление рисками;
- помощь в принятии решений о финансировании разработки технологии;
- помощь в принятии решений о трансфере технологии.

Ограничения применимости метода:

- готовность не обязательно соответствует целесообразности или технологической зрелости;
- необходимо учитывать множество факторов, в том числе актуальность операционной среды продуктов для имеющейся системы, а также несоответствие архитектуры продукта и системы.

Таблица 1.5 – Использование креативных методов в анализе процессов жизненного цикла технической системы

Процессы жизненного цикла	Рекомендуемые креативные методы																													
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Приобретение изделия		X					X				X																			
Поставка изделия		X		X	X		X				X												X							
Управление моделью жизненного цикла изделия						X	X	X																X						
Управление инфраструктурой						X	X	X			X								X	X				X			X			
Управление портфолио	X						X	X											X	X				X				X		
Управление человеческими ресурсами																								X						
Управление качеством			X				X	X			X									X				X						
Управление знаниями	X					X			X		X													X						
Планирование проекта				X									X	X					X							X				
Оценка проекта и управление проектом	X											X	X					X	X							X			X	
Управление принятием решений									X				X							X										
Управление рисками			X							X										X								X		X

Продолжение таблицы 1.5

Процессы жизненного цикла	Рекомендуемые креативные методы																													
	Латеральное мышление	Разрешение противоречий	Биомимикрия	Концептуальная карта	Концептуальный вентилатор	Интеллект-карта	Мозговой штурм	Шесть шляп мышления	SWOT-анализ	SCAMPER-анализ	Фокус-группы	PMI-анализ	Морфологический анализ	Дерево решений	Анализ / инженерия ценностей	Парето-анализ	Метод Дельфи	SAST-анализ	Анализ причин и следствий	Анализ модели Канон	Групповые решения: теория	Групповые решения: практика	Карта процессов	Девять экранов	Технологическое прогнозирование	Матричный анализ структуры проекта	FMEA-анализ	Диверсионный анализ	Анализ и разрешение конфликтов	
Управление конфигурациями			X									X		X						X						X				
Управление информацией								X			X						X				X						X			
Метрологический процесс			X				X	X												X							X			
Обеспечение качества			X				X	X												X							X			
Анализ миссии или бизнеса	X	X	X		X				X	X						X	X			X			X	X						X
Определение потребностей и требований стейкхолдера	X	X	X		X				X	X										X			X	X						X
Определение требований к системе	X	X	X				X																X							
Определение архитектуры системы	X	X	X				X																X							
Определение дизайна			X																				X							
Системный анализ					X							X											X							
Реализация	X	X			X		X						X										X			X				X
Интеграция																							X			X				X

Окончание таблицы 1.5

	Рекомендуемые креативные методы																												
	Латеральное мышление	Разрешение противоречий	Биомимикрия	Концептуальная карта	Концептуальный вентилятор	Интеллект-карта	Мозговой штурм	Шесть шляп мышления	SWOT-анализ	SCAMPER-анализ	Фокус-группы	PMI-анализ	Морфологический анализ	Дерево решений	Анализ / инженерия ценностей	Парето-анализ	Метод Дельфи	SAST-анализ	Анализ причин и следствий	Анализ модели Канон	Групповые решения: теория	Групповые решения: практика	Карта процессов	Девять экранов	Технологическое прогнозирование	Матричный анализ структуры проекта	FMEA-анализ	Диверсионный анализ	Анализ и разрешение конфликтов
Процессы жизненного цикла	X	X	X					X																					
Верификация		X				X							X				X			X		X				X			
Транспортировка													X				X												
Валидация		X																			X	X							
Функциональное использование							X	X			X																		
Техническое обслуживание											X																		
Утилизация	X	X	X		X			X									X							X					

## 1.1.5 Задачи проектирования электронных и радиоэлектронных средств

**Проектирование** – процесс определения архитектуры, компонентов, интерфейсов и других характеристик системы или её части [25]. Результатом проектирования является проект – целостная совокупность моделей, свойств или характеристик, описанных в форме, пригодной для реализации системы.

**Проектирование ТО** (от лат. *projectus* – брошенный вперед) – процесс создания проекта, реализация прообраза желаемого ТО. Проектирование, как и вся инженерная деятельность, является процессом поиска, нахождения и отображения в конструкторской документации (КД) решений, связанных с созданием новых технических систем, работающих на принципах электроники и радиоэлектроники [7].

Проектирование ЭРЭС как прикладная научная дисциплина является обобщением методов анализа и синтеза схем, конструкций и технологий, необходимых при разработке электронных или радиотехнических систем.

Проектирование схем и конструкций относится к процессам принятия решений, которые на всех уровнях выполняются в следующем порядке: постановка задачи – формулирование требований к объекту проектирования; поиск решений – подбор вариантов (синтез алгоритмов преобразования информации); принятие решения – выбор и обоснование наилучшего (оптимального) варианта из числа возможных на основании четко сформулированного критерия оптимизации; исполнение решения – разработка КД по выбранному варианту; оценка полученных результатов – сравнение с установленными требованиями, корректирование схемы и конструкции в случае необходимости.

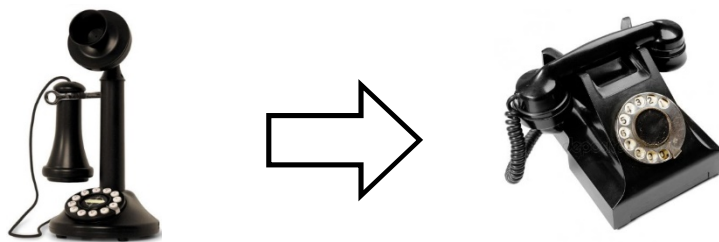
В этой последовательности следует подчеркнуть вариантность проработки и необходимость количественной оценки качества технического объекта.

По степени новизны проектируемых технических систем различают следующие уровни проектирования:

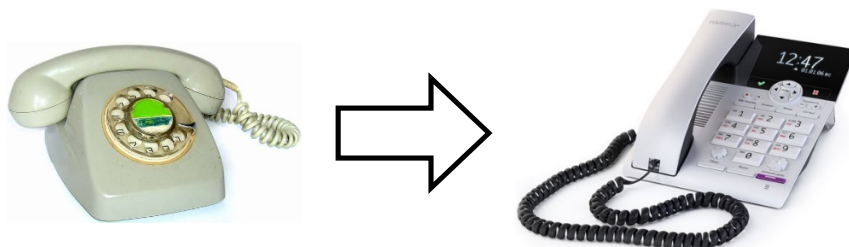
- частичная модернизация – изменение параметров, которое влечет сравнительно небольшое улучшение показателей качества;
- существенная модернизация – изменение параметров и структуры системы, которое обеспечивает существенное улучшение показателей качества;
- создание новой системы, которая базируется на новых физических принципах действия, для обеспечения значительного улучшения основных показателей качества при выполнении тех же самых или новых функций.

Уровни и задачи проектирования ЭРЭС связаны с понятием эволюции технических систем, которая происходит по законам развития технических систем (ЗРТС). Наглядные примеры эволюции некоторых ЭРЭС в контексте уровней их проектирования приведены на рисунке 1.9.

По степени сложности задачи проектирования ЭРЭС условно подразделяют на простые (когда необходимо привлечь меньше десяти инженеров), средней сложности и очень сложные (нужны большие коллективы из тысяч инженеров разных направлений и профилей подготовки, специальностей и специализаций).



Частичная модернизация существующих ЭРЭС за счет изменения его структуры и конструкции, обеспечивающая сравнительно небольшое (до нескольких десятков процентов) улучшение одного или нескольких показателей качества для решения тех же или новых задач



Существенная модернизация ЭРЭС, предполагающая значительное (в несколько раз) улучшение показателей качества



Создание новых ЭРЭС, основанных на ранее не применявшихся принципах действия, для резкого (на несколько порядков, в десятки раз) увеличения показателей качества при решении тех же или существенно новых задач

Рисунок 1.9 – Демонстрация уровней проектирования ЭРЭС



Основные этапы проектирования включают: выбор и обоснование цели проектирования ЭРЭС и исходных данных (техническое задание, техническое предложение); определение принципов построения системы (эскизный проект); аппаратный синтез – проектирование схем, конструкций, технологических процессов (технический проект, разработка КД опытных образцов, установочная партия, серийное производство).

Для упрощения процессов коммуникации между специалистами на разных этапах создания и использования технических систем используется единая система конструкторской документации (ЕСКД) – комплекс государственных стандартов, который определяет единый состав, правила разработки, оформления и обращения КД.

По характеру выполняемых работ проектирование ЭРЭС часто подразделяют на системотехническое (первые этапы), схемотехническое, конструкторское и технологическое. Эти этапы тесно взаимосвязаны и переплетены. При проектировании микро-, наноэлектронных приборов и приборов СВЧ их разделение почти невозможно.

По методам проектирования ЭРЭС различают проектирование алгоритмическое и эвристическое, математическое и экспериментальное. Однако наиболее полное решение задач проектирования ЭРЭС возможно только на основании системного подхода.

Степень сложности современных ЭРЭС приближается к границе, за которой эффективность труда человека-проектировщика резко падает. В связи с этим при использовании традиционных методов проектирования время, необходимое для разработки КД и подготовки производства сложных ЭРЭС, становится соизмеримым со временем их морального старения. Поэтому для ускорения процесса проектирования применяется его автоматизация, достигаемая с помощью формализации работы проектировщика и использования возможностей современной компьютерной техники и САПР.

**Системный подход** – метод проектирования на основе всестороннего рассмотрения технической системы с учетом её развития и взаимодействия с эксплуатантом и окружающей средой.

Согласно принципам системного подхода любая исследуемая система должна рассматриваться как совокупность взаимосвязанных элементов и подсистем, но описание её элементов не должно носить самодовлеющего характера, а должно вытекать из задач системы и задач её исследования. При этом она должна рассматриваться, с одной стороны, как подсистема в системе более высокого уровня (надсистема), а с другой стороны, как совокупность образующих её подсистем [26].

Системный подход заключается в том, что сложный объект (система) определяется не только совокупностью его основных элементов, но и характером связей и отношений между ними, что отличает данный подход от более мелких – комплексного или функционального подхода.

В основе системного подхода к проектированию ЭРЭС лежат:

– учет всех этапов жизни системы (проектирования, производства, эксплуатации, утилизации);

- учет истории, особенно перспектив развития систем того же класса и ближайших классов;

- учет взаимодействия системы с внешней средой (с другими системами данного иерархического уровня, учет обмена информацией, энергией, веществом, сигналами, помехами, влияния температуры, влажности, давления, механических нагрузок, радиации и т.д.);

- учет развития элементной базы;

- выделение главного показателя качества.

Стремление улучшить наибольшее число показателей качества может привести к потере оптимального решения. В большинстве прикладных задач к главным вопросам проектирования относятся: определение показателей помехоустойчивости, надежности, точности, пропускной способности, массогабаритных характеристик, стоимости; выяснение основных технических противоречий, препятствующих повышению качества системы, и нахождение способов их преодоления; объединение различных методов проектирования – алгоритмических и эвристических, математических и экспериментальных.

**Аспектами (составляющими) системного подхода** являются:

- целевой – анализ целей и задач, решаемых системой и её подсистемами;

- элементный – анализ компонентного состава системы, качественных и количественных характеристик компонентов;

- структурный – анализ архитектоники системы, т.е. способов связи, и организация взаимодействия элементов;

- функциональный – анализ процессов, происходящих в системе и определяющих её поведение;

- коммуникативный – анализ связей и взаимодействия системы со средой;

- управленческий (интегративный) – анализ управления как основного системообразующего фактора;

- информационный – анализ процессов информационного обмена в системе.

**Основные задачи системного подхода:**

- разработка содержательных и формализованных средств представления объекта как системы;

- всестороннее исследование элементов системы, взаимодействий и связей между ними по всем аспектам системного подхода;

- построение обобщённых моделей системы и её свойств, включая модели их динамики и целенаправленного поведения, развития и процессов управления ими.

Для реализации в ходе исследований требований системного подхода рекомендуется:

- связывать частные научные задачи с общей целью исследования;

- рассматривать явления или процессы в их структурной сложности (множестве составляющих элементов и их иерархичности), группируя элементы системы по назначению и относительной самостоятельности функций, образуя подсистемы;

- выделять наиболее важные и приоритетные элементы или процессы;

- рассматривать взаимосвязь и взаимозависимость элементов внутренней и внешней среды объекта исследования;
- изучать элементы явлений или процессов с учётом их ретроспективы (как возникли, как развивались, к чему пришли);
- выделять элементы нижестоящего уровня, которые могут оказать влияние на всю систему, но при этом сосредоточивать внимание на главном, не углубляясь в детали.

**Методология** в самом общем смысле представляет собой учение об организации деятельности.

Под **методологией проектирования** будем понимать учение о структуре, логической организации, методах и средствах поиска и принятия решений о принципе действия и составе еще не существующего технического объекта (технической системы), наилучшим образом удовлетворяющего определенные потребности, а также составление описания, необходимого для его создания в заданных условиях [14].

В контексте настоящего учебного пособия методологией будем называть учение о способах и средствах организации деятельности по проектированию ТС, работа которых основана на физических принципах электроники и/или радиотехники.

Проектирование систем отличается от улучшения систем исходными посылками и используемыми методами (таблица 1.6) [27].

Таблица 1.6 – Сравнение двух методологий изменений: улучшения систем и проектирования систем

Сравнительная характеристика	Улучшение систем	Проектирование систем
Условия работы системы	Проект принят	Проект под вопросом
Объекты исследования	Субстанция Содержание Причины	Структура и процесс Метод Цель и функция
Парадигма	Анализ системы и подсистем (аналитический метод или научная парадигма)	Проектирование системы в целом (системный подход или системная парадигма)
Метод рассуждений	Дедукция и редукция	Индукция и синтез
Результат	Улучшение существующей системы	Оптимизация системы в целом
Методика	Определение причин отклонений реальной работы системы от запланированной (прямые издержки)	Определение различий между реальным и оптимальным проектом (вменённые издержки)
Основной акцент	Объяснение прежних отклонений	Прогнозирование будущих результатов
Подход	Интроспективный: от системы внутрь	Экстропспективный: от системы наружу
Роль планировщика	Ведомый: следует существующим тенденциям	Лидер: оказывает влияние на тенденции

При улучшении систем возникающие вопросы связаны с обеспечением нормальной работы уже существующих систем. В то же время системный подход является в своей основе методологией проектирования систем. Поэтому при его использовании ставится под сомнение сам характер данной системы и её роль в рамках более широкой системы. И первый вопрос, который возникает при системном подходе, – это цель существования системы. При этом необходимо установить отношения между данной системой и всеми другими системами, в которые она входит или с которыми она связана.

### 1.1.6 Законы развития технических систем

Успешная творческая деятельность инженера невозможна без знания основных закономерностей развития техники. Скорость этого развития становится все больше за счет накопления знаний и опыта, приобретенных предшествующими поколениями людей [28].

Качественный уровень техники определяется степенью познания законов природы. Поэтому электрический двигатель или трансформатор, изготовленные на российском или американском заводе, в принципе, не отличаются друг от друга. Однако на темпы и направления развития техники заметное влияние оказывают общественные экономические структуры.

Одной из важнейших закономерностей развития техники является историческая обусловленность важнейших открытий и изобретений, они, как правило, возможны только тогда, когда создаются объективные предпосылки, потребность общества в том или ином техническом объекте, с одной стороны, и возможность его создания, определяемая достижениями науки и техники, с другой стороны. Именно поэтому крупнейшие открытия и изобретения делались почти одновременно многими изобретателями и учёными в разных странах и независимо друг от друга.

Отсюда следует одна из важнейших закономерностей развития науки и техники – интернациональный характер выдающихся открытий и изобретений, который в свою очередь следует из объективных законов развития техники.

Если все важнейшие открытия и изобретения вызваны объективной необходимостью, то успешная деятельность выдающейся личности определяется тем, насколько овладела достижениями современной науки и техники, насколько она умеет видеть ростки нового и правильно оценивать старое. Но для этого необходимо знать историю важнейших открытий и изобретений. Только на конкретных примерах зарождения, развития и совершенствования каких-либо ТС можно познать диалектику научно-технического прогресса.

---

*К примеру, поразительными были попытки Николы Теслы создать «летающий аппарат, управляемый по радио... на расстоянии тысячи*

*милль»<sup>6</sup> (1900). Управляемые по радио корабли им уже были созданы. Но Тесла мечтал создать «автомат, обладавший каким-либо элементом, аналогичным человеческому мозгу», который бы осуществлял действие, как будто «имел знания, рассудок, суждения и опыт». Он даже демонстрировал свой аппарат в лаборатории, который «...вызвал сенсационные отклики. Но истинное значение этой новой техники было не понято большинством и не оценено громадное значение его основного принципа». Это было поистине фантастическое изобретение, и понадобилось целое столетие, чтобы появились самонастраивающиеся, самообучающиеся быстродействующие интегральные логические микросхемы, электронные автоматы с памятью, микропроцессоры, осуществляющие мгновенную обработку и передачу информации, суперкомпьютеры, способные выполнять триллионы операций в секунду.*

---

Если мы сравним телефон тридцатилетней давности с современными мобильными телефонами, то приходим к выводу, что последние – это уже не просто телефоны, так как в них сегодня в среднем объединяются функции более тридцати других разнородных технических средств: телефона, фотоаппарата, радио, видеокамеры, телевизора, компьютера, будильника, электронной книги, часов, таймера, секундомера, фонарика, проектора, музыкального плеера, диктофона, интернет-маршрутизатора или роутера, электронного блокнота, электронного планировщика событий, ежедневника, игровой приставки, зарядного устройства или аккумулятора и т.д., и т.п. В свою очередь принтер объединился со сканером и ксероксом в многофункциональное устройство (МФУ) [29]. Измеритель пульса, шагомер, аудиоплеер и смартфон объединились с наручными часами и превратились в smart watch и т.д.

Все шире во всех областях человеческой деятельности используются лазерные инструменты вместо инструментов механических: лазерные скальпели, лазерные измерительные инструменты, лазерные принтеры, лазерные 3D-сканеры, лазерные прицелы, лазерные указки и т.д. Механические кнопки в сотовых телефонах заменяются на сенсорные. Механические компьютерные мыши практически исчезли, остались только оптические, причем все чаще используются беспроводные. Странно, что в системных блоках компьютеров все еще используются механические вентиляторы для охлаждения и винчестеры с вращающимися дисками. Но уже наметилась тенденция и к их устранению. Вероятно, должны получить широкое распространение клавиатуры без механических клавиш, компьютерные мышки без механических кнопок. Уже созданы работающие виртуальные клавиатуры, в которых вообще нет никаких деталей. С помощью небольшого проектора изображение клавиш проецируется на поверхность стола.

Характеристики многих ТС, таких как компьютер, изменяются с огромной скоростью. Это происходит благодаря сокращению времени разработки, эксплуатационного периода ТС и повышению требований к свойствам систем. Значительно

---

<sup>6</sup> Пророчество, сбывшееся спустя почти 100 лет и относящееся к современным радиоуправляемым беспилотным летательным аппаратам (БПЛА).

медленнее развивается автомобильный транспорт, авиация. В то же время существуют ТС, которые остаются неизменными в течение многих десятков и сотен лет. Практически не совершенствуются многие простые объекты, такие как нож, вилка, ложка, стакан, пила, молоток и так далее.

Почему так различаются темпы развития различных технических систем? Почему в нашей жизни появляются именно такие технические средства? Можно ли предсказать их появление? Где пределы развития ЭРЭС? Сейчас важно понимать процессы, происходящие в мире техники, а также роль человека в этих процессах. Насколько закономерно развитие техники, в какой степени личность изобретателя может повлиять на ход развития (рисунок 1.10)? Прежде всего ответы на эти вопросы необходимы инженерам, занимающимся созданием новых технических объектов и систем.

Строение и развитие каждого ТО и техники в целом подчиняются определённым законам и закономерностям, которые указывают на устойчивые качественные и количественные причинно-следственные связи и отношения, имеющие место у класса ТО и техники в целом, а также на изменение во времени этих связей и отношений. Законы и закономерности по характеру и определенности описания объектов и явлений техники близки к законам и закономерностям, известным в биологии, физике и химии, таким образом, можно утверждать, что законы техники формулируются на уровне законов природы [15].

Закономерности строения и развития техники имеют отношение к ТО с одинаковой или близкими функциями, тогда как законы техники имеют отношение к любому ТО или ко многим классам ТО с различными (сильно отличающимися) функциями.

К законам и закономерностям строения ТО будем относить устойчивые признаки в конструктивной и потоковой функциональной структуре, в физической структуре (ФПД) и технических решениях, которые существуют и остаются неизменными на протяжении многих поколений в историческом развитии ТО.

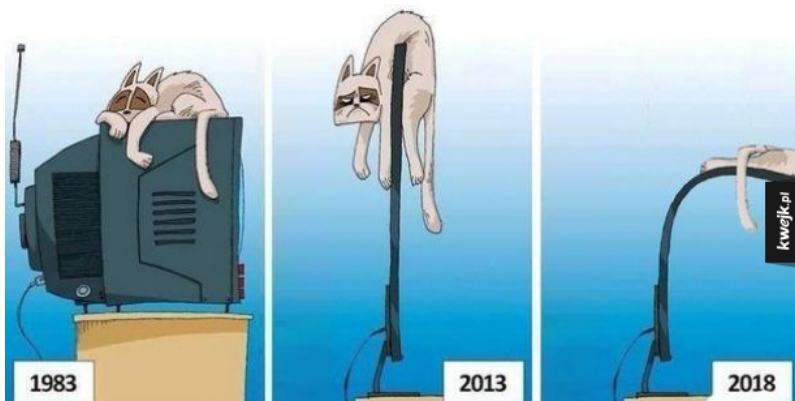
К законам и закономерностям развития техники будем относить определенные устойчивые изменения какого-либо критерия развития (показателя качества) или какого-либо количественно выражаемого конструктивного признака на протяжении многих поколений ТО. Кроме того, должны иметь место законы развития, которые для многих классов ТО с различными функциями отражают одинаковые (аналогичные) изменения в конструктивной и потоковой функциональной структурах, в физической структуре и техническом решении.

С точки зрения уровней иерархии ЭРЭС их развитие определяется двумя путями:

- а) совершенствованием электронной компонентной базы и появлением новых элементов принципиальных схем – восходящий путь развития;
- б) открытием новых фундаментальных правил и законов обработки процессов (сигналов, шумов, их смесей и других процессов) – нисходящий путь развития.



*a*



*б*

Рисунок 1.10 – Генеалогические линии развития ЭРЭС:  
*a* – эволюция мобильных телефонов; *б* – эволюция телевизоров

Эволюция ТС по восходящему пути развития происходит следующим образом.

1. В области электроники, радиоэлектроники или радиотехники открывается новый физический эффект (ФЭ) или явление (ФЯ) или привлекаются известные ФЭ (ФЯ) из других отраслей науки и техники.

2. Эти ФЭ или ФЯ физически воплощаются в отдельных представителях ЭКБ.

3. На основе нового элемента строится новый функциональный узел.

4. Появление нового функционального узла приводит к появлению новых структур ЭРЭС.

Эволюция ТС по нисходящему пути развития происходит следующим образом.

1. Для решения прикладных задач открывается новый математический способ преобразования процессов.

2. Математическая формула воплощается в функциональной структуре радиотехнической системы. При этом можно сказать, что формульные переменные в функциональной структуре представляют собой процессы, а операции над переменными – функциональные узлы.

Также необходимо отметить, что эволюцию программно-насыщенных ЭРЭС определяет и развитие их программного обеспечения.

В настоящее время идет процесс разработки и внедрения в производство пятого поколения электронной аппаратуры, который знаменуется бурным развитием твердотельной микроэлектроники – интегральной и функциональной электроники. Основопологающей идеей современной микроэлектроники является миниатюризация активных и пассивных элементов ИМС и их технологическая интеграция. При реализации этой идеи возникают серьезные физические и технологические трудности и проблемы, в частности чрезмерное увеличение интеграции и уменьшение геометрических размеров элементов ИС приводит к существенному усложнению технологии, резкому повышению брака в производстве и снижению надежности в эксплуатации. Значительный прорыв в этом направлении намечается в связи с последними достижениями в области наноэлектроники, однако в ближайшие годы массовое производство микроэлектронных изделий будет базироваться на традиционной кремниевой технологии с ее огромными трудностями и проблемами [30].

Тем не менее уже в настоящее время многие функции, например селекция, фильтрация, задержка сигналов, запоминание и отображение информации и другие, могут быть реализованы проще, с высоким качеством и надежностью благодаря устройствам функциональной электроники (УФЭ). С применением УФЭ решается также проблема микроминиатюризации. Функциональная электроника как второе перспективное направление твердотельной электроники успешно развивается параллельно с традиционной микроэлектроникой. Существует столь большое разнообразие физических явлений и динамических неоднородностей в твердых телах, что практически любая функция преобразования информации может моделироваться физическими процессами, протекающими в твердом теле при воздействии электрического или магнитного поля, внешнего излучения, температуры, механических деформаций и т.д.



Таким образом, проблемы повышения качества, надежности и функциональных возможностей электронной аппаратуры, а также микроминиатюризации могут и должны решаться путем комплексного применения устройств интегральной и функциональной электроники.

Следует особо отметить основные направления развития твердотельной электроники: направление интегральной электроники (микроэлектроники) и направление функциональной электроники. Оба направления развиваются параллельно, взаимно дополняя и обогащая друг друга.

Микроэлектроника основана на схемной радиотехнике с использованием статических неоднородностей (потенциальных барьеров) и технологической интеграции. Начало развития микроэлектроники положено американскими учеными Д. Бардиным, У. Браттейном, В. Шокли, Р. Нойсом и Д. Килби в конце сороковых – начале пятидесятых годов XX века. Развитие современной микроэлектроники на основе комплекса конструкторских, технологических и схемотехнических методов достигло на своем традиционном пути интегральной электроники настолько высокого уровня технологической интеграции, что дальнейшее ее повышение встречает ряд принципиальных физических и технологических ограничений. К технологическим ограничениям следует отнести существенное снижение процента выхода годных приборных структур; значительное увеличение площади монокристалла, занимаемой межсоединениями; повышение стоимости процессов и оборудования. Уменьшение топологических размеров приводит к физическим ограничениям: возрастает удельная рассеиваемая мощность, увеличивается падение напряжения на межсоединениях малого сечения, возникает проблема пробивных напряжений, усиливается влияние электропереноса, возрастает роль эффектов туннелирования и просачивания электронов. Все эти ограничения приводят в конечном итоге к уменьшению надежности электронных микроминиатюрных систем [30].

Функциональная электроника получила развитие значительно позже микроэлектроники и практически является ее логическим продолжением. Функциональная электроника основана на принципах физического моделирования и физической интеграции динамических неоднородностей, возникающих в твердом теле в процессе эксплуатации электронной системы. В отличие от интегральной электроники она свободна от указанных выше недостатков.

Основные направления развития функциональной электроники представлены на рисунке 1.11 [30].

В последние десятилетия наиболее активно развиваются оптоэлектронные, акустоэлектронные, диэлектрические и магнитоэлектронные функциональные устройства. На их основе разработаны устройства селекции и временной задержки сигналов, запоминающие устройства, устройства отображения информации, формирователи видеосигналов, функциональные генераторы и другие устройства. Обнадеживающие результаты получены в области квантовой электроники, криоэлектроники и биоэлектроники. Дальнейший прогресс в создании сложных систем приема, передачи и обработки больших массивов информации, устройств пространственно-

временной обработки сигналов, фильтров фазовой и частотной модуляции радиосигналов, генераторов сигналов и других сложных функциональных устройств в значительной степени будет обусловлен развитием и внедрением устройств функциональной электроники.



Рисунок 1.11 – Схема развития функциональной электроники

Научным фундаментом функциональной электроники является физика твердого тела. Физические процессы и взаимодействие в твердом теле моделируют разнообразные функции передачи информации. Функциональную электронику как логическое прикладное развитие физики твердого тела питают и обогащают закономерности магнитных и оптических явлений, акустооптических и акустоэлектрических

взаимодействий, фазовых переходов, сверхпроводимости и других процессов, протекающих в твердых телах. Принцип технологической интеграции дискретных базовых радиокомпонентов (резисторов, конденсаторов, диодов, транзисторов и т.д.) обеспечил триумф интегральной электроники – микроэлектроники, однако он же привел к ограничению пределов интеграции микросхем. Дальнейшее развитие твердотельной электроники параллельно с микроэлектроникой, переходящей в нанoeлектронику, идет в направлении функциональной электроники, основанной на физической интеграции различных процессов и явлений в твердом теле [30].

На рисунке 1.12 показаны примеры линий эволюции некоторых ЭРЭС [31].

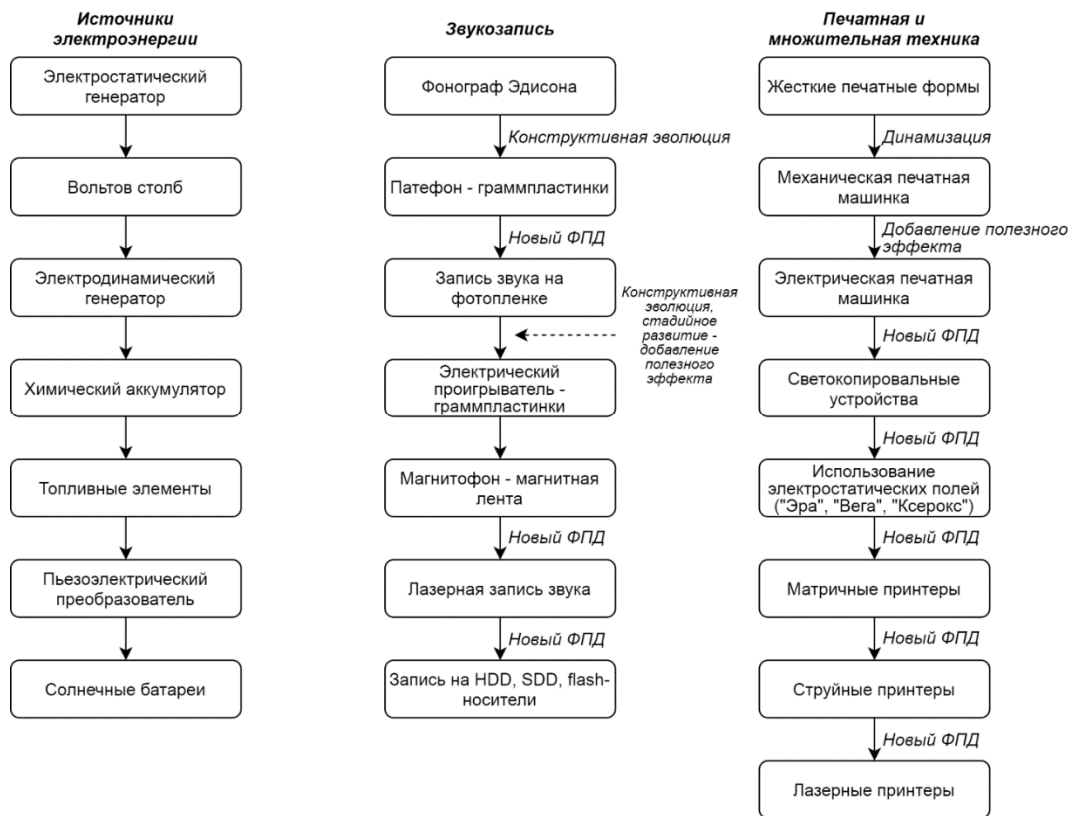


Рисунок 1.12 – Линии эволюции некоторых ЭРЭС

Техника развивается в тесном взаимодействии с общественным развитием и эко-сферой, вследствие чего наблюдается значительное взаимопроникновение и взаимовлияние законов развития общества, природы и техники. Развитие последней во многом зависит от потребностей общества и влияет на состояние природы [32].

В общем виде система законов техники имеет уровни потребностей, функций и систем (таблица 1.6).

Эволюция потребностей определяется законами непрерывного возрастания потребностей людей и законом лениности (минимизации усилий).

Таблица 1.6 – Законы развития систем

Уровни законов	Законы развития систем
Потребностей	Законы развития (эволюции) потребностей
Функций	Законы изменения функций
Систем	Законы развития систем

Закон непрерывного возрастания потребностей людей и неугасимого любопытства выражается в том, что после удовлетворения очередной потребности у каждого человека появляется новое желание, причем получить не только больше, но и лучше. Желание не даёт довольствоваться уже достигнутым и заставляет совершенствовать окружающие нас объекты и, как следствие, совершенствоваться нам самим (больше трудиться, обучаться чему-то новому, размышлять). Стоит отметить, что тенденция развития потребностей указывает на переход от удовлетворения физиологических потребностей к удовлетворению эмоционально-психологических, которым и следует уделять больше внимания при создании объектов с высокими потребительскими свойствами.

Закон действует в условиях, когда физические и иные возможности человека (но не интеллектуальные) ограничены, и чем сложнее обстоятельства, тем эффективнее результат.

Закон лени (минимизации усилий) обусловлен тем, что человек всегда стремился к минимизации усилий на обслуживание своих потребностей (физических усилий, работы органов чувств, мыслительной деятельности и т.д.). Эта своеобразная «лень» так стимулирует человека, что заставляет его напрягать все свои усилия и, прежде всего интеллектуальные, для создания устройств, облегчающих, а в идеале и исключаящих его собственный труд. Поэтому, как только у человека возникает какая-либо потребность, он ищет пути её удовлетворения наиболее простым способом, а связанные с этой потребностью устройства совершенствуются до их полной автоматизации либо максимально простого обслуживания (обычно в соответствии с законом стадийного развития).

Закономерности развития функций связаны с закономерностями развития потребностей, но имеют свою специфику. Например, переход систем к многофункциональности (универсальности) или, наоборот, к однофункциональности (специализации).

Законы развития ТС можно разделить на две группы (рисунок 1.13): законы организации систем, определяющие их жизнеспособность, и законы эволюции систем, определяющие развитие ТС.

Проектирование как деятельность, направленная на создание реальных предметов, основывается на объективных законах природы. И качество создаваемых объектов зависит от степени познания и следования этим законам. С другой стороны, участие в проектировании человека вызывает потребность в знании законов наук, изучающих мышление человека, принципы его деятельности.



Рисунок 1.13 – Законы развития систем

С давних времен обращали внимание на непредсказуемость и индивидуальность результатов творческого труда, возможность появления как выдающихся изделий, так и явно неудачных. Это есть следствие неспособности человека охватить решаемую задачу целиком, во всех её подробностях, учесть все параметры, внутренние и внешние связи. Велика роль и субъективных факторов, таких как личный опыт, знания, настроение, особенности характера [16].

По этим причинам всегда представлял большой интерес поиск закономерностей, которые управляют процессом проектирования, и стремление максимально формализовать его (однако познание алгоритмов творческого труда превратит деятельность человека в нетворческую, что обеднит его как личность или, что опаснее, приведет к интеллектуальной деградации). В работах Г.С. Альтшуллера и А.И. Половинкина приведены результаты исследований и поисков в этом направлении.

В настоящее время известен 21 закон развития ТС [7, 15, 24, 29, 33, 34].

Представим основные из этих законов.

1. Закон энергетической проводимости. Необходимым условием принципиальной жизнеспособности ТС является сквозной проход энергии и информации по всем её частям. Из этого закона следует утверждение: чтобы часть ТС была управляемой, необходимо обеспечить энергетическую проводимость между этой частью и органами управления.

2. Закон увеличения степени идеальности ТС. Развитие ТС идет в направлении увеличения степени её идеальности. В теории решения изобретательских задач (ТРИЗ) этот закон выражается в формулировке идеального конечного результата (ИКР), когда ТС отсутствует, а её функция выполняется. Другими словами, идеальной ТС называется такая система, у которой массогабаритные и энергетические характеристики равны нулю (т.е. система не существует), а её функция выполняется.

3. Закон стадийного развития ТС. Совершенствование ТС идет в направлении их полной автоматизации и независимости от человека. Применительно к ЭРЭС их развитие одновременно с уменьшением энергопотребления и увеличением энергетической эффективности включает рост энергонезависимости, энергоавтономности, когда ЭРЭС начинают аккумулировать электрическую энергию из окружающей среды. Кроме того, в ЭРЭС вводятся функции автоматического управления, т.е. изменения режимов работы, и саморегулирования в пределах, заданных программой; дополнительное выполнение функций планирования, т.е. саморегулирования в непредвиденных условиях, анализа ситуации и выбора режима работы. В настоящее время, когда

начинается четвертая промышленная революция, этот закон приобретает массовый характер, когда практически все ТС, функционирующие на принципах электроники и радиоэлектроники, становятся «умными».

4. Закон корреляции параметров однородного ряда ТО. К однородному ряду относятся такие ТО, которые имеют одинаковую функцию, структуру, условия работы (в смысле взаимодействия с окружающей средой) и отличаются только значениями главного параметра. Главным в ТО называют такой параметр, который характеризует его главный функциональный элемент и от которого зависят значения остальных параметров.

5. Закон гомологических рядов: гипотеза о законе гомологических рядов в технике была сформулирована по аналогии с законом гомологических рядов И.И. Вавилова, относящихся к живой природе. Суть биологического закона заключается в том, что у близких видов, принадлежащих одному роду, имеет место удивительный параллелизм одинаковых признаков. Вавилов дал следующую формулировку закона: «Виды и роды, генетически близкие, характеризуются сходными рядами наследственной изменчивости с такой правильностью, что, зная ряд форм в пределах одного вида, можно предвидеть нахождение параллельных форм и для других видов и родов. Чем ближе генетически расположены в общей системе роды и виды, тем полнее сходство в рядах их изменчивости. Целые семейства характеризуются определённым циклом изменчивости, проходящей через все роды и виды, составляющие семейство».

Для перенесения закона гомологических рядов в технику необходимо было определить факторы, которые играют роль генотипа, т.е. как генотип в живой природе определяет видовые, родовые и другие признаки, так и в технике необходимо выделить факторы, обуславливающие характерные признаки ТО. К таким факторам относятся компоненты описания функции, принципа действия и условий работы технического объекта, каждая из которых оказывает существенное влияние на техническое решение (структуру) ТО.

Гипотеза о законе гомологических рядов ТО имеет следующую формулировку: ТО с близкими функциями, принципами действия и характеристиками условий работы имеют частично совпадающие наборы варьируемых конструктивных признаков  $P_1, \dots, P_k$ , принимающих одинаковые значения  $a_1, a_2, \dots, a_j$ , где  $j=1, \dots, k$ .

Число совпадающих наборов признаков  $k$  будет тем больше, чем больше совпадающих компонентов описания функций, принципов действия и условий работы. При этом имеют место корреляционные связи между определенными компонентами и признаками.

6. Закон расширения множества потребностей-функций. Этот закон имеет отношение к развитию техники в целом, а не к отдельной фирме, отрасли или стране. Уже давно известен закон возвышения потребностей, который сформулирован на качественном уровне. Предлагаемая формулировка закона основывается на предшествующих работах и относится только к потребностям, реализуемым с помощью ТО.

При наличии необходимого потенциала и социально-экономической целесообразности возникшая новая потребность удовлетворяется с помощью впервые созданных технических средств (технических объектов); при этом возникает новая функция, которая затем существует как угодно долго, пока её реализация будет обеспечивать сохранение и улучшение жизни людей. Число таких качественно и количественно различающихся потребностей-функций, относящихся к техносфере, со временем монотонно и ускоренно возрастает по экспоненциальному закону

$$P_i = P_0 e^{at},$$

где  $P_0$  – число потребностей-функций до момента  $t = 0$ ;  $a$  – эмпирический коэффициент;  $t$  – время в годах.

Важной величиной, которая также сильно изменяется со временем, является эволюция спроса на техническую систему. Для простоты анализа будем полагать, что производство технической системы всегда соответствует спросу на неё. Упрощенная сглаженная кривая увеличения и уменьшения спроса с течением времени показана на рисунке 1.14.

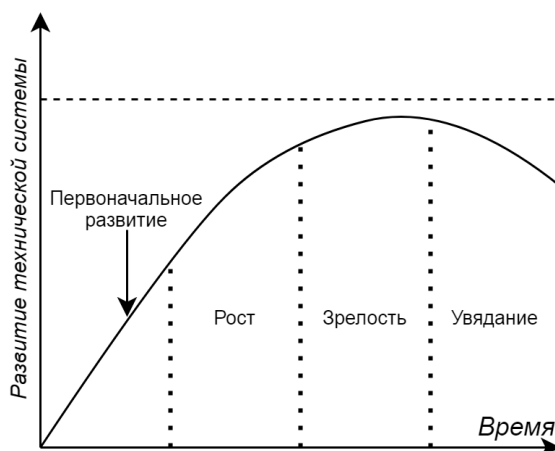


Рисунок 1.14 – Кривая развития технической системы

Спрос на ТС, даже после разработки новых более эффективных систем, не всегда падает до нуля, о чем свидетельствует ниспадающий участок кривой (увядание) на рисунке 1.14. Морально устаревшее оборудование будет использоваться некоторое время и в дальнейшем, хотя в сокращающемся масштабе.

7. Закон прогрессивной эволюции техники. Действие закона прогрессивной эволюции в мире техники аналогично действию закона естественного отбора Ч. Дарвина в живой природе. Он объясняет, почему происходит переход от предшествующего поколения ТО к следующему улучшенному поколению; при каких условиях, когда и какие структурные изменения происходят при переходе от поколения к поколению. Закон прогрессивной эволюции техники имеет следующую формулировку. В техническом объекте с одинаковой функцией переход от поколения к поколению вызван устранением выявленного главного дефекта (дефектов), связанного, как правило,

с улучшением критериев развития, и происходит при наличии необходимого научно-технического уровня и социально-экономической целесообразности следующими наиболее вероятными путями иерархического исчерпания возможностей конструкции:

а) при неизменном физическом принципе действия и техническом решении улучшаются параметры ТО до приближения к глобальному экстремуму по значениям параметров;

б) после исчерпания возможностей цикла (а) происходит переход к более рациональному техническому решению (структуре) (б), после чего развитие опять идёт по циклу (а). Циклы (а) и (б) повторяются до приближения к глобальному экстремуму по структуре для данного принципа действия. При этом значения критериев развития  $K$ , как правило, изменяются в соответствии с функцией вида

$$K = \frac{L}{a + e^{be^{-\beta t}}}.$$

где  $L$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $\beta$  – коэффициенты, определяемые по статистическим данным;  $t$  – время. График функции  $K$ , называемой  $S$ -функцией, показан на рисунке 1.15;

в) после исчерпания возможностей циклов (а) и (б) происходит переход к более рациональному физическому принципу действия (в), после чего развитие опять идёт по циклам (а) и (б). Циклы (а)–(в) повторяются до приближения к глобальному экстремуму по принципу действия для множества известных физических эффектов.

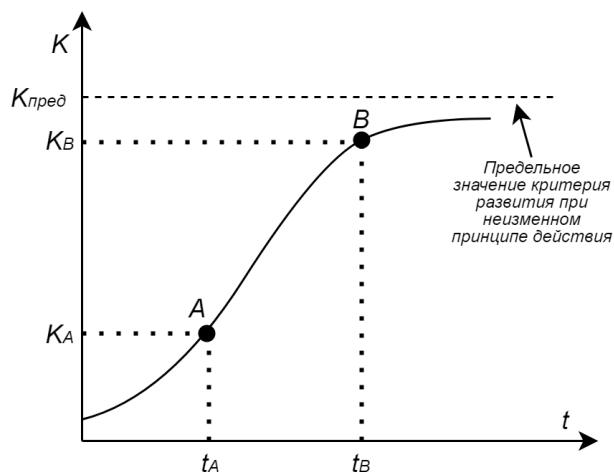


Рисунок 1.15 – Кривая  $S$ -функции

При этом в каждом случае перехода от поколения к поколению в соответствии с частными закономерностями происходят изменения конструкции, корреляционно связанные с характером дефекта у предшествующего поколения, а из всех возможных изменений конструкции реализуется в первую очередь то, которое дает необходимое или существенное устранение дефекта при минимальных интеллектуальных и производственных затратах.



Используемое в формулировке закона понятие «научно-технический уровень» имеет отношение к стране или региону и определенному моменту времени. Понятие включает используемые ТО, технологии, источники энергии, материалы и вещества, информацию об используемых в прошлые времена, а также о новых (пока не реализованных) ТО, технологиях, источниках энергии, материалах и веществах; информацию о физико-технических эффектах, которые используются или могут быть использованы в технике, и т.п.

Социально-экономическая целесообразность создания и использования технических объектов указывает на то, что их изготовление и практическое использование, во-первых, экономически возможно и выгодно, во-вторых, не ухудшает антропологических критериев развития техники.

Таким образом, суть закона состоит в том, что в ТО с одинаковой функцией каждый переход от поколения к поколению вызван устранением возникшего главного дефекта (дефектов), связанного с улучшением какого-либо критерия (показателя) развития при наличии определённых технико-экономических условий. Если же рассматривать все переходы от поколения к поколению, т.е. всю историю конструктивной эволюции определенного класса техники, то можно наблюдать закономерности иерархического исчерпания возможностей конструкторско-технологических решений на трёх уровнях (рисунок 1.16).

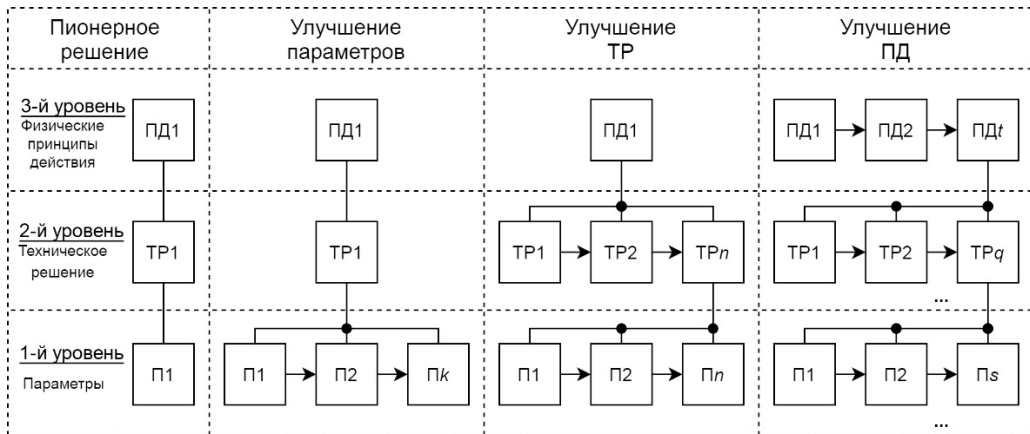


Рисунок 1.16 – Иерархическое исчерпание возможностей конструкторско-технологических решений

Сначала на 1-м уровне улучшаются параметры используемого технического решения (ТР). Когда изменение параметров мало что даёт, изменения осуществляют на 2-м уровне путём перехода к более эффективному техническому решению без изменения физического принципа действия (ПД). При исчерпании параметров переходят на новое, более прогрессивное ТР. Циклы на 1-м и 2-м уровнях происходят до тех пор, пока в рамках используемого ПД уже не находят новых ТР, обеспечивающих улучшение интересующих показателей. После этого наступает революционное

изменение на 3-м уровне – переход на новый, более прогрессивный принцип действия и т.д. В каждом случае перехода от поколения к поколению действуют весьма определённые частные закономерности изменения конструкций, которые с большой вероятностью конкретизируют направление и характер изменения ТО в следующем поколении.

Как показывает история развития техники, любое открытие в науке и технике только через некоторое время начинает использоваться для выполнения полезной функции [31]. Сначала открывается физический эффект, который тщательно исследуется, разрабатывается технология изготовления опытных образцов. Проводятся научные исследования, практическая отдача которых пока минимальная. Затем на основе освоенного физического эффекта синтезируется ФПД устройства, которое может уже иметь прикладное значение. Спустя некоторое время на основе этого ФПД создаётся техническое устройство, способное качественно выполнять некоторую полезную функцию.

Для удовлетворения потребности ТО создается тогда, когда имеются научные и технические возможности обеспечить ему удовлетворительные потребительские свойства, которые зависят от его уровня качества (линия  $K_{11}$  на рисунке 1.17).

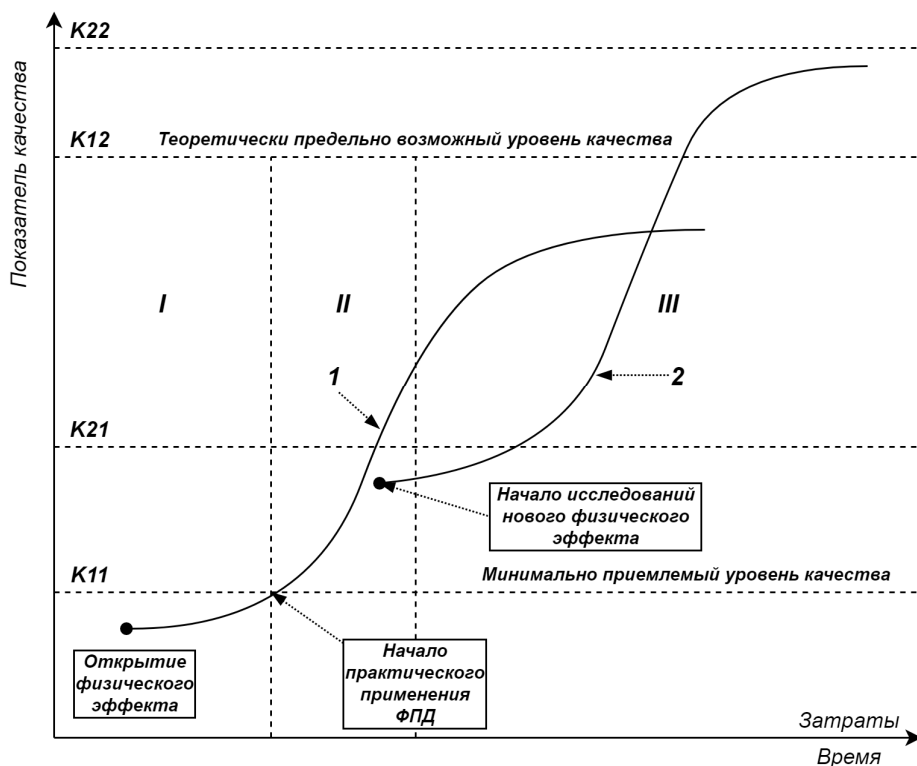


Рисунок 1.17 – Изменение показателя качества технического объекта при его конструктивной эволюции:

- I, II, III – участки развития;  $K_{11}$ ,  $K_{21}$  – минимально приемлемый уровень качества;
- $K_{12}$ ,  $K_{22}$  – теоретически предельно возможный уровень показателя качества;
- 1 – линия развития ТО; 2 – линия развития ТО с новым ФПД

Как правило, первый образец принципиально нового ТО создается в условиях неполного знания свойств, только что открытого явления. Поэтому технически сложно реализовать высокое качество выполняемой функции. С началом применения нового ТО ведутся работы по его совершенствованию, улучшению показателей качества, устранению недостатков и повышению эффективности использования. Создаются различные модификации ТО, расширяется область применения технических устройств, созданных на ФПД, в основе которых лежит открытый физический эффект.

Взаимосвязь затрат и показателя качества совершенствуемого ТО имеет вид S-образной кривой (см. рисунок 1.17). Начальный участок S-образной кривой (участок I на рисунке 1.17) соответствует этапу теоретического изучения и экспериментальной отладки полученного ФПД, исследованию возможностей его практического применения. На данном этапе осуществляется опытная эксплуатация единичных лабораторных образцов вновь созданного ТО. Этот период отличается напряжённой работой и большими затратами для увеличения показателей качества.

Улучшению характеристик ТО способствует рост общего научно-технического потенциала и развития технологии производства. По мере накопления теоретических знаний и практических результатов по производству и эксплуатации ТО рост показателей эффективности и качества ТО, основанных на новом ФПД, становится более интенсивным (участок II на рисунке 1.17). Устраняются недостатки, улучшаются функциональные показатели, повышается надежность, экономичность и другие показатели качества, растет отдача средств, вложенных в используемые технические устройства.

В этот период совершенствуется конструкция ТО и технологии его изготовления, производство часто становится массовым, резко увеличивается количество изобретений (а следовательно, и патентов) в той области техники, к которой относится применяемый ФПД. Этот ФПД находит все более широкое применение в различных областях. Разрабатывается гамма технических устройств. Развитие идёт в направлении как универсализации, так и специализации.

---

**Развитие радиоэлектроники.** С начала XX века в развитии ряда технических отраслей прослеживается тенденция освоения электромагнитных волн все более высокой частоты. В середине XX века в радиотехнике и радиоэлектронике начинает активно использоваться оптический диапазон (появляются оптоэлектронные приборы), а также инфракрасная область (разрабатываются тепловизоры, инфракрасная оптика).

В начале 60-х годов XX века появляются первые лазеры, а чуть позже создаются оптические волокна. В 1970 г. американская фирма «Корнинг» разработала кварцевое волокно с малым затуханием – порядка 20 дБ/км.

За 10 лет в кварцевых оптических волокнах удалось уменьшить потери примерно на два порядка. В начале XXI века производились оптические волокна с затуханием порядка 0,15 дБ/км. Во многом этому способствовало развитие технологии производства оптических волокон.

*Расширяется область применения этой техники. Сначала были разработаны уникальные лабораторные установки, затем – технологическое оборудование и, наконец, стали выпускаться товары народного потребления, например лазерные проигрыватели, считывающие и записывающие устройства.*

*С середины XX века прослеживается тенденция микроминиатюризации в радиоэлектронной аппаратуре. Ширина проводников уменьшается от нескольких миллиметров до нескольких микрометров. Увеличивается плотность компоновки, возрастает количество вентиляций на единицу объема. Ряд показателей микроминиатюризации радиоэлектронной аппаратуры удваивается каждые 2 года согласно закону Мура [31].*

---

Бурное развитие ТО, основанного на принятом ФПД, постепенно замедляется. Наступает время, когда ТО вступает в третью стадию своего развития (участок III кривой 1 на рисунке 1.17), которая характеризуется значительным увеличением затрат на повышение качества ТО. Эффективность средств, направленных на повышение качества ТО, снижается. Это связано с тем, что происходит исчерпание возможностей используемого ФПД. Совершенствование ТО осуществляется его усложнением, внесением конструктивных изменений, оптимизацией параметров, изменением конструкторско-технологических решений. Показатели качества приближаются к пределу, который может быть достигнут при использовании этого ФПД (линия  $K_{12}$  на рисунке 1.17).

Совершенствование ТО, основанного на этом ФПД, продолжается до тех пор, пока существует потребность в его производстве. Если нет условий перехода на новый принцип действия, то в процессе конструктивной эволюции рост эффективности замедляется и длительное время воспроизводятся ТО с близкими по значению показателями качества.

Однако, как правило, задолго до этого периода обнаруживается новый принцип действия, использование которого может в перспективе обеспечить более высокие показатели качества. Но его практическое применение начнется тогда, когда будет накоплен необходимый научно-технический потенциал и созданы социально-экономические условия (линия  $K_{21}$  и кривая 2 на рисунке 1.17). Сначала новый ТО по показателям качества отстает от предшественника, но он находится на начальном этапе развития и в соответствии с закономерностью, описываемой S-образной кривой, в конце концов быстро обгонит и вытеснит своего конкурента.

На рисунке 1.18 приведена история развития радиолампы. Из этого примера хорошо видно, что между открытием и его практическим применением может пройти весьма большой промежуток времени. В пределах одного ФПД наблюдается длительный процесс конструктивной эволюции, который сопровождается постоянным усложнением ТО. Когда этот принцип в случае с развитием радиолампы получил широкое распространение и был достигнут максимальный результат, он тут же начал вытесняться другим, более совершенным принципом – использованием полупроводниковых приборов для обработки электрических сигналов.

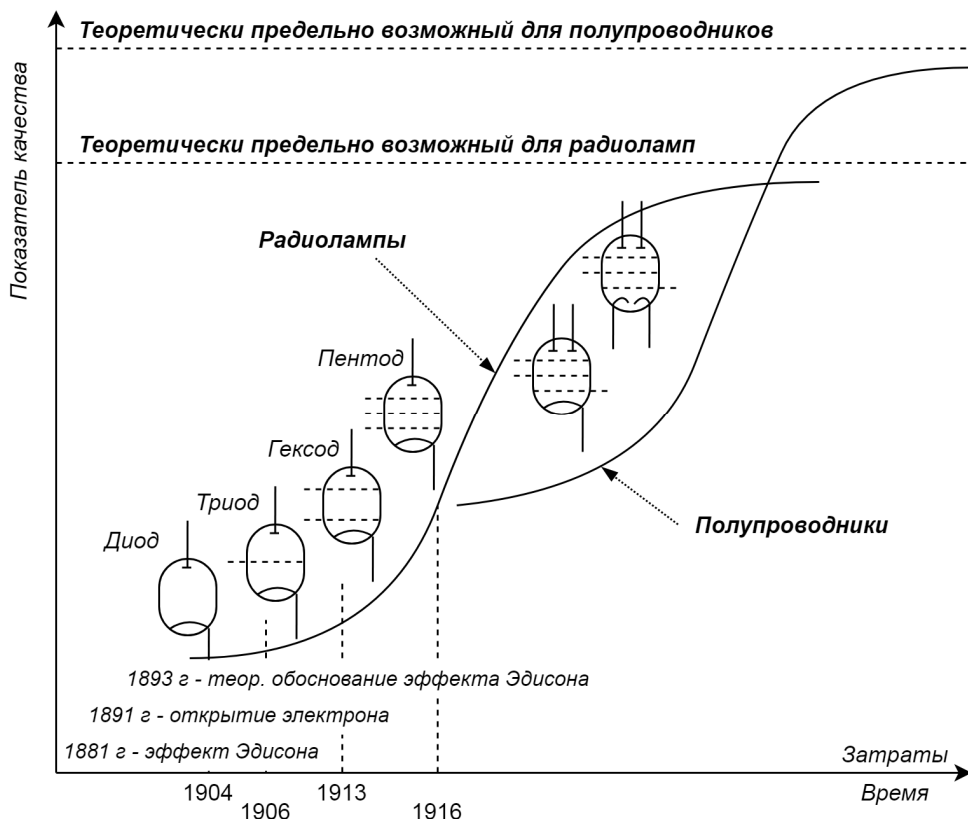


Рисунок 1.18 – Схема конструктивной эволюции радиолампы

История развития техники показывает, что ТО, основанный на определенном ФПД, отмирает в период своего наивысшего развития, т.е. когда в максимальной степени реализованы его показатели качества.

При создании новых ТО необходимо оценить:

- 1) на каком этапе конструктивной эволюции находится прототип;
- 2) каковы перспективы развития прототипа;
- 3) какие изменения в науке и технике произошли с начала его создания, причем не только в рассматриваемой области техники, но и в смежных областях.

Затем требуется исследовать различные аспекты проблемы:

1) какие достижения научно-технического прогресса не нашли своего отражения при создании существующих ТО, предназначенных для удовлетворения рассматриваемой потребности;

2) что можно использовать из последних достижений науки и техники для разработки нового принципа действия, конструктивных и конструкторско-технологических решений для создания нового ТО.

При решении задачи по совершенствованию существующих ТО необходимо:

- 1) оценить конкурентоспособность других ФПД;
- 2) установить, на каких этапах своего развития они находятся;

3) найти область эффективного применения рассматриваемого принципа действия;

4) оценить перспективность и целесообразность конструктивного совершенствования прототипа или прийти к выводу, что нужно использовать другой ФПД, и определить какой. В решении последней проблемы существенную помощь оказывают другие закономерности развития техники.

Следует иметь в виду, что в законе прогрессивной эволюции иерархическое исчерпание конструкции не действует формально: «Пока не будут достигнуты глобально оптимальные параметры, не может произойти переход к новому ТР, или пока не будут исчерпаны возможности наилучшего ТО (в рамках определенного ПД), не может произойти переход к новому принципу действия». Закономерность иерархического исчерпания конструкции действует при соблюдении следующего условия: если при наличии необходимого научно-технического потенциала переход к новому техническому решению или принципу действия обеспечивает получение дополнительной эффективности, существенно превышающей дополнительные интеллектуальные и производственные затраты на его реализацию, то может произойти скачок к новому техническому решению или принципу действия без исчерпания возможностей предыдущего технического решения или принципа действия.

Для некоторых классов ТО в будущем, по-видимому, станут более частыми случаи указанных скачков к новым техническим решениям или принципу действия без исчерпания возможностей предыдущих. Этому способствует создание мощных САПР, включающих подсистемы поискового конструирования с выбором глобально оптимальных решений. Согласно закону прогрессивной эволюции циклы  $(a)$ ;  $(a)-(b)$ ;  $(a)-(b)-(c)$  будут происходить в основном с использованием компьютерных технологий, а автоматизированные системы научных исследований и гибкие автоматизированные производства позволят без чрезмерных затрат производить доводку и изготовление нового поколения ТО, значительно отличающегося от предыдущего. В этих случаях, можно сказать, закон будет использоваться для ускорения развития техники.

Прогнозирование с помощью S-функции позволяет установить, насколько недоиспользованы возможности применяемого принципа действия. Если эти возможности имеют значительные резервы (точка  $A$  на рисунке 1.15), то на основе прогнозирования можно сформулировать реальное задание на улучшение интересующих главных показателей. Если же прогноз покажет, что возможности принципа действия практически исчерпаны (точка  $B$  на рисунке 1.15), то будет сделан обоснованный вывод о необходимости перехода на новый физический принцип действия. В связи с этим возникает задание на поиск и разработку более перспективного принципа действия.

Закон прогрессивной эволюции представляется полезным использовать на начальных стадиях проектирования новых поколений ТО при выполнении работ по анализу и осмысливанию истории техники, прогнозированию развития техники.

8. Закон соответствия между функцией и структурой. Суть закона заключается в том, что в правильно спроектированном ТО каждый компонент – от сложных узлов

до простых элементов, каждый его конструктивный признак имеют вполне определенную функцию (назначение) по обеспечению работы ТО. И если лишить такой ТО какого-либо элемента или признака, то он либо перестанет работать (выполнять свою функцию), либо ухудшит показатели своей работы. В связи с этим у правильно спроектированных ТО нет «лишних деталей».

Соответствие между функцией и структурой лежит в основе всей познавательной деятельности, связанной с анализом и изучением существующих ТО, и всей проектно-конструкторской деятельности по созданию новых ТО. Закон соответствия между функцией и структурой ТО имеет следующую формулировку: каждый элемент технического объекта или его конструктивный признак имеют хотя бы одну функцию по обеспечению реализации функции ТО, т.е. исключение элемента или признака приводит к ухудшению какого-либо показателя ТО или прекращению выполнения им своей функции.

Жизнеспособными оказываются те конструктивные решения, у которых форма технического объекта подчинена его внутреннему содержанию и содействует реализации предъявляемых к нему требований.

Совокупность всех таких соответствий в ТО представляет собой функциональную структуру в виде ориентированного графа, который отражает системную целостность ТО и соответствие между его функцией и структурой (конструкцией). Выражение закона соответствия между функцией и структурой в количественной форме обеспечивает, во-первых, формализованное описание функций элементов через компоненты  $D$  (действие, производимое рассматриваемым ТО и приводящее к желаемому результату, т.е. к удовлетворению интересующей потребности),  $G$  (указание объекта, на который направлено действие  $D$ ),  $H$  (указание особых условий и ограничений, при которых выполняется действие  $D$ ), которые могут иметь также количественные характеристики; во-вторых, представление функциональной структуры ТО в виде ориентированного графа, у которого вершинами являются элементы ТО, а ребрами могут быть функции элементов по обеспечению работы других элементов или (и) потоки вещества, энергии или информации, передаваемые между элементами [15].

На основе закона соответствия между функцией и структурой разработаны методики построения функциональных структур конкретных ТО. Эти методики используются в различных подходах и методах проектирования. Данный закон имеет несколько практически важных следствий – закономерностей, отражающих обобщённые функциональные структуры широких классов ТО.

На основе закона соответствия выделяют закономерность многозначного соответствия между функцией и структурой, которую можно назвать свойством функционально-структурной инвариантности ТС, когда любая функция и соответственно функциональная структура может иметь множество структур (конструкций), реализующих эту функцию. И наоборот, у многих ТС и их элементов могут быть выбраны такие структуры, которые будут выполнять более одной функции.

Если в первом случае многообразие конструкторско-технологических решений представляется одной функциональной структурой, то во втором случае оно

представлено множеством функциональных структур. Эта важная закономерность используется во многих методах поиска новых конструкторско-технологических решений на основе закона соответствия между функцией и структурой.

**Тенденции технического развития.** Для определения тенденций развития техники следует исходить из того, какие цели стремится достичь общество.

Философия и социология, которые занимаются изучением проблем развития общества, обычно абстрактны для людей, связанных с созданием техники. Однако в настоящее время ответственность инженеров за развитие общества подобна ответственности врачей за здоровье людей, так что решение общественных проблем нельзя больше предоставлять только политикам, философам и социологам. Существует ряд неоспоримых целей общества, очевидных большинству людей. Не рассматривая вопрос о приоритетности этих целей, приведем наиболее значимые из них [6]:

- а) исключение голода;
- б) исключение войн;
- в) избавление от болезней и увеличение продолжительности активной жизни людей;
- г) борьба с преступностью;
- д) повышение благосостояния людей;
- е) повышение уровня образования;
- ж) сокращение доли физического труда;
- з) сокращение рабочего времени;
- и) повышение комфорта в жизнедеятельности людей.

Вопрос состоит в том, насколько эти целевые установки могут содействовать счастью и удовлетворенности людей. Некоторые предлагают полностью отказаться от техники, другие выступают за ее бесконтрольное развитие. Независимо от высказываемых крайних мнений наука и техника будут развиваться. Важно, чтобы они развивались на благо людей. Для того чтобы люди могли правильно управлять развитием техники, необходимо знать, в каком направлении оно должно происходить и каким образом регулироваться. Каждый инженер (разработчик, проектировщик, системотехник) должен понимать значение своей деятельности и всегда сопоставлять свою задачу с интересами общества.

Тенденции развития техники часто формулируются на уровне определенных свойств ТО. Признанными тенденциями развития являются снижение материало- и энергоемкости изготовления и эксплуатации ТО, автоматизация, компьютеризация, цифровизация, интеллектуализация, использование новых принципов работы и прогрессивных способов производства.

Автоматизация – это передача функций управления и контроля от человека машине. Интеллектуализация, цифровизация и компьютеризация означают расширение использования средств искусственного интеллекта для решения технических задач. Анализ этих тенденций показывает, что они непосредственно влияют на снижение доли физического и умственного труда, а также сокращение рабочего времени; связь с другими целями общества проявляется косвенно.



Связь тенденций развития техники с целями общества станет яснее, если обозначить важнейшие отрасли, которые определяют технический уровень развития:

- а) информатика, электроника и вычислительная техника;
- б) ракетно-космическая техника;
- в) атомная энергетика;
- г) транспорт и связь;
- д) охрана окружающей среды;
- е) медицинская техника;
- ж) исследования новых пространств (включая космические, морские, океанические).

Достижения в этих областях должны повышать благосостояние людей и охранять их здоровье, удовлетворять их потребности и делать жизнь более полной.

### **1.1.7 Программные системы электронных и радиоэлектронных средств**

Развитие информационных технологий (ИТ) – основной элемент явления, которое многие называют информационной революцией и которое до неузнаваемости меняет облик современной промышленности, торговли, финансов, образования, развлечений, в общем, сам образ жизни. В основе этих выдающихся достижений лежит возможность использования информационных технологий для автоматизации решения задач, раньше выполнявшихся людьми, а также для осуществления более сложных операций, притом быстрее и намного точнее. Мало того, что такие возможности вызвали к жизни целое семейство новых сложных программно-управляемых систем, они еще и встраиваются во все виды транспортных средств, бытовых приборов и даже в детские игрушки.

Другими словами, практически все современные электронные и радиоэлектронные средства имеют в составе своей элементной базы микроконтроллеры и микропроцессоры, т.е. программно-управляемые компоненты. Отсюда следует, что современный системотехник должен хорошо разбираться и в таких дисциплинах, как программная инженерия и инженерия программных систем, чтобы уметь формулировать корректные требования к программным средствам и правильно осуществлять постановку задачи перед программным инженером.

Термины «программная инженерия» и «инженерия программных систем» – не синонимы. Первый относится к разработке и поставке программных продуктов, автономных или встроенных, а второй – к использованию определенных принципов применительно к программной инженерии как отрасли знания.

Рассмотрим, как программная инженерия соотносится с системами, т.е. как программное обеспечение используется для реализации требований, функциональных возможностей и поведения более крупной системы.

В программном обеспечении выделяют три основных компонента [8, 9].

1. Команды: компьютерная программа, или просто код, состоит из списка команд, выполняемых различными аппаратными платформами для предоставления полезных функций и операций. Команды различаются по уровню детальности, синтаксису и языку.

2. Структуры данных: наряду с набором команд имеются определения структур данных, которые должны содержать информацию, подлежащую обработке и преобразованию посредством команд.

3. Документацию: программное обеспечение включает обязательную документацию, в которой описывается, как оно работает и как им пользоваться.

В совокупности три этих компонента и называются программным обеспечением (ПО). Программная система – это программное обеспечение (в определенном выше смысле), которое к тому же удовлетворяет определению системы.

**Преодоление сложности и абстрактности.** Одно из наиболее существенных различий между разработкой ПО и разработкой оборудования заключается в абстрактной природе ПО. Поскольку выполнение многих критических функций в современных ТС зависит от ПО, будет уместно уделить внимание уникальным проблемам разработки программных компонентов сложных систем [8].

Один из взглядов на программную инженерию состоит в том, что программный инженер – это просто еще один инженер-проектировщик, отвечающий за часть функциональных возможностей системы. После того как произведена привязка функций к ПО, программному инженеру поручают реализовать функции и поведение посредством программного кода. Решая такую задачу, программный инженер работает вместе со своими коллегами в инженерных подразделениях и занимается разработкой подсистем и компонентов, только его инструментом является программный код, а не физические устройства и детали. На рисунке 1.19 показана принятая IEEE<sup>7</sup>-сообществом схема процесса инженерии программных систем, на которой этот взгляд представлен в виде традиционной V-образной диаграммы.

После того как выделена подсистема, которую предполагается реализовывать программно (или программно-аппаратно), начинается подпроцесс формирования требований к ПО, архитектурного и детального проектирования. Прежде чем программные компоненты будут включены в систему, должны быть выполнены действия, относящиеся к программной и системной инженерии.

К сожалению, такой взгляд поощряет «независимость» групп разработки системы и ПО. Складывается впечатление, будто после завершения проектирования инженеры по оборудованию и по программному обеспечению приступают к своим собственным частям разработки. Однако природа ПО такова, что стратегию его разработки необходимо определить на ранних стадиях, а именно на этапе формирования общесистемных решений, который на V-образной диаграмме является вторым из крупных шагов. Если на этом этапе (то есть когда функциональные возможности и компоненты подсистем привязываются к аппаратной или программной

---

<sup>7</sup> IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers (Институт инженеров электротехники и электроники).

реализации) или в его конце оборудование и ПО «расщеплены», то различия в процессах разработки и реализации этих компонентов приведут к тому, что завершение разработки различных частей систем не состыкуется по времени.

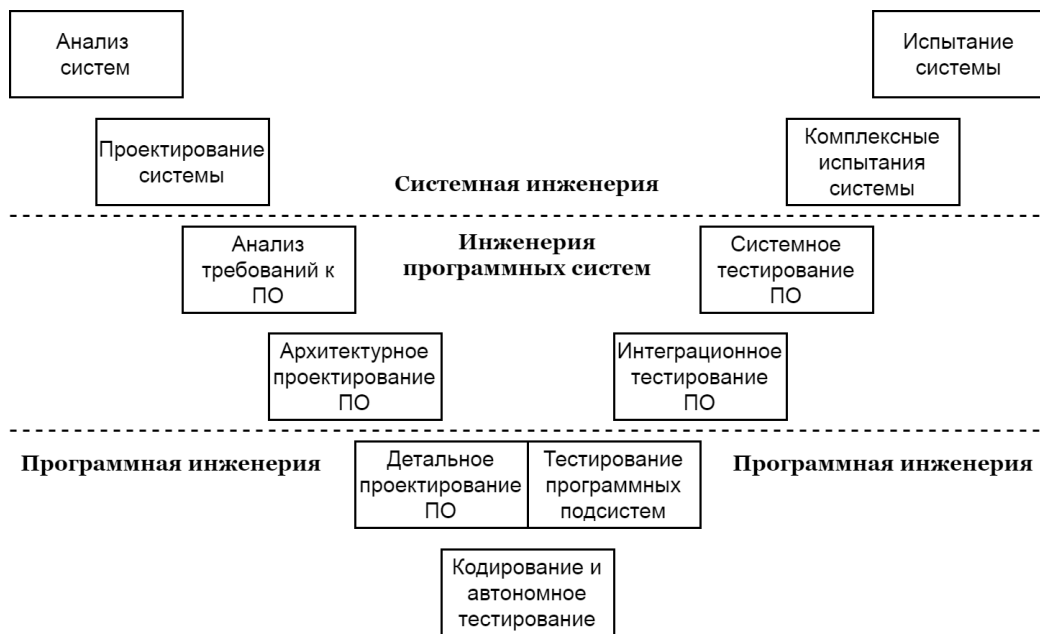


Рисунок 1.19 – Процесс инженерии программных систем согласно IEEE

Поэтому разработку ПО необходимо интегрировать раньше, чем было принято по традиции, а именно на этапе анализа системы. Хотя на рисунке 1.19 это не показано, построение архитектуры системы теперь становится важной частью того, что этот процесс вносит в существо анализа системы. Именно в рамках построения архитектуры системы следует рассматривать инженерии программных систем.

**Роль программного обеспечения в ТС.** Разработка программного обеспечения (вторая половина XX века) совпала по времени с развитием технологии цифровых вычислений, на которую в свою очередь оказал влияние прогресс в полупроводниковых технологиях. ПО – это управляющий и обрабатывающий элемент в системах сбора и обработки данных. Это именно то средство, с помощью которого компьютеру сообщается, как поступить с источником данных, чтобы преобразовать их в полезную информацию или действие. На заре развития компьютеров программы использовались для расчета артиллерийских таблиц на очень примитивных машинах, результаты таких расчетов использовались при проведении боевых действий во время Второй мировой войны. В наши дни ПО применяется для управления самыми разными компьютерами (от одиночных систем на кристалле до невообразимо мощных суперкомпьютеров), выполняющими бесконечно разнообразные задачи. Такая гибкость и потенциальная мощь делает ПО незаменимой составной частью современных ТС, как простых, так и сложных.

Хотя ПО и оборудование компьютера неразрывно связаны, пути их развития сильно различаются. Компьютеры, состоящие преимущественно из полупроводниковых интегральных схем, обычно стандартизированы в плане конструкции и функционирования. А все требования конкретных приложений к обработке включены в ПО. Так разделение функций позволило направить огромные ресурсы на повышение быстродействия и функциональных возможностей компьютеров, не отказываясь от стандартизации и сохраняя стоимость компьютеров низкой за счет массового производства и продажи. Тем временем для удовлетворения возрастающих потребностей росли размеры и сложность ПО, которое постепенно становится преобладающей частью большинства сложных систем.

Традиционный взгляд на роль ПО в компьютерной системе представлен на рисунке 1.20. Здесь показано разбиение ПО на уровни и его связи с пользователем и машиной, на которой оно исполняется. В роли пользователя может выступать как человек-оператор, так и другой компьютер. Видно, что пользователь взаимодействует со всеми уровнями через различные интерфейсы. На рисунке показано, что пользовательский интерфейс охватывает все уровни ПО и в минимальной степени позволяет взаимодействовать напрямую с оборудованием. ПО на прикладном уровне составляет существо компьютерной системы, это именно то приложение, которое поддерживается остальными уровнями.

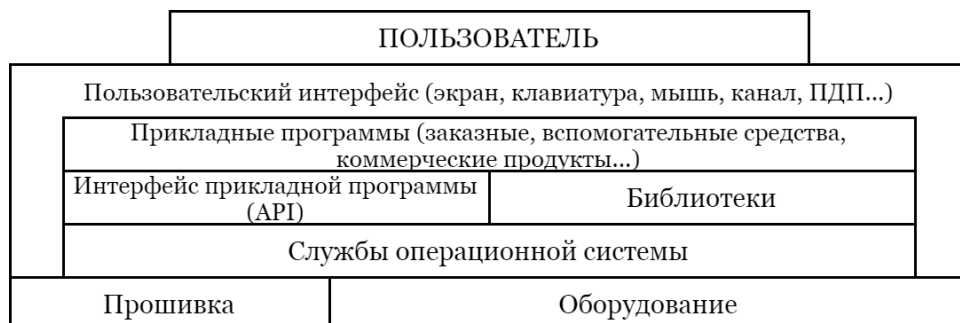


Рисунок 1.20 – Иерархия программного обеспечения

Современные программные системы редко размещаются на одиночном автономном компьютере, как это показано на рисунке 1.20. В наши дни ПО распределено по сложно устроенной сети, состоящей из маршрутизаторов, серверов и клиентов, образуя многоуровневую архитектуру систем. На рисунке 1.21 изображена упрощенная трехуровневая архитектура, в которой клиенты венчают последовательность сетей. Внутри каждого компонента этой архитектуры мы увидим иерархию, подобную показанной на рисунке 1.20.

Как нетрудно понять, сложность компьютерных систем (которые не следует называть вычислительными сетями) существенно возросла. ПО больше не привязано к какой-либо одной платформе или даже к одному типу платформ, а должно работать в гетерогенной среде, включающей различные аппаратные платформы. Более того, программы управляют сложными сетями, а не только отдельными платформами.

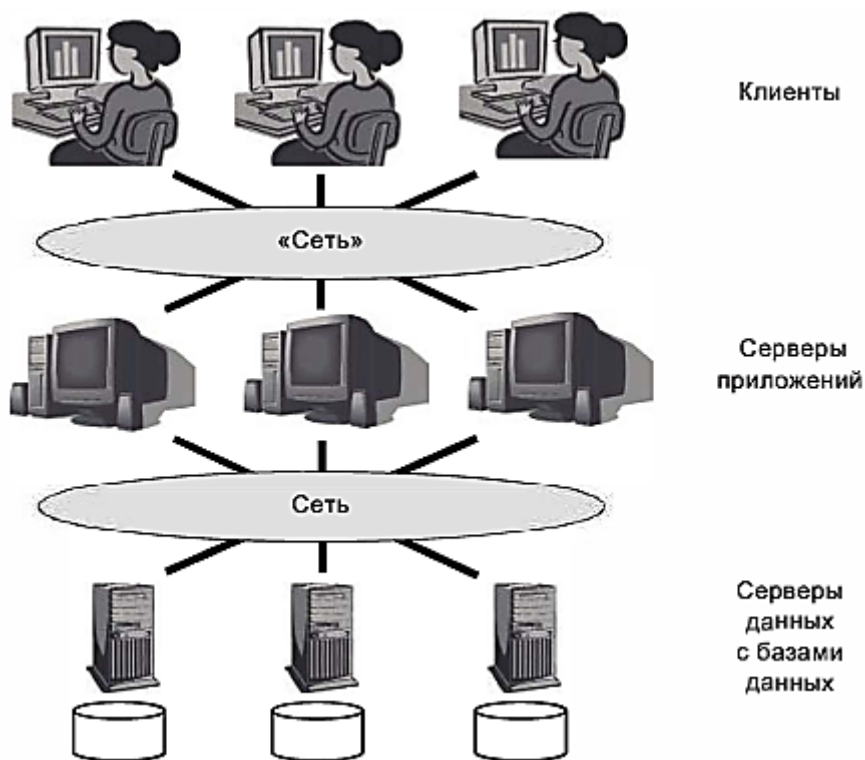


Рисунок 1.21 – Примерная трехуровневая архитектура

Из-за растущей сложности ПО и все более важной роли, которую оно играет в сложных системах, его разработка превратилась в неотъемлемую и полноценную часть разработки ТС. Поэтому системная инженерия включает программную инженерию как самостоятельную дисциплину, а не просто как еще одну инженерную деятельность с целью реализации каких-то функциональных возможностей.

**Типы программного обеспечения.** За последние несколько десятилетий было много попыток предложить классификацию ПО, но согласно [8] почти все категории можно отнести к одному из трех общих типов.

1. Системное ПО: эта категория предоставляет службы (услуги) другим программам и не предназначена для автономного использования. Классический пример – операционная система. Операционная система компьютера или сервера предоставляет различные службы данных, файлов, связи и интерфейсов (и это лишь малая часть) другим программам, работающим на том же компьютере.

2. Встроенное ПО: эта категория предоставляет конкретные службы (услуги), функции и компоненты в составе более крупной системы. Данный тип ПО наиболее близок системной инженерии, потому что в соответствии с базовым принципом функциональные возможности привязываются к конкретным подсистемам, в том числе реализованным программно. Примеры легко встретить в таких системах, как спутники, системы оборонного назначения, системы национальной безопасности и энергетические системы.

3. Прикладное ПО: эта категория предоставляет службы (услуги) для удовлетворения конкретной потребности и рассматривается как автономное ПО. Обычно приложения взаимодействуют с системным и встроенным ПО, являясь потребителями их услуг. В качестве примеров можно назвать популярные офисные пакеты программ – текстовые процессоры, электронные таблицы и программы для подготовки презентаций.

Хотя эти три категории покрывают широкое разнообразие существующего сегодня ПО, они не дают представления о многочисленных частных случаях. В таблице 1.8 показана дополнительная классификация. Для сравнения приведены как три основные категории, так и ещё четыре категории ПО: научно-инженерное, линейка продуктов, веб-приложения и искусственный интеллект. Хотя все они попадают в одну или несколько из трех основных категорий, у каждой есть и своя узкая ниша, признаваемая программным сообществом.

Таблица 1.8 – Типы программного обеспечения

Тип ПО	Краткое описание	Примеры
Системное	Предоставляет службы (услуги) другим программам	Операционная система, диспетчер сети
Встроенное	Является частью более крупной системы и реализует конкретные функции или задачи	Графический интерфейс пользователя, навигационное ПО
Прикладное	Автономная программа, удовлетворяющая конкретную потребность	ПО для бизнеса, средства обработки данных, средства управления процессами
Научно-инженерное	Использует сложные алгоритмы для решения трудных научных и инженерных задач	Имитационное моделирование, автоматизированное проектирование
Линейка продуктов	Предназначено для использования различными категориями пользователей в разных средах	Обработка текстов, электронные таблицы, мультимедиа
Веб-приложения	Предназначено специально для использования в глобальных сетях	Интернет-браузеры, ПО для создания веб-сайтов
Искусственный интеллект	Отличительной чертой является применение нечисленных алгоритмов для решения трудных задач	Робототехника, экспертные системы, распознавание образов, игры

**Типы программных систем.** Хотя ПО стало важным элементом практически всех современных сложных систем, задача построения новой ТС может выглядеть существенно по-разному в зависимости от природы функций, выполняемых программными элементами. Несмотря на то, что общепринятая классификация типов систем отсутствует, полезно различать три типа программных систем, которые называются встроенными программными средствами (software-embedded systems), программно насыщенными системами (software-intensive systems) и вычислительно-ориентированными системами (computing-intensive systems). Термин «преимущественно

программная система» (software-dominated system) употребляется для обозначения программных систем в целом.

Характеристики всех трех категорий преимущественно программных систем и известные примеры приведены в таблице 1.9.

Таблица 1.9 – Категории преимущественно программных систем

Характеристика	Встроенные программные системы	Программно насыщенные системы	Вычислительно-ориентированные системы
Цель	Автоматизация сложных подсистем для достижения более высокого быстродействия и точности	Манипуляции большими массивами информации для поддержки решений или приобретения знаний	Решение трудных задач, моделирование сложных систем путем расчетов и имитации
Функции	Алгоритмические, логические	Транзакционные	Вычислительные
Входы	Данные от датчиков, регуляторов	Информация, объекты	Численные данные
Обработка	Вычисления в реальном масштабе времени	Манипуляция, графический интерфейс пользователя, обмен данными по сети	Вычисления не в реальном масштабе времени
Выходы	Действия. Продукция	Информация, объекты	Информация
Временные характеристики	Реальное время, непрерывно	Нерегулярно	По расписанию
Примеры	Управление воздушным движением, системы вооружений, аэронавигация и управление летательным аппаратом	Банковские сети, системы резервирования авиабилетов, веб-приложения	Прогноз погоды, прогноз поражающего действия ядерного оружия, математическое и имитационное моделирование
Оборудование	Мини- и микропроцессоры	N-уровневые архитектуры	Суперкомпьютеры
Типичные пользователи	Операторы	Руководители различных уровней	Научные работники, аналитики

Встроенные программные системы, которые также называют системами реального времени, представляют собой комбинацию оборудования, ПО и людей. Основные действия в системах такого типа выполняются оборудованием, но ПО играет важную обеспечительную роль.

---

*Примерами могут служить транспортные средства, радиолокационные системы, станки с автоматическим управлением и т.д.*

---

На ПО возлагаются критические управляющие функции, дополняющие работу оператора-человека и исполнительных аппаратных компонентов.

Встроенные программные системы обычно работают непрерывно, как правило, на встроенных микропроцессорах (отсюда и название), поэтому должны функционировать в режиме реального времени. В таких системах ПО чаще всего предстает в виде компонентов, спроектированных в соответствии с требованиями, заданными на уровне системы в целом и подсистем. Требования могут относиться как к отдельным программным компонентам, так и к их группам, функционирующим как подсистемы. Роль ПО в подобных системах может изменяться в широких пределах: от функций управления в бытовых приборах до в высшей степени сложных функций автоматизации в системах вооружений.

Программно насыщенные системы, к которым относятся и все информационные системы, состоят главным образом из компьютеров и пользователей, причем компьютеры и ПО реализуют практически все функциональные возможности системы, обычно поддерживая действия оператора-человека.

---

*В качестве **примеров** можно назвать системы автоматизированной обработки информации, в том числе систему резервирования авиабилетов, системы распределенной торговли, системы управления финансовой деятельностью и т.д.*

---

Как правило, программно насыщенные системы работают нерегулярно, в ответ на запросы пользователей, поэтому не характеризуются такими жесткими требованиями ко времени реакции, как системы реального времени. С другой стороны, требования к ПО таких систем должны соответствовать требованиям, предъявляемым на уровне системы в целом, непосредственно восходящим к потребностям пользователей. Эти системы могут быть очень крупными, распределёнными по сетям, охватывающим большую территорию. Всемирная паутина – предельный случай программно насыщенной системы.

В программно насыщенных системах ПО выполняет ключевые функции на всех уровнях, включая управление самой системой. Поэтому они должны с самого начала строиться с учетом принципов системной инженерии. Большую часть таких систем можно считать транзакционными (управление финансами, резервирование авиабилетов, командные и управляющие системы). В общем случае в их основе лежат базы данных, содержащие информацию об объектах предметной области, к которым нужно обращаться для выполнения требуемой операции.

Вычислительно-ориентированные системы существенно отличаются от рассмотренных выше и включают крупномасштабные вычислительные ресурсы для решения сложных вычислительных задач.

---

*К **примерам** можно отнести гидрометеорологические центры, системы прогнозирования поражающего действия ядерного оружия, усовершенствованные системы дешифрования информации и другие системы, подразумевающие большой объем вычислений.*

---



Они обычно строятся как вычислительные центры, в которых вычисления производятся на суперкомпьютерах или кластерах, собранных из быстродействующих процессоров. В некоторых случаях обработка выполняется группой параллельных процессоров, а программа специально проектируется для параллельной работы.

К разработке вычислительно-ориентированных систем применяется такой же системный подход, как и к другим системам. Но подобные системы, как правило, уникальны и нуждаются в узкоспециализированных технических решениях.

**Различия между оборудованием и программным обеспечением.** Между оборудованием и ПО существует ряд фундаментальных различий, которые имеют глубокие последствия для системной инженерии преимущественно программных систем. Каждый системотехник должен ясно понимать эти различия и их внутренний смысл. В таблице 1.10 приведено описание программных систем и их существенных отличий от оборудования.

Таблица 1.10 – Различия между оборудованием и программным обеспечением

Характеристика	Оборудование	Программное обеспечение	Сложности в плане программной инженерии
Структурные блоки	Физические детали, компоненты	Объекты, модули	Мало стандартных составных частей, компоненты редко допускают повторное использование
Интерфейсы	Видны на границах компонентов	Хуже видны, глубоко проникают, многочисленны	Затруднено управление интерфейсами, отсутствует модульность
Функциональные возможности	Ограничены мощностью, точностью	Не существует внутренних ограничений (ограничены только возможностями оборудования)	Очень сложные программы, трудные для сопровождения
Размер	Ограничен пространством, весом	Не существует внутренних ограничений	Очень большие модули, которыми трудно управлять
Изменяемость	Требует усилий	Обманчиво просто, но рискованно	Затруднено управление конфигурацией
Характер отказа	Отказу предшествует неустойчивая работа	Отказывает неожиданно	Последствия отказов серьезнее
Абстракция	Состоит из физических элементов	Текстовая и символическая	Более трудна для понимания

Рассмотрим эти отличия подробнее.

*Структурные блоки.* Аппаратные компоненты, как правило, состоят из стандартных физических деталей: индикаторов, транзисторов, моторов, реле и т.д. Подавляющее их большинство служит для реализации общеупотребительных функций,

таких например, как обработка данных или генерация крутящего момента. Напротив, программные структурные блоки можно комбинировать бесчисленными способами, образуя конструкции, которые определяют функции, выполняемые программой. Здесь не существует конечного множества стандартных функциональных составных частей, из которых собираются аппаратные подсистемы и компоненты. Заметными исключениями являются общие библиотечные функции (например, тригонометрические), присутствующие в некоторых средах программирования, а также коммерческие программные «компоненты», относящиеся по большей части к функциям графического интерфейса пользователя.

*Интерфейсы.* Из-за отсутствия четко определенных физических компонентов программные системы обычно имеют гораздо больше интерфейсов, а взаимосвязи между отдельными частями системы глубже и не так хорошо видны, как в аппаратных системах. Вследствие этой особенности оказывается труднее добиться хорошей модульности и контролировать последствия локальных изменений.

*Функциональные возможности.* В отличие от оборудования, ограничения на возможности которого обусловлены физическими законами, для программного обеспечения не существует ограничений, обусловленных именно его природой. Поэтому большинство критических, сложных и нестандартных операций системы обычно привязывается к программным компонентам.

*Размер.* Если размер аппаратных компонентов ограничен объемом, весом и другими параметрами, то размер компьютерной программы присущими ПО ограничениями не лимитируется, особенно при современных технологиях организации памяти. Большой размер многих программных систем представляет серьезную проблему для системной инженерии, потому что в них может быть скрыта невероятная сложность (сотни миллионов строк кода). Эта проблема особенно характерна для заказных клиентоориентированных систем.

*Изменяемость.* По сравнению с усилиями, которые нужно приложить для изменения аппаратного элемента, внесение изменений в программу кажется совсем простым – всего-то и нужно изменить несколько строк кода, но это впечатление часто обманчиво. Результат изменения программ труднее предсказать или определить из-за проблем, связанных со сложностью и неочевидностью интерфейсов. Простенькое изменение программы может потребовать повторного тестирования всей системы.

*Характер отказа.* Оборудование по своей конструкции и способу работы непрерывно, тогда как ПО является цифровым и дискретным. Оборудование обычно сначала подает признаки неисправности и только потом выходит из строя, причем область отказа ограничена. Программа отказывает неожиданно, и зачастую это приводит к сбою системы в целом.

*Абстракция.* Аппаратные компоненты описываются техническими чертежами, электрическими схемами, и другими представлениями, которые являются моделями физических элементов и понятны любому инженеру. ПО по природе своей абстрактно. К фактическому коду прилагаются очень абстрактные архитектурные и модельные диаграммы, причем у каждой диаграммы есть собственный

информационный контекст. Уровень абстракции – это, пожалуй, самое существенное различие между программным обеспечением и оборудованием.

Описанные различия оказывают глубокое влияние на системную инженерию сложных, преимущественно программных систем. Недооценка этих различий и недостаточный их учет стали причиной целого ряда хрестоматийных неудач в крупных программах, например при попытке модернизации системы управления воздушным движением, при разработке первой версии системы сбора данных для телескопа Хаббл, в программе создания марсианского посадочного модуля и в системе обработки багажа в аэропорту [8].

Системотехник как специалист, разбирающийся в функционировании ТС, а также в методах преобразования технических процессов, должен уметь осуществлять постановку проектных задач программистам [35]. Другими словами, он должен иметь достаточно полное представление о программной документации, а именно:

- о программном обеспечении систем обработки информации, включая основные понятия предметной области, виды программ и программной документации, языки и технологии программирования, виды программирования;
- единой системе программной документации (ЕСПД), включая сферу использования и состав ЕСПД, классификацию и обозначения стандартов ЕСПД, термины и определения в ЕСПД;
- об обозначениях программных документов;
- о стадиях разработки программ и программной документации (приложение 2);
- о требованиях к содержанию и оформлению, включая требования к программным документам, описание языка, особенности текста и описания программы, пособия программиста и системного программиста, техническое задание и требование к его содержанию и оформлению (приложение 3);
- о символах в схемах алгоритмов, программ, данных, процессов и систем.

**Проектирование программного продукта.** При разработке типичной аппаратной системы проектирование изделия заключается в преобразовании аппаратных компонентов опытного образца, которые иногда называют макетами, в надежные, ремонтпригодные и готовые к производству компоненты. Показатели функционирования при этом сохраняются, хотя физическое воплощение может измениться до неузнаваемости. Чаще всего эту работу выполняют инженеры, обладающие богатым опытом в области производства, экологичной упаковки, материалов и методов их изготовления, а задача состоит в том, чтобы процесс производства конечной продукции был эффективным и надежным.

Процесс проектирования программных элементов системы сильно отличается. Для ПО нет никакого процесса «производства». Однако другие аспекты производства изделия сохраняются. Ремонтпригодность, которая в данном случае называется пригодностью к сопровождению, остается важнейшей характеристикой из-за присущего ПО количества интерфейсов. Ремонт путем замены вышедшего из строя компонента резервным в случае ПО лишен смысла. Эффективный пользовательский интерфейс – еще одна важная характеристика действующего ПО, которой в начальных версиях системы часто пренебрегают.

Таким образом, для превращения работающей компьютерной программы в программный продукт, предназначенный не только для себя, обычно приходится прилагать значительные усилия. По экспертным оценкам, на это затрачивается в три раза больше усилий, чем на саму разработку работающей программы. Однако в программной инженерии нет профессии, которую можно было бы сравнить с инженером-технологом и инженером по упаковке и транспортировке. Готовность к «превращению в продукт» должны предусматривать в ПО те же проектировщики, которые отвечают за базовые функциональные возможности. Но у среднего проектировщика ПО нечасто встретишь настолько широкий кругозор, поэтому пригодность программных продуктов к сопровождению зачастую оказывается далеко не удовлетворительной.

При разработке программных систем нужно уделять особое внимание проектированию пользовательских интерфейсов. Компьютерный интерфейс должен отображать информацию в форме, дающей пользователю ясную и хорошо организованную картину состояния системы, которая позволяет эффективно принимать решения. Средства управления при этом должны быть простыми и быстрыми. Для выбора подходящего вида интерфейса, формата отображения, логики взаимодействия и прочих факторов чаще всего приходится создавать прототип и тестировать его на репрезентативной группе пользователей.

Наиболее употребительные виды управления в интерфейсах – интерактивные меню, языки команд и манипулирование объектами. В таблице 1.11 приведены некоторые сравнительные характеристики интерфейсов.

Таблица 1.11 – Сравнение различных интерфейсов компьютера

Тип	Описание	Достоинства	Недостатки
Меню	Выбор из списка действий	Предпочитают пользователи Точность	Ограниченность выбора Низкая скорость
Подача команд	Сокращенные названия команд	Гибкость Скорость	Длительность обучения Легко допустить ошибку
Манипулирование объектом	Перетаскивание мышью	Интуитивность Точность	Умеренная гибкость Умеренная скорость
Графический интерфейс пользователя (GUI)	Нажатие графических кнопок	Поддержка со стороны Visual Basic и Java	Умеренная гибкость Умеренная скорость
Сенсорный экран и распознавание символов	Касание экрана или рукописный ввод	Простота Гибкость	Легко допустить ошибку

Быстрее прочих развиваются интерфейсы, основанные на манипулировании объектами, сами объекты при этом обычно называют иконками. Помимо характеристик, перечисленных в таблице 1.11, графическое представление нередко позволяет показать связи и передать смысл лучше, чем с помощью текста. К тому же графика дает возможность наглядно представить сложную информацию и сделать выводы,

которые ведут к более быстрым и безошибочным решениям, чем в случае применения иных методов. Графические интерфейсы пользователя чаще встречаются на персональных компьютерах под управлением таких операционных систем, как Macintosh OS и Microsoft Windows. Всемирная паутина своим могуществом также в немалой степени обязана графическим интерфейсам пользователя (GUI).

Для системного инженера GUI одновременно является источником возможностей и проблем. Возможности – это практически бесконечное разнообразие вариантов представления пользователю данных в информативной и интуитивно понятной форме. Проблемы обусловлены все тем же разнообразием – при виде такого богатства выбора проектировщик испытывает соблазн оптимизировать без конца, так как не связан никакими внутренними ограничениями. Поскольку программы с GUI имеют довольно сложную структуру, существует риск выйти из графика и бюджета, если системный инженер не знает об этой опасности.

Быстрое развитие технологий пользовательских интерфейсов вынуждает рассматривать менее традиционные способы взаимодействия с компьютером, обеспечивающие интересные возможности. Ниже приводятся три кратких примера:

1. Голосовое управление. Произнесенные вслух команды, обрабатываемые программами распознавания речи, позволяют легко и быстро вводить данные, оставляя руки свободными для других действий. В настоящее время работа в этом режиме несколько ограничена, так как оператор должен четко произносить слова из фиксированного словаря. Но благодаря продолжающимся исследованиям компьютер постепенно начинает понимать предложения.

2. Визуальное взаимодействие. Машинная графика используется как подспорье в принятии решений путем моделирования на экране результатов вероятных действий. Тем самым открывается возможность для анализа типа «что, если» в реальном масштабе времени. Визуальная интерактивная имитация (visual interactive simulation – VIS) – это усовершенствованная форма визуального интерактивного моделирования (visual interactive modeling – VIM).

3. Виртуальная реальность. Это вид трехмерного интерфейса, при работе с которым пользователь надевает стереоочки и шлем. В ответ на движения головы генерируются смоделированные движения изображения, соответствующие тому, что увидел бы пользователь на виртуальной сцене. Диапазон применения таких дисплеев постоянно расширяется, например проектирование сложных конструкций, обучение пилотов, а также ведения боя и игры.

**Законы развития программных систем.** В инженерии программных систем существуют аналоги ЗРТС, которые представляют собой восемь принципов эволюции программного обеспечения. Эти принципы называются законами Лемана по имени их создателя Меира Мэнни Лемана, который сформулировал их в период с 1974 по 1996 г. Эти законы в целом описывают баланс между силами, из которых одни обеспечивают, а другие тормозят развитие информационных систем [36].

В работе 1976 года [37] Леман в соавторстве с Л. А. Белادي пишет, что в первую очередь речь идёт о больших многофункциональных программах, требующих

постоянной поддержки и улучшения. Позже в связи с этим Леман выделил три категории программ [38]:

S-программы, написанные в строгом соответствии со спецификацией того, что программа может делать;

R-программы, реализующие процедуры, полностью определяющие их поведение (например, компьютерные шахматы);

E-программы, осуществляющие работу в условиях реального мира, то есть существенно зависящие от среды своего функционирования, а потому нуждающиеся в адаптации к тем или иным внешним требованиям.

Исходя из этого, законы эволюции программного обеспечения применимы только к E-программам, например к ERP-системам.

Полная формулировка всех восьми законов, представленная ниже, опубликована Леманом в 1996 году [39].

1. (1974) Непрерывное изменение – используемая E-программа должна быть непрерывно адаптируемой, иначе она будет становиться всё менее удовлетворительной.

2. (1974) Увеличение сложности – по мере того как программа эволюционирует, её сложность растёт, если не производится работа по стабилизации и уменьшению сложности.

3. (1974) Саморегулирование – процесс эволюции программы является саморегулируемым, с близким к нормальному распределению масштабам атрибутов продукта и процесса.

4. (1978) Сохранение организационной стабильности (неизменная скорость работы) – средний эффективный глобальный уровень активности в эволюционирующей системе инвариантен к времени жизни продукта.

5. (1978) Сохранение осведомлённости – в течение активной жизни эволюционирующей программы основное содержание последующих релизов статистически неизменно.

6. (1991) Непрерывное развитие – функциональное содержание программы должно постоянно расширяться на протяжении жизненного цикла, чтобы поддерживать удовлетворённость пользователей.

7. (1996) Ухудшение качества – качество программ E-типа будет восприниматься как ухудшающееся, если они не сопровождаются должным образом и не адаптируются к операционной среде.

8. (1996) Система обратной связи – процессы программирования E-типа вместе составляют многоконтурные, многоуровневые системы обратной связи и должны рассматриваться как таковые, чтобы успешно изменяться и улучшаться.

## 1.2 Определение и классификация потребностей в проектной деятельности

Любая человеческая деятельность, включая проектную, характеризуется пятью инвариантными сторонами: ценностно-ориентировочной деятельностью, познавательной и преобразовательной деятельностью, эстетической и коммуникативной деятельностью. В соответствии с этим в настоящее время выделяют пять оснований методологии проектной деятельности (рисунок 1.22) [40]:

1. Философско-психологическая теория деятельности.
2. Системный анализ (системотехника) – учение о системе методов исследования или проектирования сложных систем, поиска, планирования и реализации изменений, предназначенных для ликвидации проблем.
3. Науковедение, теория науки. В первую очередь к методологии имеют отношение такие разделы науковедения, как гносеология (теория познания) и семиотика (наука о знаках).
4. Эстетика деятельности.
5. Этика деятельности.

Системотехник должен строить проектную деятельность с учетом этих оснований.

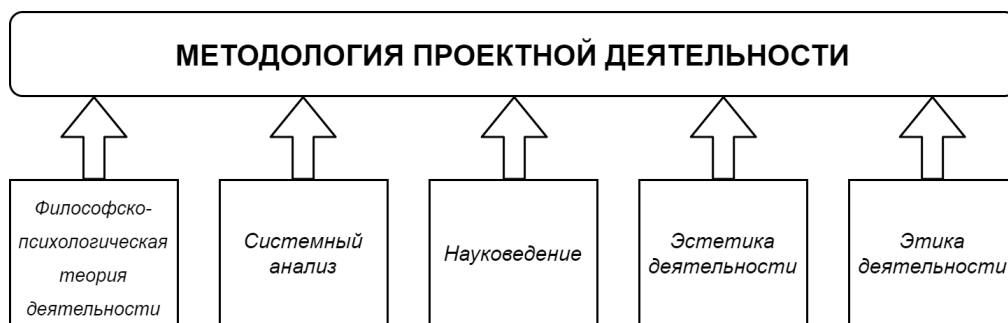


Рисунок 1.22 – Основания методологии проектной деятельности

Структура проектной деятельности системотехника, развёртываемая во времени (прошлое, настоящее, будущее) и охватывающая географическое и социальное пространство (локальный, региональный, государственный и мировой уровни), соответствует общей схеме, приведенной на рисунке 1.23.

Потребности являются причиной и драйвером деятельности людей и определяются как нужда или недостаток в чем-либо, необходимом для поддержания жизнедеятельности организма, человеческой личности, социальной группы, общества в целом [40]. Биологические потребности, в том числе у человека, обусловлены обменом веществ – необходимой предпосылкой существования любого организма. Потребности социальных субъектов, что в данном случае нас интересует, – личности, социальных групп и общества в целом – зависят от уровня развития общества, а также от

специфических социальных условий их деятельности. В своей деятельности проектировщик ТС должен принимать во внимание масштаб потребности.

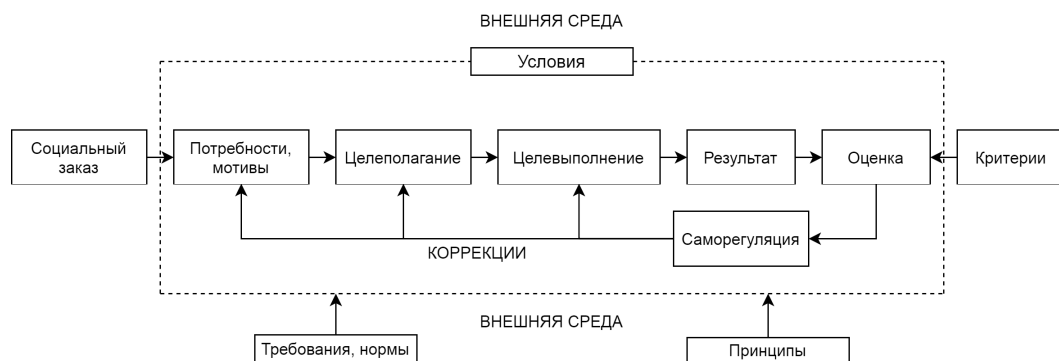


Рисунок 1.23 – Процессуальные компоненты деятельности

Масштаб потребностей (индивидуальные, групповые, социальные, мировые) определяется величиной *социального заказа*, который в свою очередь зависит от степени социально-экономического и культурного развития общества в конкретный момент исторического времени. С точки зрения разработчиков технических систем величина и значимость социального заказа играют определяющую роль в задаче оценки целесообразности производства продукции, а с точки зрения самих технических систем социальный заказ определяет их жизнеспособность.

Потребности конкретизируются, опредмечиваются в мотивах, являющихся побудителями деятельности человека, социальных групп, ради чего она и совершается [41]. Мотивация, то есть побуждение человека, социальной группы к совершению определенной деятельности, тех или иных действий, поступков, представляет собой сложный процесс, требующий анализа и оценки альтернатив, выбора и принятия решений.

Мотивы обуславливают определение цели как субъективного образа желаемого результата деятельности, действия [42]. Поэтому цель занимает особое место в структуре проектной деятельности. Системо- и схмотехническое проектирование ЭРЭС относится к продуктивному типу деятельности, т.е. относительно нестандартной, инновационной, творческой деятельности. Цель проектирования может определяться самим проектировщиком либо проектировщиком совместно с заказчиком. При этом процесс целеполагания становится довольно сложным, имеющим стадии и этапы, методы и средства. Поэтому в категориях современного проектно-технологического типа организационной культуры, а также системного анализа процесс целеполагания определяется как проектирование.

**Формальное описание процедуры определения целей проектирования.** Для наглядного представления и систематизации целей в виде упорядоченной иерархии удобно использовать граф [14]. Все общественное окружение объекта проектирования разбивается на уровни в зависимости от масштаба. На первом уровне помещается сфера, охватывающая интересы всего человечества. На втором – интересы



государства. Далее размещаются сферы интересов отрасли, предприятия (заказчика), проектной организации (исполнителя), отдела и, наконец, сфера личных интересов. На каждом уровне возникают свои цели, подчинённые целям более высокого уровня. Граф, вершины которого означают цели, а дуги – их отношения, и образует граф целей (рисунок 1.24). Вершины его ориентированы относительно уровней сфер окружения. При составлении графа в каждом конкретном случае нужно прежде всего решить, начиная с какого уровня будут учитываться сферы окружения. Проектируемое изделие не всегда влияет на интересы государства, и тем более всего человечества, однако чрезмерное усечение уровней может оказать неучтённое воздействие в сферах более высокого уровня.

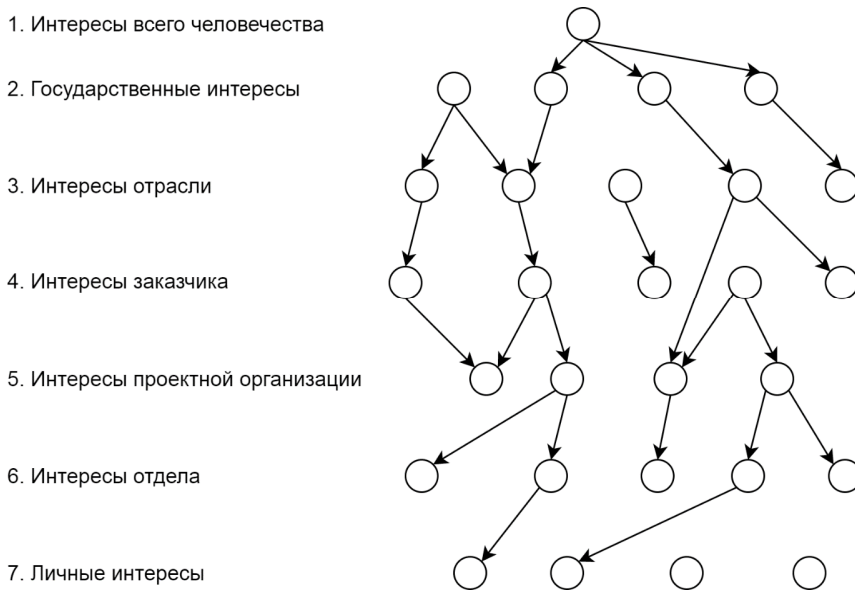


Рисунок 1.24 – Граф целей, ориентированный относительно уровней интересов общества

Цели проектирования на каждом уровне интересов общества неравнозначны по своей важности. Одних необходимо достичь обязательно, другие – желательны, а некоторыми вообще можно пренебречь.

Процесс целевыполнения также характеризуется в каждом конкретном случае своим содержанием, своими формами и специфическими методами, средствами и технологиями [40].

Совершенно особое место в структуре деятельности занимают те компоненты, которые в случае индивидуального субъекта называются саморегуляцией, а в случае коллективного субъекта, коллективной деятельности – управлением.

Саморегуляция в общем смысле определяется как целесообразное функционирование живых систем [43]. Психическая саморегуляция является одним из уровней регуляции активности этих систем, выражающим специфику реализующих ее

психических средств отражения и моделирования действительности, в том числе рефлексии субъекта (понятие рефлексии мы будем подробно рассматривать в дальнейшем).

Саморегуляция имеет следующую структуру: принятая субъектом цель его деятельности – модель значимых условий деятельности – программа собственно исполнительских действий – система критериев успешности деятельности – информация о реально достигнутых результатах – оценка соответствия реальных результатов критериям успеха – решение о необходимости и характере коррекций деятельности. Саморегуляция представляет собой, таким образом, замкнутый контур регулирования и является информационным процессом, носителем которого выступают различные формы отражения действительности.

Управление рассматривается как элемент, функция организованных систем различной природы: биологических, социальных, технических, обеспечивающая сохранение их определенной структуры, поддержание режима деятельности, реализацию программы, цели деятельности [41]. Коллективная деятельность невозможна без создания определенного порядка, разделения труда, установления места и функций каждого человека в коллективе, осуществляемых с помощью управления.

Понятие внешней среды (см. рисунок 1.23) является важнейшей категорией системного анализа, который рассматривает, в частности, человеческую деятельность как сложную систему.

Среда (внешняя среда) определяется как совокупность всех объектов/субъектов, не входящих в систему, изменение свойств и/или поведение которых влияет на изучаемую систему, а также тех объектов/субъектов, чьи свойства и/или поведение меняются в зависимости от поведения системы.

На рисунке 1.23 отдельно выделены факторы, задаваемые внешней (по отношению к данному субъекту деятельности) средой: это критерии оценки соответствия результата цели; принятые в обществе нормы (правовые, этические, гигиенические и т.п.) и принципы деятельности. Условия деятельности (материально-технические, финансовые, информационные и т.п.) относятся и к внешней среде, и в то же время могут входить в состав самой деятельности, учитывая возможности активного влияния субъекта на создание условий своей деятельности (например, если не хватает средств на осуществление какого-либо проекта, можно попытаться найти спонсоров, инвесторов – заинтересованные организации, которые его профинансируют и т.д.).

Инвариантным для любой деятельности является следующий набор групп условий: мотивационные, кадровые, материально-технические, научно-методические, финансовые, организационные, нормативно-правовые, информационные.

**Проектно-технологический тип организационной культуры.** Мы живем в проектно-технологическом типе организационной культуры (таблица 1.12) [40].

Еще в XIX веке наряду с теориями проявились такие интеллектуальные организации, как проекты и программы, а к концу XX века деятельность по их созданию и реализации стала массовой. Обеспечиваются они не только и не столько теоретическими знаниями, сколько аналитической работой. Профессиональная

культура за счет своей теоретической мощи породила способы массового изготовления новых знаковых форм (моделей, алгоритмов, баз данных и т.п.), что стало материалом для новых технологий. Эти технологии уже не только вещного, но и знакового производства, а вместе с проектами, программами они являются ведущей формой организации деятельности. Специфика современных технологий заключается в том, что ни одна теория, ни одна профессия не может покрыть весь технологический цикл. Сложная организация больших технологий приводит к тому, что традиционные профессии обеспечивают лишь одну-две ступени больших технологических циклов, а для успешной работы и карьеры человеку важно быть не только профессионалом, но и способным активно и грамотно включаться в эти циклы.

Таблица 1.12 – Характеристика типов организационной культуры (по В.А. Никитину)

Тип организационной культуры	Способы нормирования и трансляции деятельности	Формы общественного устройства, воспроизводящие способ
Традиционная	Миф и ритуал	Коммунальные группы, формируемые по принципу «свой–чужой» на отношениях родства
Корпоративно-ремесленная	Образец и рецепт его воссоздания	Корпорация, имеющая формально иерархическое строение – мастер, подмастерье, ученик
Профессиональная (научная)	Теоретические знания в форме текста	Профессиональная организация, построенная на принципе онтологических (бытийных) отношений
Проектно-технологическая	Проекты, программы (особо крупные проекты) и технологии	Технологическое общество, структурированное по принципу коммуникативности и профессиональных отношений

Для повсеместного распространения проектно-технологического типа организационной культуры существовали объективные причины. К середине XX века была в основном решена главная проблема, довлевшая над человечеством на протяжении всей истории – проблема голода. Человечество, накормив себя (в основном), а также создав для себя благоприятные бытовые условия (в основном), перешло в совершенно новую, так называемую постиндустриальную эпоху развития, когда появилось изобилие продовольствия, товаров, услуг и в связи с этим стала развиваться во всей мировой экономике острейшая конкуренция. Поэтому за короткое время в мире произошли огромные деформации – политические, экономические, общественные, культурные и т.д. Одними из признаков новой эпохи являются нестабильность, динамизм политических, экономических, общественных, правовых и других ситуаций. Все в мире стало непрерывно и стремительно изменяться. И следовательно, практическая деятельность должна постоянно перестраиваться применительно к новым условиям. Инновационность практики стала атрибутом нашего времени.

Если еще несколько десятилетий назад в условиях относительно длительной стабильности образа жизни практические работники – инженеры, врачи, учителя и др. – могли спокойно ждать, пока наука, ученые (а в былые времена и центральные органы власти) разработают новые рекомендации, апробируют их в эксперименте, а потом конструкторы и технологи разработают и апробируют соответствующие конструкции и технологии и лишь тогда дело дойдет до массового внедрения в практику, то такое ожидание сегодня стало бессмысленным. Пока все это произойдет, ситуация изменится коренным образом. Поэтому практические работники естественно и объективно устремились по другому пути – они стали сами создавать инновационные модели социальных, экономических, технологических, образовательных и прочих систем: авторские модели фирм, организаций, школ, авторские технологии, методики и т.д.

Развивавшийся с XVII века профессиональный тип организационной культуры, основой которого являлись письменные тексты в виде учебников, специальной литературы, инструкций, руководств, методических рекомендаций и т.п., где-то в середине XX века сменился в связи с ускорением развития общественных, в том числе производственных, отношений новым типом организационной культуры (естественно, вобравшей в себя все предыдущие) – проектно-технологической культурой.

В этом типе организационной культуры ключевыми становятся понятия *проект*, *технологии* и *рефлексия*. Причем два из них являются как бы противоположными: проект (дословно – брошенный вперед) и рефлексия (дословно – обращение назад).

Традиционное понимание проекта, существовавшее ранее в технике, строительстве и т.д., – это совокупность документов (расчетов, чертежей и др.) для создания какого-либо сооружения или изделия. На смену ему пришло современное понимание проекта как завершенного цикла продуктивной деятельности отдельного человека, коллектива, организации, предприятия или совместной деятельности многих организаций и предприятий.

Каждый проект от возникновения идеи до полного завершения проходит ряд ступеней своего развития. Полная совокупность ступеней развития образует жизненный цикл проекта. Жизненный цикл принято разделять на фазы, фазы – на стадии, стадии – на этапы. При этом под проектированием понимается начальная фаза проекта.

Современная трактовка понятия «технология» – это система условий, форм, методов и средств решения поставленной задачи. Такое понимание технологии пришло в широкий обиход из сферы производства в последние десятилетия. А именно тогда, когда в развитых странах стали выделяться в отдельные структуры фирмы-разработчики ноу-хау: новых видов продукции, материалов, способов обработки и т.д. Эти фирмы стали продавать фирмам-производителям лицензии на право выпуска своих разработок, сопровождая лицензии детальным описанием способов и средств производства – то есть технологиями.

Очевидно, что любой проект реализуется определенной совокупностью технологий.

Важнейшую роль в организации продуктивной деятельности играет рефлексия – постоянный анализ целей, задач процесса и его результатов.

Итак, потребность – это состояние напряжения организма, социальной группы или общества в целом, выражающее зависимость от объективного содержания условий, их существования и развития и выступающее источником (побудителем, стимулом) различных форм активности, направленной на снятие этого напряжения (удовлетворение потребности) [7].

Исходными условиями возникновения потребности являются:

– наличие некоей конфликтной ситуации, обстановки в начальном окружении (недостаток, излишек чего-либо или и то и другое; физическая неспособность, невозможность непосредственного достижения цели человеком);

– противоречие между желаемым и действительным, между реальностью и требованиями, сформулированными на основе опыта эксплуатации, использования ТО и закрепленными в соответствующей нормативной документации.

Задачи, в описании которых отражается несовместимость требований, предъявляемых человеком к создаваемой ТС, представляют собой описание проблемной ситуации в форме противоречия.

К противоречиям относится также проблемная ситуация, в которой предъявляемые требования к продукции не могут быть удовлетворены из-за появления недопустимых нежелательных эффектов (НЭ). В противоречиях может отражаться несовместимость требований, предъявляемых к ТО, и ограничений, которые определяются законами природы, юридическими и экономическими законами, социальными нормами (например, нормами морали).

---

*Первоначальная формулировка проблемы в общем случае выражается следующими терминами: потребность, цель, функция, нежелательные эффекты, технические и потребительские свойства продукции. Она носит социально-технический характер. Поэтому такое описание проблемы можно назвать **социально-техническим противоречием** [31].*

---

Если ТО создан, то часто ставится задача улучшить выполнение его главной полезной функции (ГПФ). Мероприятия, направленные на улучшение ГПФ, как правило, сопровождаются появлением НЭ.

Совершенствование ТО направлено на то, чтобы приблизиться к идеальному техническому решению, но этому мешают законы природы и возникающие факторы расплаты (НЭ). Таким образом, стремление к созданию некоторой полезной функции или улучшению её выполнения, с одной стороны, и стремление избавиться от НЭ (факторов расплаты), с другой стороны, являются источниками противоречий.

Создатель ТРИЗ Г. Альтшуллер назвал такие проблемные ситуации административным противоречием. Следует отметить, что термин «административное противоречие» больше подходит к проблемным ситуациям социотехнических систем, при решении задач бизнеса и управления коллективами. При решении технических задач термин «социально-техническое противоречие», предложенный в [44], точнее отражает суть проблемной ситуации.

Социально-технические противоречия только обозначают проблему и в ряде случаев дают некоторое обоснование ее возникновения. Формулирование социально-технических противоречий – один из вариантов более общего приёма поиска решения – переформулирования условий задачи, это модель задачи, в которой раскрываются полезные и нежелательные эффекты или явления в рассматриваемой проблемной ситуации [31].

В качестве примера на рисунке 1.25 приводится структура противоречия из отрасли технической эксплуатации радиооборудования авиационного и космического транспорта. Эту схему можно обобщить на любую другую сферу человеческой деятельности.

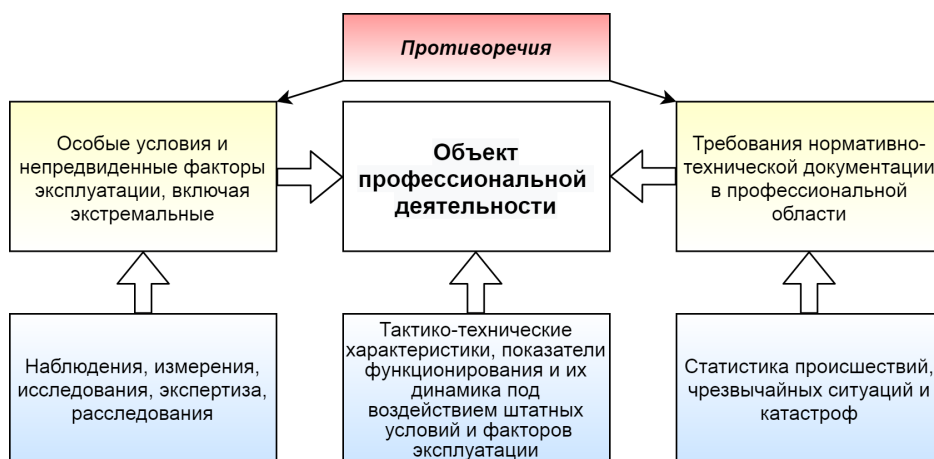


Рисунок 1.25 – Структура противоречия

---

**Краткая формула выявления противоречия [45]:** «Согласно [источник 1] требуется обеспечение (выполнение) [указать техническое требование в явной форме]. В нормальных условиях эксплуатации [конкретно охарактеризовать условия эксплуатации] данное требование выполняется. Однако если имеет место [назвать особые условия, негативные факторы], то [назвать исследуемый объект профессиональной деятельности] не может обеспечить данные требования. Таким образом, существует противоречие между нормативными требованиями технической документации и реальностью, а следовательно, существует потребность (необходимость) в разработке [назвать устройство (систему, комплекс), предназначение которого заключается в выполнении функции, которая выявленное противоречие устраняет]».

---

Конфликтная обстановка отражается в сознании человека как потребность, нужда устранить имеющийся конфликт. Потребность не является непосредственным побудителем действий до тех пор, пока не достигнет того состояния напряжения, которое обычно называют интересом (в психологии – мотивом). Интерес всегда направлен к цели. Интересы формируются в условиях внешних ограничений,

вызванных как особенностями данной социальной группы, так и рядом других факторов.

Одной из известных моделей потребностей является пирамида человеческих потребностей, которую предложил американский психолог Абрахам Маслоу в середине XX века (рисунок 1.26) [46].



Рисунок 1.26 – Иерархическая модель потребностей человека по Абрахаму Маслоу

В контексте человеческих потребностей технические системы являются вспомогательными средствами удовлетворения этих потребностей. Природная ограниченность биологических, физиологических, физических, чувственных и других способностей человека является главным фактором возникновения потребности в создании вспомогательных технических систем.

Мы усиливаем и расширяем возможности человеческого зрения телескопами, электронными микроскопами, приборами ночного видения и радиолокационными системами, увеличиваем физическую силу с помощью роботизированных и экзоскелетонных систем и комплексов, улучшаем качество коммуникации посредством мобильных телефонов, делаем комфортными условия своего существования с помощью таких систем и технологий, как интернет вещей (Internet of Things) и умный дом, и т.д. Таким образом, приходим к выводу, что технические средства, в частности ЭРЭС, – это средства, расширяющие, усиливающие и улучшающие природные возможности человека в достижении его целей. Некоторые примеры потребностей

человека и технических систем, удовлетворяющих эти потребности и функционирующих на принципах электроники, радиотехники и вычислительной техники, приведены в таблице 1.13.

Таблица 1.13 – Потребности человека и некоторые примеры удовлетворяющих эти потребности технических систем, функционирующих на принципах электроники, радиотехники и вычислительной техники

Уровень иерархии потребности	Категория технических средств	Функция технических средств	Пример представителя категории ТС
Физиологические потребности	Управляющие ТС	Поддержание здоровья человека	Аппарат искусственной вентиляции лёгких Аппарат искусственного кровообращения (АИК) Аппарат «искусственное сердце – лёгкие»
	Вспомогательные ТС	Усилитель слуха	Слуховой аппарат
		Восполнение потерянной функции зрения, улучшение пространственной ориентации и мобильности	Бионический глаз, электронный имплантат сетчатки
		Поддержание здоровья человека	Электронные развивающие тренажеры (кардиотренажер, велотренажер и т.д.)
Потребность в безопасности	Информационные ТС	Разрушение информации	Самолётная станция постановки радиопомех, устройства изменения голоса (голосовая маска, voice changer)
		Шифрование и дешифрование, кодирование	Голосовой скремблер Кодер Транслятор
		Информирование, сигнализация	Автомобильная сигнализация
		Извлечение информации	Технические средства досмотрового контроля (арочные, рамочные и ручные металлодетекторы)
	Наблюдательные ТС	Наблюдение за объектами и процессами, охрана объектов	Охранная система видеонаблюдения
	Управляющие ТС	Автоматическая доставка поражающего снаряда до места дислокации сил противника	Система самонаведения ракеты



Продолжение таблицы 1.13

Уровень иерархии потребности	Категория технических средств	Функция технических средств	Пример представителя категории ТС
Потребности в принадлежности и любви	Эстетические ТС	Развитие чувства материнства	Японская электронная игра «Tamagotchi» (виртуальный питомец)
		Удовлетворение потребности в принадлежности и любви	Цифровая фоторамка
Потребность в уважении	Эстетические и информационные ТС	Удовлетворение потребности в уважении и любви	Электронные музыкальные инструменты (электронный синтезатор), средства технического и аудиовизуального искусства
Потребность в познании окружающего мира	Информационные ТС	Извлечение информации	Радиотелескоп, электронный микроскоп
		Информирование	Радио Телевизор
	Информационные и контролирующие ТС	Обмен информацией, идентификация	RFID-метки
	Информационные и вспомогательные ТС	Информирование, хранение информации	Google Glass Электронная книга Электронный планшет Смартфон
	Информационные ТС	Извлечение, регистрация, накопление, обработка и хранение данных и информации	ТС на основе искусственного интеллекта
	Информационные и измеряющие ТС	Извлечение информации; измерение параметров процессов распространения электромагнитных волн в среде, их рассеяния и отражения объектами исследования	Система активной радиолокации, система пассивной радиолокации
		Измерение физической величины электрических полей, образующихся при работе органов и тканей человеческого тела,	Электрокардиограф Электроэнцефалограф Электромиограф Электроокулограф Электронные весы

Продолжение таблицы 1.13

Уровень иерархии потребности	Категория технических средств	Функция технических средств	Пример представителя категории ТС
		и регистрация данной информации на физическом носителе	
		Измерение физических и физиологических параметров человеческого организма	Электронный динамометр
	Информационные и управляющие ТС	Манипуляция физическими объектами, их транспортировка	Роботизированные комплексы, автономные роботы, автоматизированные сборочные линии, беспилотные летательные аппараты с искусственным интеллектом
		Автоматическое пилотирование авиационных, сухопутных, надводных, подводных, космических транспортных систем	Системы автоматического пилотирования
Информационные, измеряющие и наблюдательные ТС	Определение направления взгляда человека или животного в исследованиях зрительной системы, задачах психологии и когнитивной лингвистики	Очки для айтрекинга (eyetracking glasses), отслеживатель глаз, айтрекер (eyetracker)	
Эстетические потребности	Эстетические ТС	Удовлетворение эстетических потребностей	Электроакустические средства (mp3-плеер, акустическая система), средства технического и аудиовизуального искусства (электромеханические, мехатронные, аниматронные скульптуры, параметры физического состояния которых есть функция от окружающих условий среды) ТС на основе искусственного интеллекта, создающие произведения музыкального, визуального, литературного и художественного искусства

Окончание таблицы 1.13

Уровень иерархии потребности	Категория технических средств	Функция технических средств	Пример представителя категории ТС
Потребность в самоактуализации	Эстетические и информационные ТС	Самоактуализация человека и развитие когнитивных навыков	Электронные музыкальные инструменты (электронный синтезатор), средства технического и аудиовизуального искусства Компьютерные игры Электронные развивающие тренажеры

Необходимо отметить, что в силу большого количества других потребностей, не отраженных в иерархии Маслоу, и соответствующих им технических систем данная таблица не претендует на абсолютную полноту и всеохватность. Она лишь призвана показать некоторые примеры соответствия наиболее распространённых потребностей и удовлетворяющих эти потребности технических систем, а также то, насколько масштабен мир современных технических средств, работающих на принципах электроники, радиотехники и вычислительной техники (приложение 4). Кроме этого, таблица 1.13 позволяет сформировать достаточно полное представление о том, как соотносятся друг с другом фундаментальные понятия множества человеческих потребностей, множества технических средств и функций этих ТС.

Потребности также можно классифицировать по следующим основаниям:

- по источнику возникновения – личные, общественные, государственные, корпоративные;
- по средству удовлетворения – технические, организационные, юридические, образования и др.;
- по области деятельности – культурные, экологические, социальные, производственные, духовные, научные и др.;
- по времени существования – постоянные (определяются естественными причинами), временные (определяются модой и текущими трендами);
- по масштабу – единичные, массовые, глобальные.

---

*При обосновании потребности в проектировании технического объекта необходимо принимать во внимание перечисленные выше свойства этих потребностей.*

---

Личные потребности, являющиеся врождёнными сущностными силами, внутренне связаны между собой в одну естественную систему, причём связи между ними и сила каждой потребности изменяются в течение жизни человека.

Общественные потребности как элемент общественного сознания проявляются через многие социальные факты общественной жизни:

- технические потребности – новые изделия и технологии, модернизация существующих технических систем и объектов;

- организационные потребности – новые предприятия, подразделения, функциональные и структурные изменения, поощрения и др.;
- юридические потребности – новые законы, нормативы и правила, изменение или отмена устаревших законов, процессуальные изменения;
- потребности образования – новые знания, изменение целей обучения, новые методы, технологии и средства обучения и др.;
- экологические потребности – безотходные технические системы и производственные технологии замкнутого цикла и т.д.

На рисунке 1.27 показаны источники возбуждения разных потребностей.

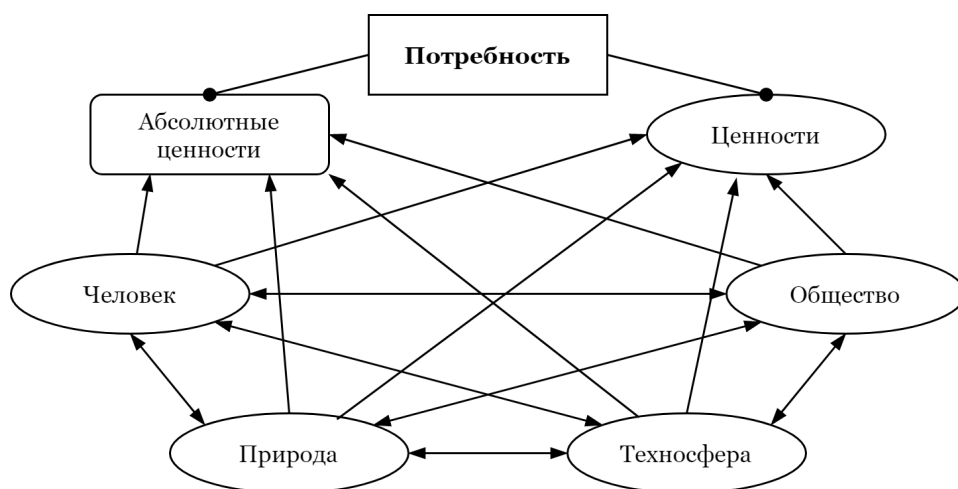


Рисунок 1.27 – Источники возбуждения потребностей

## 1.3 Выявление и исследование потребностей в проектной деятельности

### 1.3.1 Анализ дихотомии существования технической системы и потребности в её проектировании

Для понимания сути вопроса обоснования потребности рассмотрим рисунок 1.28, на котором приведена диаграмма, показывающая отношение между потребностью в технической системе и технической системой в смысле дихотомии их существования [47].

Вертикальная ось характеризует «существование–не существование» потребности в проектировании (П) технической системы, а горизонтальная ось – «существование–не существование» технической системы (ТС), эту потребность удовлетворяющей. В данном пространстве имеет место четыре возможных сочетания, обозначенных цифрами:

1 – потребность в проектировании ТС существует, но ТС, удовлетворяющая эту потребность, не существует;

- 2 – потребность в проектировании технической системы и сама техническая система существуют;
- 3 – потребность в проектировании технической системы не существует, но сама техническая система существует;
- 4 – потребность в проектировании технической системы и сама техническая система не существуют.

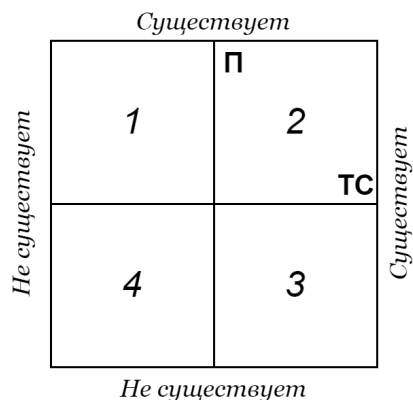


Рисунок 1.28 – Отношение между потребностью в проектировании технической системы и технической системой в смысле дихотомии их существования

Первая ситуация характерна для случаев появления новых потребностей, когда сама потребность существует и выявлена, но система, удовлетворяющая ее еще никогда не была создана. В данном случае задача проектировщика заключается в создании новой технической системы и в поиске новых физических принципов её действия.

---

*В качестве примера можно привести изобретение беспроводного телеграфа А.С. Поповым в 1897 г. В этом случае потребность общества заключалась в необходимости передачи информации на большие расстояния без использования проводов. Достоинства такого способа передачи информации очевидны: экономия материалов, автономность приемо-передающих систем и удобство их эксплуатации, относительная надёжность (обрыв проводной линии приводит к отказу системы связи, тогда как у беспроводного телеграфа нет такого недостатка: радиоволны практически беспрепятственно преодолевают радиопрозрачные преграды). Новый физический принцип действия заключался в генерировании передатчиком высокочастотных электромагнитных колебаний, которые излучались в пространство посредством антенны определенной конструкции, а затем принимались в географически удалённом пункте посредством такой же антенны и особого чувствительного элемента, изменявшего свои электрофизические свойства под воздействием электромагнитных волн определенной частоты. Необходимо отметить, что изобретение беспроводного телеграфа*

*стало возможным, благодаря опыту Г. Герца в 1887 году, в результате которого немецким ученым было доказано существование электромагнитных волн. Таким образом, между открытием нового физического явления и его первым прикладным использованием в реально функционирующей технической системе, служащей на благо общества, прошло десять лет. В современном мире фактор времени становится определяющим с точки зрения целесообразности разработки ТС: чем короче промежуток времени между появлением потребности в ТС и началом реализации готового изделия, тем больше экономический эффект от разработки ТС.*

---

Вторая ситуация имеет место, когда потребность общества в технической системе постепенно эволюционирует, а сама система за тот же период времени не совершенствуется и перестает удовлетворять требованиям общества. При этом возникает задача модернизации, совершенствования параметров ТС, а также подбора существующих более эффективных или открытия новых физических принципов действия.

*Примером такой ситуации является единый в пределах России переход с аналоговой системы телевизионного вещания на цифровое телевидение. Недостатки аналоговой системы очевидны: малая помехозащищённость, затратность, большая трудоемкость эксплуатации из-за невозможности полной автоматизации подсистем и несовместимость с цифровыми информационными системами.*

---

Третья ситуация характерна для технических систем, потребности в которых существовали ранее, но не существуют (или существуют в очень малом масштабе и в очень специфических областях человеческой деятельности) в настоящее время. Такие технические системы теперь можно найти только в радиотехнических музеях и музеях электронной техники. Как правило, к ТС, потребность в которых давно исчезла, относятся вспомогательные технические устройства, предназначенные для обеспечения функционирования других устаревших технических систем.

*Примером технических систем, у которых сегодня нет прямых функциональных потомков, является пейджинговая система связи, или сеть персонального радиовызова, под которой понимают систему односторонней беспроводной передачи сообщений. К этой системе относятся тональные биперы, пейджеры и твейджеры.*

*Тональный бипер – устройство, способное издавать однообразные звуки, несущие закодированную информацию. Пейджер – беспроводный радиоприёмник персонального вызова. Твейджер – пейджер с двухсторонней радиосвязью.*

---

Четвертая ситуация, когда ни ТС, ни потребность в ней не существуют, как правило, характеризует потенциальную возможность существования или появления

новых потребностей, а следовательно, и новых ТС. В данном случае перед проектной группой возникают две задачи:

1) выявление потребностей, которые уже существуют, но ещё не осознаны в достаточной мере обществом;

2) прогнозирование будущих потребностей общества, которые могут быть реализованы с помощью технических систем, работающих на принципах электроники, радиотехники или принципах, которые только предстоит открыть [48].

Решение этих двух задач при условии объединения тщательных исследований малейших изменений состояния и поведения общества, а также в области психологии социального потребления, прогнозирования потенциальных потребностей социума, проведения опережающих фундаментальных научных исследований, проектного планирования и соответствующих маркетинговых акций и рекламных кампаний может в будущем послужить причиной громкого коммерческого успеха компаний-разработчиков и производителей продукции. Именно четвертая ситуация является ключевым условием для опережающего технического развития инновационных компаний, обществ и государств.

Однако стоит отметить, что подобная деятельность связана со сверхрисками, которые при условии неграмотного и этически некорректного подхода могут привести к крупным финансовым потерям и даже к краху целых компаний. В истории человечества также имеют место случаи изобретений, появление которых на рынке опережало психологическую готовность социума к их внедрению и использованию, в результате чего изобретение забывалось и появлялось снова только через несколько десятилетий.

В таблице 1.14 приведены примеры одних из самых неуспешных инновационных проектов [49].

Таблица 1.14 – Неуспешные проекты

Название проекта	Краткое описание проекта	Финансовые затраты	Причины неудач
Карманный персональный компьютер Newton	Apple Newton или просто Newton одна из первых серий карманных персональных компьютеров. Разрабатывалась, производилась и продавалась фирмой Apple Computer с 1993 по 1998 г. Устройство, хотя и было монохромным, поддерживало стилус и умело распознавать рукописный ввод. Для начала 1990-х годов подобная технология была настоящим прорывом	Около \$792 млн	Высокая цена устройства (которая поднялась до \$1000 во время появления моделей «2000» и «2100»), а также его размеры (они не проходили тест на «карманность» – устройство не помещалось в обычный карман плаща, рубашки или брюк). Критики также ругали распознавание рукописного ввода

Окончание таблицы 1.14

Название проекта	Краткое описание проекта	Финансовые затраты	Причины неудач
3D-принтер Peachy Printer	Идея Райлана Грейстона и Дэвида Бо заключалась в создании бытового 3D-принтера. Для её реализации было спроектировано компактное устройство под названием Peachy Printer, которое должно было продаваться как набор, чтобы каждый пользователь мог собирать и настраивать принтер под решение своей конкретной задачи. Этот принтер мог печатать даже цветные объекты. Цена принтера была объявлена на уровне всего в \$100	Цель: \$50 тыс. Собрано: более \$650 тыс.	Дэвид Бо потратил большую часть собранных денег на строительство собственного дома. В связи с тем, что у компаньонов не было общего счета, все средства, собранные на Kickstarter, попадали на счет Дэвида Бо. Когда Райлан попросил вернуть ему собранные деньги, Дэвид перечислил всего \$200 тысяч. Прежде чем обратиться в полицию, Райлан решил обратиться к совести товарища и потребовал, чтобы он признался в краже и вернул деньги с процентами
Бесконтактный сенсорный игровой контроллер Kinect	Инновационный игровой контроллер, использующий технологию отслеживания движений для игровой приставки Xbox360 и впоследствии Xbox One	\$500 млн на маркетинговый бюджет, бюджет на разработку неизвестен. Источник финансирования – компания Microsoft	Слабая поддержка устройства после выхода на рынок. Технологическая несовершенство. Специфичность технологии. Неудачная маркетинговая политика Microsoft. Сложности с разработкой

Исследование потребностей имеет целью возможно шире определить множество потребностей, для удовлетворения которых целесообразно составить общую программу выбора и разработки систем. Перед тем как принимать решение об удовлетворении отдельной потребности, обычно необходимо специальное и более подробное исследовательское планирование [50].

При планировании общей программы исследование потребностей иногда начинается с попыток выяснить, чего хотят конечные, промежуточные и непосредственные потребители системотехнических работ. Другой путь – посмотреть, какие частные критерии потребности вытекают из потенциальных общих нужд клиента. Оба метода приводят к четырем основным направлениям планирования проектов:

- 1) расширение функциональных возможностей или обновление имеющейся функции;
- 2) улучшение технических характеристик;
- 3) снижение стоимости;



4) улучшение внешних качеств.

Расширить функциональные возможности означает заставить систему выполнять больше функций, чем она делала раньше, или исполнять функции, которых ранее у нее не было.

---

**Примеры:**

1) система аналого-цифрового телевидения имеет расширенную функцию, так как может принимать сигналы как аналогового, так и цифрового телевизионного вещания;

2) электрическое одеяло;

3) телефон с режимом конференц-связи;

4) радиобудильник.

---

Улучшить технические характеристики ТС означает сделать её более долговечной, более надежной, более безопасной или легкой в эксплуатации и ремонте, способной удовлетворять более высоким стандартам.

---

**Примеры:**

1) модернизация компьютерной видеокарты для повышения её быстродействия и производительности;

2) в области записи и воспроизведения звука переход от проволоки к восковым цилиндрам, от восковых цилиндров к виниловым пластинкам, от виниловых пластинок к магнитной ленте, от магнитной ленты к современным типам flash- и SSD-памяти;

3) модернизация вашего персонального компьютера, когда вы время от времени покупаете более совершенные комплектующие, т.е. производите «апгрейд системы» по частям (заменяете свой старый процессор на новый более производительный и вместе с ним меняете систему охлаждения на более мощную; ставите больший объем оперативной памяти и жесткий диск с большей информационной вместимостью и т.д.);

4) замена электронной компонентной базы объемного монтажа на электронную компонентную базу поверхностного монтажа уменьшает массогабаритные показатели устройств и систем.

---

Снижение стоимости не требует объяснения. Планирование проектов в этом направлении проводится почти непрерывно, поскольку оно вытекает из постоянной потребности в уменьшении расходов. Большинство ТС долговременного действия реконструируется в какой-то момент, чтобы использовать в них новые и более дешевые материалы, устройства, схемы или производственные методы.

Проекты улучшения внешних качеств имеют в виду главным образом конечного потребителя, так как их цель – сделать продукт или услугу более привлекательными для покупателя, изменив их вид, форму, упаковку или увеличив удобство использования.

---

*Пример: обновление линеек смартфонов от ведущих фирм и производителей раз в два-три года.*

---

Иногда промышленный дизайнер рассматривает эти вопросы как свое исключительное достояние. Однако если требуется более тонкая модель корпуса смартфона, то дизайнер не сможет разработать её, пока, к примеру, схемотехник не предложит использовать более компактные компоненты электрической принципиальной схемы, такие как аккумуляторная батарея, микропроцессор, датчики и т.п. Это в свою очередь зависит от развития таких областей науки и техники, как проектирование и разработка электронной компонентной базы, материалы и компоненты ЭРЭС, материаловедение, физико-химические технологии электронных средств и т.д.

Понятие потребности важно по трём причинам. Во-первых, потребность есть причина любой человеческой деятельности, причина решения задачи. В случае фундаментального научного исследования потребность, как правило, бывает личной и проявляется во внутреннем побуждении. Напротив, фактором, стимулирующим системотехнические изыскания, служит общественная потребность, получившая межличностное выражение как нечто нужное, желательное или полезное широкому кругу людей. Во-вторых, удовлетворение потребности есть итог или цель решения задачи. Так как при выборе и разработке систем целью является новая техническая система, соответствующая определенному окружению, то системотехник должен выводить требования к новым системам из данных, которые он собирает о потребности. В-третьих, так как потребность есть причина проектирования и изготовления изделия, то требования к качеству этого изделия должны быть ею и обусловлены [50].

Подход системотехника к исследованию потребностей должен быть максимально объективным. Главный шаг при выяснении того, что нужно людям, определяется просто: нужно спросить их самих. Однако при этом возникает множество проблем, касающихся объективности и точности формулировок ответов опрашиваемых, а также количественной и качественной измеримости результатов подобного опроса. В некоторых случаях опрашиваемый действительно не знает, чего хочет, или не скажет, или скажет то, что, по его субъективному мнению, вы хотите услышать, или неправильно поймет вопрос, или попытается вас обмануть. При попытках определить, чего хочет какая-то конкретная социальная группа, эти трудности возрастают, причем количество трудностей зависит прямо пропорционально от размера опрашиваемой группы.

Несмотря на такие проблемы, исследователи нашли много способов получения надёжных и воспроизводимых результатов. К основным способам относятся:

- заранее апробированное интервью;
- анкетирование со специальными проективными вопросами;
- получение в течение некоторого периода времени обратной связи в виде ответов, реакций, замечаний, пожеланий от всех пользователей опытного образца проектируемой ТС. При этом группа таких пользователей должна быть достаточно

компактной, но в то же время репрезентативной относительно генеральной совокупности индивидов заданной категории, а сами пользователи должны быть выбраны случайным образом.

### 1.3.2 Исследование окружения технической системы

Для конкретной ТС окружение есть множество всех предметов вне системы, изменение признаков которых влияет на систему и признаки которых изменяются вследствие поведения системы [50].

Общая проблема выделения окружения ТС далека от тривиальности. Для того чтобы описать окружение полностью, необходимо знать все факторы, воздействующие на систему или испытывающие воздействие с её стороны, – задача не менее трудная, чем полное описание самой системы. Как во всяком научном исследовании, мы включаем в мир системы и ее окружения все те предметы, которые нам кажутся наиболее важными, описываем связи между ними возможно точнее и уделяем главное внимание наиболее интересным признакам, пренебрегая теми, которые не играют существенной роли. Это называется методом абстрагирования или идеализации. Примерами могут быть резистор с «чистым» омическим сопротивлением, конденсатор с бесконечным сопротивлением для постоянного тока, катушка индуктивности без омического сопротивления провода и т.п.

Нас будут интересовать факторы окружения, которые диктуют требования к искусственным, созданным человеком системам. Эти факторы несколько различаются в зависимости от области проектирования. Из относительно универсальных факторов отметим:

- состояние технологии;
- естественное окружение (климат, растительность и т.д.);
- политику организации, предприятия, фирмы;
- экономические условия для новых систем;
- человеческие факторы.

При исследовании окружения ТС необходимо принимать во внимание широкий контекст отношений компонентов макросистемы «общество–экономика–наука и техника» (рисунок 1.29) и проанализировать следующие вопросы [6]:

- какими факторами определяется развитие общества;
- каким образом текущее состояние общества определяет потребности в данной

ТС;

- какое влияние оказывает данная ТС на развитие общества, науки и экономики;
- как влияет прогресс науки и техники на эволюцию потребностей общества

в части использования данной ТС?

Создавая техническую систему для удовлетворения некоторого множества потребностей, мы не просто проектируем систему, вводимую в окружение, но и обнаруживаем, что она определяется окружением. По существу, успех проектирования измеряется близостью соответствия, т.е. степенью интеграции с окружением.

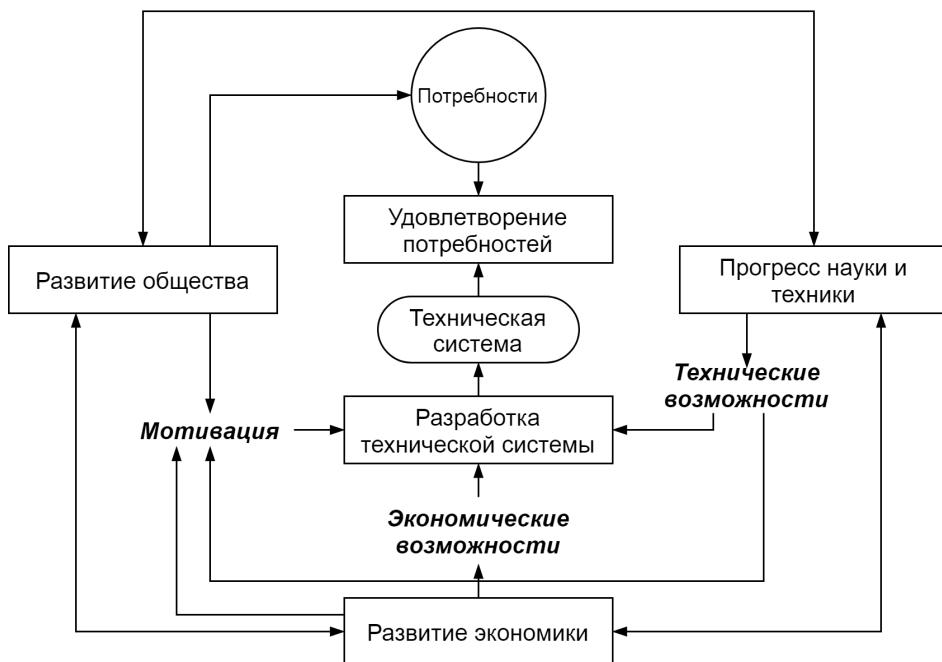


Рисунок 1.29 – Отношения в макросистеме «общество – экономика – наука и техника»

Исследование окружения имеет целью понять и описать окружение и предсказать его краткосрочное и долгосрочное будущее. В частности, оно включает внимательный, критический анализ всего окружения в поисках новых идей, методов, теорий, материалов, устройств или схем, которые можно было бы использовать для удовлетворения потребностей. Системные изыскания, состоящие главным образом из исследования потребностей и исследования окружения, должны представить новые открытия и открытые потребности в правильной перспективе. Они аналогичны построению таблицы химических элементов. Именно здесь впервые происходит пробное сопоставление факторов окружения и потребностей в них.

С точки зрения системотехника, совокупное окружение довольно отчетливо делится на три главных сектора:

- 1) физическое и техническое окружение;
- 2) коммерческое и экономическое;
- 3) социальное.

*Физическое и техническое окружение:*

- существующие системы;
- методы для существующих систем;
- принятые технические стандарты;
- состояние технологии;
- природное окружение;
- переходные факторы;
- настоящие и будущие разработки;

– внешние технические факторы.

*Экономическое и коммерческое окружение:*

- структура организации;
- кадры организации;
- политическое окружение;
- действия государства;
- предлагаемые системы и структуры их цен;
- экономические условия для новых систем;
- коммерческие операции.

*Социальное окружение:*

- макроскопические социальные факторы;
- индивидуальные человеческие факторы.

### 1.3.3 Перечни контрольных вопросов Мэтчетта

В системотехнике очень большое внимание уделяется совершенствованию методологии, технологий, методов, методик, техник и процедур мыслительной деятельности проектировщика для стимулирования инновационного, оригинального и нешаблонного мышления, увеличения эффективности поиска решений сложных задач и ликвидации состояния психологической инерции [7].

Один из таких методов – фундаментальный метод проектирования – был разработан английским специалистом в области методологии проектирования Е. Мэтчеттом [51]. Цель метода заключается в том, чтобы научить проектировщика понимать и контролировать свой образ мыслей и более точно соотносить его со всеми аспектами проектной ситуации. Метод резко повышает мастерство проектировщика за счет сознательного управления процессом мышления.

В методе Мэтчетта используются перечни контрольных вопросов для исследования потребностей. Вопросы представляют собой развитие обычных в анализе трудовых операций вопросов: «что?», «почему?», «когда?» и т.д. Часто их комбинируют парами, что позволяет получить большое разнообразие более конкретных вопросов.

1. Какие потребности являются:

- жизненно важными;
- очень важными;
- важными;
- желательными?

2. Каковы потребности:

- функциональной системы;
- потребителя;
- фирмы (предприятия);
- внешнего мира?

3. Какие потребности сопровождают каждый из перечисленных ниже этапов существования изделия:

- проектирование и детализовка;

- отработка;
- изготовление деталей;
- сборка;
- испытание и отладка;
- окончательная отделка и упаковка;
- сбыт;
- транспортировка;
- хранение;
- монтаж;
- эксплуатация и неправильное использование;
- техническое обслуживание и уход;
- ремонт;
- утилизация?

4. Какие сведения можно получить, если задать шесть основных вопросов анализа трудовых операций:

- что нужно сделать (потребности);
- почему это нужно сделать (причина);
- когда это нужно сделать (время);
- где это нужно сделать (место);
- кем или с помощью чего это должно быть сделано (специалисты и средства);
- как это сделать (метод)?

5. Каким образом каждую часть проекта можно:

- исключить;
- объединить с другими;
- унифицировать;
- перенести;
- модифицировать;
- упростить?

Данный комплекс вопросов позволяет выявить множество альтернативных потребностей.

### 1.3.4 Перечни контрольных вопросов Холла

Системотехнические и проектные группы иногда попадают в затруднительное положение из-за проблем, которые не были предвидены в фазах планирования [50]. Большой частью такие проблемы связаны с вопросами, которых никто не ставил, или ответами, которых никто не искал. Эти просчеты, вероятно, появляются чаще тогда, когда создается новая система с расширенной функцией, т.е. впервые испытывается нечто действительно новое. При модификации функционально старой системы для улучшения характеристик, снижения стоимости или повышения спроса проектировщики лучше подготовлены к возможным ситуациям неопределенности. Перечни вопросов Холла позволяют предвосхитить такие затруднительные проектные ситуации и своевременно принять необходимые предупреждающие меры.

Вопросы сгруппированы в шесть перечней:

- 1) общие цели, относящиеся к потребности;
- 2) ресурсы и ограничения организации;
- 3) характеристика рынка;
- 4) условия конкуренции;
- 5) предпочтения, привычки и мотивы потребителей;
- 6) конструктивные требования, вытекающие из исследования потребностей.

Перечень вопросов № 1 по общим целям, относящимся к потребности, предназначен для руководства отбором новых продуктов и услуг, хорошо продуманных и полезных в том широчайшем смысле, что они занимают определенное место на шкале человеческих нужд. Перечень помогает наметить для конкретной организации с учётом её текущего положения возможности выпуска новых продуктов.

### **Перечень вопросов № 1. Общие цели, относящиеся к потребности**

1. Относится ли новая идея к продукту или к услуге? (Далее слово «продукт» будет означать и то и другое.)

2. Удовлетворяет ли продукт новую потребность? Приводит ли он к новым функциям?

3. Удовлетворяет ли он существенную или постоянную потребность более эффективно, например с меньшей стоимостью, с лучшим качеством или с большей привлекательностью?

4. Открывает ли он новую линию продуктов или завершает старую?

5. Состоит ли цель в открытии нового рынка или в расширении существующего? (Это не то же самое, что и предшествующий вопрос.)

6. Состоит ли цель в более эффективном использовании средств производства или распределения, рабочей силы и сырья или в устранении нехватки этих факторов?

7. Устраняет ли продукт затруднение сам или увеличивает надежность существующего продукта?

8. Использует ли продукт какое-либо новое устройство, теорию, материал, метод или какой-либо другой элемент новой технологии, если да, то с каким из вышеприведенных вопросов можно связать это применение?

Перечень вопросов № 2 просеивает возможности в соответствии с ресурсами и ограничениями организации. Эти ресурсы можно назвать грубыми критериями принятия новых возможностей.

Вопросы перечня № 2 должны служить руководством для критической оценки организации с точки зрения производства нового продукта или услуги. Всякий дефицит влечет сокращение диапазона возможностей. Каждая возможность классифицируется по её способности пройти испытание, заключенное в вопросах. Возможности, прошедшие это испытание, в дальнейшем необходимо подвергнуть более тонкому просеиванию, состоящему в тщательной оценке продукта с точки зрения рынка.

## **Перечень вопросов № 2. Ресурсы и ограничения организации**

1. Какую широту допускает устав корпорации в новых начинаниях? Нужна ли юридическая консультация для выяснения общей юридической атмосферы?
2. Будет ли реакция акционеров, администрации и правительства благоприятна для нового предприятия?
3. Можно ли получить для продукта патенты, авторские права и фабричные марки посредством заявки, покупки или обмена?
4. Может ли организация использовать существующую технологию, в которой она уже обладает правами и опытом?
5. Сколько потребуется нового капитала и имеются ли избыточные фонды для освоения выпуска нового продукта?
6. Как будет распределен капитал между оснащением производства, исследованием и разработкой, недвижимостью, энергией, транспортом, связью и другими статьями расходов?
7. Достаточно ли гибка финансовая политика и в состоянии ли организация собрать и распределить необходимые фонды? Благоприятна ли деловая конъюнктура для сбора фондов?
8. Имеются ли в организации таланты необходимой широты и глубины для разработки продукта или их можно привлечь?
9. Какие части проекта надо будет отдать субподрядчикам (обзор рынка, внешнее оформление, упаковка, изготовление и т.д.)?
10. Имеются ли необходимые ресурсы рабочей силы, времени и лабораторных средств или их можно получить? Можно ли их сосредоточить достаточно быстро, чтобы выполнять требования рынка?
11. Достаточноны и пригодны ли для нового продукта наличные средства – рабочая сила, машины, пространство, логистика – или потребуются новые?
12. Является ли необходимой предпосылкой исследование и разработка производства, если да, то какие из предшествующих вопросов сюда относятся?
13. Потребуется ли новые или необычные сырые материалы, если да, то можно ли обеспечить достаточное и надежное снабжение по сходным и устойчивым ценам?
14. Имеются ли заменители для непредвиденных обстоятельств?
15. Потребуется ли затраты на транспорт и хранение изменений в существующем порядке?

Вопросы перечня № 3 привлекают внимание к конкретному рынку, для которого проектируется новая система. Лишь очень немногие продукты имеют универсальное значение, обычно область применения весьма ограничена.

## **Перечень вопросов № 3. Характеристика рынка**

1. Какие классы населения, отраслей промышленности, предприятий и учреждений будут применять продукт?
2. Сколько потребителей будет в каждом классе?



3. Где расположен рынок, т.е. каково его географическое распределение и протяженность для каждого класса потребителей?

4. Когда нужен продукт и можно ли измерить степень его срочности?

5. Каковы перспективы роста? Каковы оценки начального спроса, скорости расширения, времени насыщения, скорости сокращения и срока существования рынка?

6. Среди каких классов и в каких местах сбыта можно получить наилучший график развития рынка?

7. Какие из нижеперечисленных факторов можно и нужно выделить и измерить для долгосрочных и краткосрочных прогнозов: цену продукта, цену родственных продуктов, доход потребителя, его образование, семейное положение, возраст, пол, занятие и т.д.?

8. Какие факторы из указанных в предыдущих вопросах ограничивают рынок?

9. Требуется ли для развития рынка реклама, если да, то какая, когда, где, насколько продолжительная и дорогая?

10. Существуют ли на рынке какие-либо важные тенденции во вкусах, росте производительности и т.п.?

Конкуренция логически относится к характеристикам рынка, но ввиду её важности факторы, относящиеся к конкуренции, перечислены отдельно в следующем перечне вопросов № 4.

#### **Перечень вопросов № 4. Условия конкуренции**

1. Является ли конкуренция внутренней, т.е. между продуктами данной организации, или внешней, т.е. между продуктами разных организаций?

2. Имеет ли предлагаемый продукт внутренние или внешние заменители?

3. Какие факторы участвуют в конкуренции (цена, качество или другие свойства)?

4. Каковы тактики и стратегии конкурирующих организаций и их ресурсы?

5. Как быстро могут реагировать конкуренты выпуском конкурирующих продуктов и может ли это создать угрозу ощутимого морального устаревания планируемого продукта?

6. Можно ли победить конкурентов снижением цен, рекламой, улучшением продукта или другими средствами?

Из ответов на вопросы первых четырех перечней будет видно, является ли продукт хорошо продуманным и полезным, имеются ли препятствия, вызванные недостаточностью ресурсов организации, и существует ли устойчивый и прибыльный спрос. На первых шагах полнота информации важнее точности.

Когда предметом планирования являются сложные ТС со временем опережения 5–10 лет, то их коммерческое или военное окружение через указанный срок нельзя представить столь же подробно, как если бы речь была о настоящем времени. Вместо этого полезнее рассматривать вопросы несколько раз в ходе разработки. Первое рассмотрение должно быть лишь предварительным обзором. Окончательное

рассмотрение должно быть глубоким и подробным исследованием, и нужда в нем возникает лишь перед действительным изготовлением и продажей ТС.

Перечни вопросов № 5 и № 6 относятся непосредственно к самому продукту и предназначены для формулировки конструктивных требований. Для этого необходимо исследовать участников рынка на изменчивость.

#### **Перечень вопросов № 5. Предпочтения, привычки и мотивы потребителей**

1. Почему кто-либо будет покупать продукт (ввиду его полезности, для выживания, собственного удовольствия, наживы, для удовлетворения духа соревнования или эстетического чувства)?

2. Каковы все использования продукта? Зависят ли они, как указано в перечне вопросов № 3, от классов потребителей?

3. Когда используется продукт (непрерывно, ежедневно, сезонно)? Будет ли в использовании продукта или услуги участвовать несколько лиц? Если да, то можно ли предсказать распределение времени прибытия?

4. Какова длительность каждого случая использования? Можно ли предсказать распределения времени обладания (или обслуживания)?

5. Какое относительное значение приписывают индивиды различным параметрам качества, цене, удобству, размеру, форме, весу, стилю?

6. Какие требуются дополнительные антропотехнические данные о зрительных, слуховых, осязательных и других свойствах потребителей?

7. Каковы предпочтения потребителей по отношению к альтернативным структурам цен, условиям кредита и оплаты?

#### **Перечень вопросов № 6. Конструктивные требования, вытекающие из исследования потребностей**

1. Каких конструктивных особенностей требует рынок? Если требуемая система подобна какой-либо существующей, то какие эксплуатационные, ремонтные и другие особенности надо сохранить?

2. Каковы независимые переменные системы при выбранных особенностях и какая область значений каждой из них удовлетворяет важнейшие рыночные применения?

3. Если существуют применимые технические стандарты, то согласуются ли они со значениями требуемых переменных системы или необходимо разработать новые стандарты?

4. Каков полный перечень связей с потребителями и каково полное техническое описание каждой связи?

5. Существует ли какое-либо предпочтение в отношении операций и устройств, необходимых для реализации желательных особенностей?

6. Надо ли проектировать систему для рынка с определенными характеристиками (групповой или массовый рынок, особое географическое положение или другие секторы рынка) или требуется универсальная система?

7. Каким предпочтениям потребителей, указанным в перечне вопросов № 5, должна соответствовать конструкция (размер, форма, качество, материалы)?

8. Каковы желания и предрассудки рынка в отношении безопасности, возможности мелких конструктивных изменений, простоты и срока службы оборудования?

9. В какой мере оборудование будет нуждаться в обслуживании? Кто будет выполнять его и будут ли нужны запасные части и специальный персонал?

Для разработки требований к обслуживанию оборудования надо рассмотреть все вопросы, перечисленные в приведенных перечнях. Данные перечни обширны, но далеко не полны. В частности, опущены целые классы вопросов о каналах распределения продукта или услуги, об организации и работе отделов сбыта, упаковки и рекламы. Эти вопросы могут иметь важное значение для отбора и, конечно, для успеха продуктов, однако обычно их считают не относящимися к области системотехники, потому что они не определяют каких-либо существенных требований к конструкции.

### 1.3.5 Маркетинговое исследование

**Наименование объекта проектирования.** После того как противоречие, порождающее проблему, выявлено и сформулирована функция, устраняющая данное противоречие, проектируемый технический объект, воплощающий эту функцию (носитель функции) должен быть назван.

В случае изобретения название должно характеризовать его назначение и полностью соответствовать его сущности. Оно должно быть точным, кратким, конкретным, выражать назначение объекта изобретения [52].

Название, как правило, излагается в единственном числе именительном падеже, например «Фазометр», «Устройство для синхронизации часов». В именительном падеже множественного числа употребляются только те существительные, которые не имеют единственного числа.

Название должно давать четкое представление о виде объекта изобретения. Недопустимо называть изобретения «Трассировка печатной платы», так как в такой формулировке оно может характеризовать и устройство, и способ.

Если не удастся подобрать термин, выражающий сущность изобретения (например, приёмник, частотомер и т.п.), используют описательные названия, которые составляют следующим образом: указывают название вида объекта (устройство), а далее его целевое назначение, например «Устройство для контроля доступа».

Название изобретения, относящегося к способу, обязательно начинается со слова «способ», а далее указывают его назначение: «Способ приёма сигналов».

Если изобретение имеет узкую область применения, она должна быть указана в названии, например «Устройство прозвонки миллиметровых проводников», если изобретение не позволяет прозванивать сантиметровые проводники.

Название не должно содержать слов, не несущих информационной нагрузки. К примеру, изобретение следует назвать «Телевизор» (от «далеко видящий»), а не «Схема телевизора». Оно не должно содержать рекламных слов и неопределённых

выражений, например «Быстродействующее устройство», «Точный дальномер», «Высококочувствительный приёмник».

В ТРИЗ на этапе создания новой ТС для подавления психологической инерции проектировщика рекомендуется при решении задач заменять специальные термины функциональными [33].

---

*Например, следует говорить не лопата, а копалка, не карандаш, а чертилка, и так далее. То есть необходимо уходить от привычных форм деталей, думать прежде всего не о техническом объекте, а о том, какие действия или функции он должен выполнять.*

---

После того как ОП назван, необходимо провести поиск его функциональных аналогов.

Искомый функциональный аналог может находиться в статусе:

- 1) серийно изготавливаемого и продаваемого изделия;
- 2) запатентованного изобретения;
- 3) реального рабочего прототипа;
- 4) идеи.

В каждом случае следует использовать конкретный подход к поиску функциональных аналогов. В первом случае необходимо провести маркетинговое исследование, во втором случае (если функциональные аналоги не были найдены в результате маркетингового исследования) – патентное исследование. Искать реальный рабочий прототип или неопубликованную идею, как правило, не представляется целесообразным.

Результатом маркетингового исследования является некоторое множество ТС, выполняющих функцию, ликвидирующую найденное противоречие. В таком случае аналог, который лучше всего решает свою задачу, принимается в качестве прототипа объекта проектирования.

Результатом патентного исследования является некоторое множество описаний изобретений, устраняющих данное противоречие.

Как было сказано выше, необходимым и достаточным условием реализации изделия (продукта) является наличие спроса на него. Но чтобы быть уверенным в существовании спроса, а также определить его масштаб, объём и географию, необходимо до начала разработки изучить потребительский рынок, т.е. провести маркетинговые исследования [16].

Анализ состояния рынка проводится на основе определения объема продаж и запросов на разрабатываемое изделие. Для этого может использоваться матрица потребности и реализации (таблица 1.15) [32].

Таблица 1.15 – Матрица потребности и реализации изделия

Регион	Объем продаж, шт.	Объем запросов, шт.	Дефицит/профицит, шт.
...	...	...	...
...	...	...	...

При анализе матрицы необходимо выявить причины дефицита или профицита в изделии. Иногда дефицит является следствием нерасторопности служб рынка сбыта или маркетинга, иногда – следствием неграмотной рекламной политики. В любом случае при анализе состояния рынка не следует делать преждевременных выводов о необходимости разработки нового изделия.

**Прогнозирование объемов производства.** На этом этапе необходимо определить тип производства разрабатываемого изделия. Как известно, существуют следующие типы производства:

- единичное (до 10 штук в год);
- мелкосерийное (до 100 штук в год);
- серийное (до 1000 штук в год);
- крупносерийное (до 10000 штук в год);
- массовое (свыше 10000 штук в год).

Тип производства определяет требования к схеме и конструкции разрабатываемого изделия. Кроме того, на данном этапе производится выбор изготовителя. Как правило, прибыль может приносить только производство серийных, крупносерийных и массовых изделий. Исключение составляют уникальные изделия, которые по своим техническим параметрам значительно опережают время. Иногда объем производства определяется географическим положением изготовителя и потребителя.

В заключение по данному этапу даётся обоснование типа производства.

Возможен поиск видов продукции, на которые есть или может быть спрос. Но чаще маркетинговые исследования проводят с целью поиска продукции, которую способно выпускать определенное предприятие.

Проведение маркетинговых исследований включает ряд этапов.

### 1. *Изучение возможностей рынка*

1.1. *Изучение спроса.* Путем опроса различных групп населения или потребителей научно-технической продукции, анализа социальных, экономических, технических и иных тенденций выявляется потребность в том или ином товаре. Спрос может быть результатом естественного развития событий (например, появление новых технологий и открытий, позволяющих получить продукцию с новыми или улучшенными свойствами, изменение уровня благосостояния населения и т.п.), а также искусственно создаваться (например, новые тенденции в моде, направленные на замену электронных гаджетов, выпуск нового программного обеспечения, нуждающегося в более совершенных компьютерах, усиленное рекламирование (пропаганда), навязывающее продукцию определённого вида, и т.п.). Существование потребности в продукции – необходимое условие начала разработки, определяющее её цель.

1.2. *Сегментирование рынка.* Выявленная потребность не может быть универсальной, она конкретна, т.е. всегда отражает интересы определенной группы потребителей. Под группой понимается категория потребителей, которые одинаково реагируют на свойства рассматриваемой (продвигаемой на рынок) продукции, т.е. обладают по отношению к ней общностью взглядов, вкусов, привычек и т.п. На состав группы влияют возраст, социальное положение, профессиональный уровень, географическая, национально-религиозная принадлежность и т.п. Сегментирование

позволяет определить емкость и особенности рынка, форму подачи товара, спрогнозировать развитие спроса и т.д. В свою очередь емкость рынка предопределяет предстоящий масштаб производства, его организацию и размещение. А в случае узости рынка возрастают требования к тщательности постановки задачи, так как малейшее неудовлетворение запросов потребителей ведет к потере большой части (или всех) заказов.

1.3. *Позиционирование товара.* Важно знать точный ответ на вопрос: «Почему покупают данный товар?». По своей сути любой товар – это заключенная в упаковку услуга для удовлетворения какой-то потребности. Так, например, приобретаются не смартфоны, а возможность удалённо обмениваться с другими людьми информацией, представленной в текстовой, звуковой, визуальной форме; приобретаются не телевизоры, а возможность получать аудиовизуальную информацию из разных уголков мира и т.п. И ответ на поставленный вопрос состоит в конкретизации потребности и условий её реализации. Для этого проводятся исследования таких потребительских свойств, как назначение, уровень качества, оформление, марочные название и упаковка, а также возможность предоставления дополнительных услуг с целью получения выгоды от продажи товара с «подкреплением». Например, продавать компьютер с загруженным программным обеспечением – покупателя интересует не столько сам компьютер, сколько решение с его помощью своих проблем.

Позиционированию товара способствует изучение свойств аналогичной продукции (функциональных аналогов), выпускаемой конкурентами. При этом выявляется уровень характеристик товара, обеспечивающий его конкурентоспособность.

Позиционирование позволяет обоснованно составить список требований к товару со стороны потребителя, максимально учесть все его пожелания.

Выпуск продукции всегда связан с риском понести убыток. По данным исследований терпят неудачу на рынке товаров широкого потребления около 40% от общего числа новинок, а на рынке товаров промышленного назначения порядка 20%. Тщательность (полнота и глубина) изучения возможностей рынка позволяет уменьшить этот риск. Методы проведения маркетинговых исследований можно найти в специальной литературе, например в работах Ф. Котлера.

2. *Определение возможностей предприятия.* Предполагаемая продукция будет проектироваться и выпускаться на вполне определенном предприятии и конкретными людьми. Поэтому со стороны производителя к продукции выдвигаются следующие требования:

- соответствие продукции профилю предприятия. В противном случае потребуются переподготовка кадров и монтаж нового или переналадка старого технологического оборудования. Целесообразность таких мероприятий должна подтверждаться ожидаемой выгодой от выпуска новой непрофильной продукции;

- соответствие ресурсам предприятия, которые включают численность и состав персонала, используемое оборудование, наличие сырья, возможности хранения и транспортирования продукции, её реализации и послепродажного обслуживания, сеть сервисных центров и т.п. Причем все эти факторы должны оцениваться по

состоянию не только на момент выпуска продукции, но и на весь период её производства (так, изменение стоимости сырья может привести к удорожанию продукции или сделать её выпуск нецелесообразным).

Знание возможностей предприятия позволяет подтвердить экономическую целесообразность выпуска продукции. Однако необходимо учесть косвенную целесообразность и целесообразность, связанную с чисто физическим выживанием, моральным престижем. Например, выполнение несвойственной профилю предприятия работы может быть обусловлено экстремальной ситуацией (ликвидация стихийного бедствия и т.п.). Или, например, отказ от убыточного заказа может подорвать репутацию фирмы, что в будущем лишит её возможности получить уже выгодный заказ.

В результате маркетинговых исследований появляются и конкретизируются технические требования. В общем случае они включают:

- перечень потребностей, удовлетворяемых выпускаемой продукцией;
- желаемые потребительские свойства продукции;
- условия потребления продукции и ёмкость рынка;
- условия производства продукции, данные об исходных материалах и возможной кооперации с другими предприятиями и фирмами;
- условия хранения, транспортирования и реализации;
- перечень целей, достигаемых выпуском продукции;
- заключение о технической и экономической целесообразности разработки и выпуска этой продукции.

Маркетинговые исследования повышают вероятность получить отдачу от вложений в разработку продукции. Их важность подтверждается и тем, что на преуспевающих фирмах численность маркетинговой службы достигает или даже превышает половину численности всех служащих.

Когда необходимо привлечение потенциальных инвесторов (при недостаточности или отсутствии собственных финансовых ресурсов), результаты маркетинговых исследований оформляют в виде бизнес-плана. Этот документ предназначен для убеждения инвестора в надежности, обоснованности, перспективности и окупаемости проекта. Бизнес-план должен быть написан простым и ясным языком, коротко (примерно 20–30 страниц формата А4), аргументированно, опираться на реальные факты.

---

*В качестве примера, демонстрирующего роль маркетинговых исследований в обосновании потребности в разработке, приведем историю известного американского изобретателя Томаса Эдисона.*

*Прежде чем приступить к разработке электрического освещения в быту, Эдисон провел исследования, чтобы выяснить, при каких условиях электрическое освещение выдержит конкуренцию в цене, яркости и удобстве по сравнению с газовым освещением. Он скрупулезно изучил газовую промышленность, разработал план центральной электростанции и схему линий электропередачи к домам и фабрикам. Затем подсчитал стоимость меди и других материалов, требующихся для изготовления ламп и добычи электроэнергии с помощью динамо-*

*машины, движимой паром. Анализ данных определил не только размеры лампы, но и её конкурентоспособную цену 40 центов. Лишь убедившись, что сможет решить проблему электрического освещения, Эдисон принялся работать над лампой накаливания с угольной нитью, помещенной в стеклянный шар, из которого откачан воздух. В поисках материала нити он опробовал около 6000 разновидностей растительного волокна.*

---

В большинстве случаев, когда в результате маркетингового исследования находятся функциональные аналоги объекта проектирования, разработчикам не доступна их конструкторская документация. Известны лишь назначение, технические характеристики, общее описание изделия, а также его внешний вид. С целью понимания глубинных физических принципов действия и технических решений, которые были использованы проектировщиками при разработке ТО (или программного средства), возникает обратная задача реверсивного инжиниринга.

**Реверс-инжиниринг** (обратное проектирование, обратный инжиниринг, реверсивный инжиниринг, обратная разработка (ОР); англ. reverse engineering) – исследование некоторого готового устройства или программы, а также документации на них с целью понять принцип работы объекта; например, чтобы обнаружить недокументированные возможности (в том числе программные закладки), сделать изменение или воспроизвести устройство, программу или иной объект с аналогичными функциями, но без прямого копирования<sup>8</sup>.

Этот способ применяется обычно в том случае, если создатель оригинального объекта не предоставил информацию о структуре и способе его создания (производства). Правообладатели таких объектов могут заявить, что проведение обратной разработки или использование её результатов нарушает их исключительное право по закону об авторском праве и патентному законодательству.

Реверс-инжиниринг является инструментом государственной политики разных стран в решении задач импортозамещения.

---

*Например, в 2016 году на заседании Правительственной комиссии по импортозамещению министр промышленности и торговли РФ Д. В. Мантуров заявил о планах создать на базе Фонда развития промышленности центр обратного инжиниринга [53].*

---

Обратная разработка электронных устройств появилась ещё на заре радиотехники. В 1920–1930 годах различные фирмы копировали друг у друга радиолампы и схемотехнические решения их применения. Именно с обратной разработкой, а не с лицензионным производством связано то, что радиолампы одного назначения почти всех производителей оказались унифицированными и взаимозаменяемыми.

---

<sup>8</sup> [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%B1%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%BD%D0%B0%D1%8F\\_%D1%80%D0%B0%D0%B7%D1%80%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%BA%D0%B0](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%B1%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%80%D0%B0%D0%B7%D1%80%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%BA%D0%B0).



---

*Например, европейская лампа EL95 является клоном более ранней американской лампы 6KA5. Есть и обратные примеры: американские 6CA5 и KT88 – клоны европейской лампы EL34. То же самое относится и к советским радиолампам, многие из которых являются клонами американских ламп, полученных по ленд-лизу (например 6Ж4, 6П9), или немецких из трофейной аппаратуры (6Г2, ГУ50). Вместе с лампами копировались и типовые схемы их включения, то есть, фактически, схемы блоков радиоаппаратуры. Поэтому именно благодаря обратной разработке ламповая эпоха стала переходом к типовому проектированию в электронике. В частности, все выпускаемые в мире бытовые приемники-супергетеродины строились в основном по трем схемам, которые определялись лампой смесительно-гетеродинного узла: двойной триод, триод-гептод или пентагрид. То же самое относилось и к усилителям низкой частоты. Существовало не более десятка типовых схем их построения в зависимости от выходной мощности: маломощные однокатодные на комбинированной лампе типа 6Ф3П, маломощные однокатодные с темброблоком на двойном триоде (типа 6Н1П) и выходном пентоде (6П14П, EL84) или лучевом тетроде (6П3С, EL34), двухтактные с триодным фазоинвертором (6Н1П + 2х6П14П), двухтактные многокаскадные (6Н8П + 2х6П6С + ГУ50). Черно-белые телевизоры и вовсе строились по одной-двум схемам.*

---

К другим примерам реверс-инжиниринга в электронике относятся:

- советская игра «Ну, погоди!» («Электроника ИМ-02»), которая является нелегальной копией японской игры Nintendo EG-26;
- копирование различных электронных блоков без фактической разработки. Известно [54], что многие элементы, в частности ТТЛ различных компаний и национальных стандартов, взаимозаменяемы (например, американская серия интегральных схем 7400 и её советский аналог К(Р)155);
- процессор Am386 компании AMD, который создан ради совместимости с чипом 80386 фирмы Intel и в пользу экономической целесообразности;
- процессоры Super386 38600SX и 38600DX компании Chips and Technologies созданные методом ОР.

Исследование и обратная разработка программ обычно осуществляются с целью дальнейшей модификации, копирования или, например, написания генераторов ключей, алгоритм работы которых получен на основе анализа алгоритма их проверки. Также исследование программ применяется для получения некоторых закрытых сведений о внутреннем устройстве программы – о протоколе сетевого обмена с сервером, аппаратным средством, ключом защиты или о взаимодействии с другой программой. Ещё одна область применения – получение информации о способах экспортирования данных из многочисленных проприетарных форматов файлов<sup>9</sup>.

---

<sup>9</sup> Часто применяется, например, в отношении форматов, поддерживаемых Microsoft Office.

С развитием Интернета популярные операционные системы и программы всё интенсивнее исследуются на предмет обнаружения в них уязвимостей, или «дыр». В дальнейшем найденные «дыры» могут использоваться для получения несанкционированного доступа к удалённому компьютеру или компьютерной сети. С другой стороны, обратная разработка применяется для исследования антивирусными компаниями вредоносного ПО с целью добавления его сигнатур в базы своих продуктов.

Одним из широко известных примеров обратной разработки является исследование BIOS персонального компьютера IBM, ставшее серьёзным шагом на пути развития производства IBM-совместимых компьютеров сторонними производителями [54]. Создание сервера Samba, входящего в состав ОС GNU/Linux и работающего с серверами на базе ОС Windows, также потребовало обратной разработки используемого Microsoft протокола SMB. Для многих ICQ-клиентов использовалась обратная разработка протокола ICQ.

При обратной разработке программного обеспечения применяются следующие методики [54].

1. Анализ обмена данными, наиболее распространённый в обратной разработке протоколов обмена данными, который производится с помощью анализатора шины и пакетного сниффера для прослушивания шины компьютера и компьютерной сети соответственно.

2. Дизассемблирование машинного кода программы для получения её листинга на языке ассемблера. Этот способ работает на любой компьютерной программе, но требует достаточно много времени, особенно для неспециалиста.

3. Декомпиляция машинного или байт-кода программы для создания исходного кода на некотором языке программирования высокого уровня.

В настоящее время под reverse engineering чаще всего понимается clean room reverse engineering, то есть процесс, при котором одна группа разработчиков анализирует машинный код программы, составляет алгоритм данной программы на псевдокоде, а если программа является драйвером какого-либо устройства, составляет исчерпывающие спецификации интересующего устройства. После получения спецификаций другая группа разработчиков пишет собственный драйвер на основе этих спецификаций или алгоритмов. Такой подход позволяет избежать обвинений в нарушении авторских прав на исходную программу, так как по законам, к примеру в США, попадает под понятие fair use, то есть добросовестного использования оригинальной программы. *Результат обратной разработки редко идентичен оригиналу, что и позволяет избежать ответственности перед законом, особенно при условии контроля отсутствия этой идентичности и нарушений торговых марок и патентов первой группой разработчиков.*

Реверсивный инжиниринг известен с древности. К примеру, Леонардо да Винчи активно использовал его, когда копировал объекты природы с целью адаптации к нуждам человека. ОР сначала отвечает на вопрос: «Как это сделано?», а потом пытается воссоздать копируемый объект. Однако в процессе ОР могут появиться

этические и юридические проблемы. Для более подробного знакомства с вопросом ОР рекомендуется обратиться к [55–57].

**Оценка применимости разных физических принципов действия ТС к реализации её целевой функции.** Назначение ТС инвариантно к их физической природе, т.е. одну и ту же функцию могут выполнять ТС, работа которых реализована с помощью разных ФЭ и ФПД.

---

*Например, часы, выполняющие функцию отсчета времени, можно реализовать на физических принципах механики (механические часы), ядерной физики (атомные часы) или электроники (электронные часы). Стоит отметить, что даже в основе электронных часов лежит все тот же механический принцип – явление механического резонанса кварцевой пластины, которое является сердцем электронных часов.*

---

Выбор ФПД определяет качество выполнения назначения ТС, а также экономическую составляющую изделия.

В связи с этим в ходе анализа потребности в проектировании ТС рекомендуется проводить как можно более широкий поиск функциональных аналогов абсолютно разными принципами действия и осуществлять анализ, можно ли реализовать аналоги, работа которых основана на принципах, отличных от принципов электроники и радиотехники, на данных принципах. В некоторых случаях перенос научно-технических знаний из одной науки или отрасли в другую может привести к изобретению новых ТС или ТС, существенно превосходящих по показателям функционирования аналоги.

В настоящее время существуют науки, изучающие применимость принципов функционирования объектов одной природы на объекты другой природы.

---

*Например, наука, которая решает инженерно-технические задачи (в том числе радиотехнические) на основе анализа жизнедеятельности живых организмов, называется бионикой. Это прикладная наука о применении в технических устройствах и системах принципов организации, свойств, функций и структур живой природы, то есть о формах живого в природе и их промышленных аналогах. Различают биологическую, теоретическую и техническую бионику. В переводной литературе чаще употребляется термин «биомиметика» [3].*

---

Маркетинговое исследование завершается нахождением множества функциональных аналогов по назначению и области применения (последнее не является строгим условием). После этого необходимо сделать обзор этих функциональных аналогов, оценку их технических характеристик, определить достоинства, выявить недостатки, определить лучший из аналогов (прототип) и выявить противоречия между потребностями человека и характеристиками прототипа в текущих условиях реальности. При этом нужно понять, почему данный функциональный аналог перестал удовлетворять потребностям человека, ведь раньше все шло хорошо. Что же

изменилось? Изменились условия использования, поведение человека или что-то ещё?

Затем необходимо сформулировать технические требования к объекту проектирования (т.е. желаемые технические характеристики будущего изделия). Если прототип удовлетворяет сформулированным техническим и экономическим требованиям, то можно сделать вывод, что потребность в разработке ТС отсутствует и возможно приобретение прототипа. Если прототип не удовлетворяет экономическим требованиям, то необходимо сделать вывод о существовании потребности в разработке ТС с целью уменьшения себестоимости прототипа. В таком случае при отсутствии конструкторской документации делается реверс-инжиниринг и переход к этапу разработки технического задания на проектирование ТС. Если прототип не удовлетворяет сформулированным техническим требованиям, то необходимо сделать вывод о модернизации прототипа, сформулировать противоречия между установленными заинтересованными сторонами требованиями и техническими характеристиками существующего изделия и перейти к этапу разработки технического задания на проектирование ТС.

### 1.3.6 Патентное исследование

Тщательное маркетинговое исследование может показать отсутствие на рынке функциональных аналогов. В таком случае необходимо осуществить патентное исследование, так как техническое средство может существовать в виде документально оформленной и зарегистрированной в Патентном ведомстве идеи технического решения.

Патент (от лат. *patens* – открытый, ясный, очевидный, от полного наименования *litterae patentes* – открытое письмо) – охранный документ, удостоверяющий исключительное право, авторство и приоритет изобретения, полезной модели, промышленного образца либо селекционного достижения.

Срок действия патента зависит от страны патентования, объекта патентования и составляет от 5 до 35 лет (ГК РФ, статья 1363, ГК РФ, статья 1424). Автору или соавторам за использование патента выплачивается авторское вознаграждение (по договору с патентовладельцем). За предоставление лицензии на право производства продукта или использования способа патентовладелец (лицензиар) получает (одноразовый) паушальный платёж или ежегодные отчисления от лицензиата, роялти.

Патент выдаётся государственным органом исполнительной власти по интеллектуальной собственности. Например, в Российской Федерации таким органом является Роспатент, в США – Бюро по регистрации патентов и торговых марок. Международное регулирование осуществляют Всемирная организация интеллектуальной собственности (выполняющая в том числе соответствующие функции при ООН), Объединённые международные бюро по охране интеллектуальной собственности и другие организации. Во Всемирной торговой организации эти отношения регулируются «Соглашением по торговым аспектам прав интеллектуальной собственности».

Под изобретением понимается техническое решение в любой области, относящееся к продукту (в частности, устройству, веществу), способу (процессу осуществления действий над материальным объектом с помощью материальных средств) или применению (в частности, применению уже известного продукта или процесса по новому назначению).

---

*Правовая охрана, которую предоставляет патент, защищает решение, а не задачу. Например, Джеймс Уатт, чтобы решить задачу преобразования возвратно-поступательного движения во вращательное и обойти патент на кривошипно-шатунный механизм, применил в своей первой модели паровой машины вместо кривошипа планетарную передачу. Патент также не защищает саму по себе идею как таковую, а защищает только конкретное техническое решение, в котором воплощена идея.*

---

Наличие патента может стать помехой разработчикам технических объектов. Его можно купить, можно дождаться, когда срок действия патента закончится, и воспользоваться готовой формулой изобретения, но его действие также можно обойти. Даже наличие законов об охране объектов промышленной собственности (ОПС) и федерального закона № 315 от 26 июля 2006 г «О защите конкуренции» (ст. 14) не гарантирует абсолютную монополию на техническое решение и/или получение вознаграждения за созданные ОПС. Сегодня существует широкий арсенал средств для атаки на патенты, а именно для их обхода или присвоения [58].

Если патенты функциональных аналогов не найдены, следует выяснить можно ли реализовать объект проектирования на основе физико-технических принципов действия, отличных от принципов электроники и радиотехники.

Если это выполнимо, необходимо проверить, можно ли отказаться от объекта проектирования, реализующего потребность на основе принципов электроники и радиотехники, в пользу его реализации на других физических и технических принципах. Если можно, значит следует сделать вывод об отсутствии потребности в разработке объекта проектирования на основе принципов электроники и радиотехники. Если нельзя, то необходимо провести прогностический анализ способности объекта проектирования приносить ожидаемый экономический эффект.

Особую роль в анализе данного вопроса играет принцип неологии (с лат. знание нового), который заключается в использовании разработчиком физических законов, эффектов и явлений, процессов, конструкций, форм, материалов, их свойств и т.д., новых для данной отрасли техники или новых вообще [7]. Предполагается, что уже где-то и кем-то вне данной отрасли запланированная ТС создана, успешно используется (хотя, может быть, и для совершенно иных целей) и надо только её разыскать и проверить в данных условиях, даже не изменяя её, не приспособливая. Ясно, что принцип неологии требует от проектировщика широкой инженерной культуры, незаурядной общетехнической и общенаучной эрудиции, хорошей информированности. Не случайно в ряде отраслей техники, по данным Р.П. Повилейко [59], до 80% конструкторских разработок по новой технике невозможно патентовать, так как

предмет этих разработок был кем-то когда-то изобретён, спроектирован, создан. Поэтому наряду с использованием упомянутых выше приёмов обхода патентов [58] использование принципа неологии сулит высокий экономический эффект.

Перенос ТС в новую область использования, как правило, смещает или изменяет первоначально заложенные в техническое решение функции. В одних случаях исходная система оказывается полностью функционально и экономически пригодной к новым условиям работы, в других – лишь частично. Но и в исходном, неизменном виде применение её оказывается нередко экономически оправданным – не случайно столь широкое распространение во всех отраслях техники получили так называемые комплектующие изделия. Общеизвестно, как много даёт для самых разных, казалось бы, отраслей техники аппарата для исследования космоса, авиации и др.

Также имеется вероятность того, что в данных конкретных условиях экономический эффект может быть и недостижимым. Тогда рекомендуется «заморозить» проект до наступления подходящих условий или полностью отказаться от его реализации.

Обратная ситуация возникает, когда экономический эффект может быть достижим. В таком случае можно сделать вывод о существовании потребности в разработке нового технического объекта или системы. После этого, как правило, проводится исследование проблемной ситуации на основе системного подхода, формулируется изобретательская задача, выявляются административные, технические и физические противоречия [29, 33, 34].

Особое внимание следует уделить постановке изобретательских задач (рисунок 1.29).

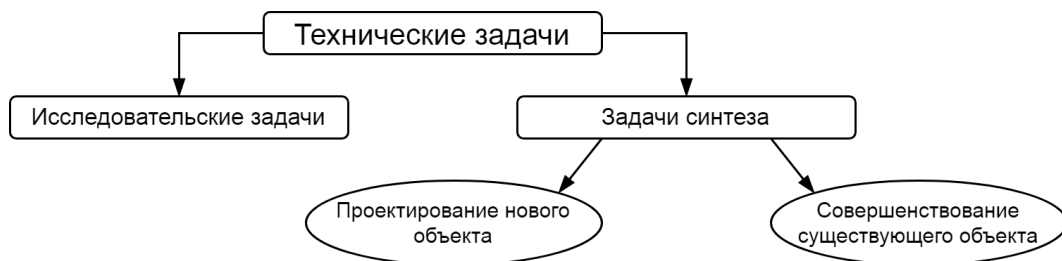


Рисунок 1.29 – Виды технических задач в зависимости от их первоначальной формулировки [31]

Изобретательские задачи различаются в зависимости от того, какие исходные данные присутствуют в их условиях и что является целью решения (таблица 1.6) [29].

В таблице приведены наиболее часто встречающиеся в изобретательской практике типы задач. Всегда желательно определить с видом задачи, это помогает выбрать наиболее подходящий метод её решения. Такая классификация достаточно условна. Иногда затруднительно однозначно определить тип задачи, поскольку она может быть отнесена одновременно к нескольким типам. Всегда следует учитывать и тот факт, что исходная задача может быть неправильно сформулирована. Переформулировка задачи может привести к более простому решению исходной проблемы.

Таблица 1.16 – К постановке изобретательских задач

№ задачи	Исходная ситуация	Цель решения задачи	Вид задачи
1	ТС не существует	Необходимо создать ТС, выполняющую заданные функции	Конструкторская задача
2	Существует ТС, требующая улучшения	Необходимо упростить ТС	Задача повышения идеальности
3	Существует ТС, требующая улучшения	Необходимо повысить эффективность ТС	Задача повышения эффективности
4	Существует ТС и нежелательный эффект (НЭ)	Необходимо найти способ устранения (СУ) НЭ	Задача устранения НЭ
5	Существует ТС, НЭ и его СУ. Применение СУ вызывает новый НЭ	Необходимо найти СУ обоих НЭ	Задача разрешения противоречия
6	Есть ТС и параметр, требующий обнаружения или измерения	Необходимо найти способ обнаружения или измерения параметра	Задача обнаружения или измерения
7	Существует ТС и непонятное явление	Необходимо найти объяснение этому явлению	Исследовательская задача

Попытка решить сформулированную изобретательскую задачу может привести к возникновению новой задачи, не менее сложной, чем исходная. Не следует в таком случае сразу отказываться от найденного решения. Рекомендуется решать новую задачу как изобретательскую. Решив ряд задач, мы устраним исходную проблему.

Итак, после выявления противоречий они последовательно разрешаются с помощью инструментов теории решения изобретательских задач. Получившиеся результаты интеллектуальной деятельности защищаются патентом, после чего проектировщик переходит к этапу постановки проектной задачи (разработки технического задания) [29, 33, 34].

### 1.3.7 Прогнозирование будущих потребностей

Управлять прошлым нельзя: оно уже безвозвратно прошло. Управлять настоящим – это означает просто реагировать на события. Управлять можно только будущим, но для этого надо уметь его предвидеть: какие новые продукты появятся через несколько лет, как будет вести себя рынок, какие новые возможности и угрозы могут возникнуть. Умение заметить нарождающуюся тенденцию раньше других, развить опережающее мышление – ключевой навык системного инженера.

---

*Как часто нам приходится читать про забавные и в то же время обескураживающие попытки авторитетных учёных и специалистов прошлого угадать облик нынешнего мира [48].*

*«Фонограф... не представляет никакой коммерческой ценности», – так в 1880 г. оценил собственное изобретение Томас Эдисон в беседе со своим ассистентом Сэмюэлем Инсуллом.*

---

---

«Полеты на аппаратах тяжелее воздуха невозможны», – писал астроном Саймон Ньюком в одной из своих статей в 1902 г.

«Едва ли человек когда-нибудь сможет использовать энергию атома» (Роберт Милликан, лауреат Нобелевской премии по физике, 1920 г.).

«Кому захочется слушать актерскую болтовню?» (Гарри Уорнер, Warner Brothers Pictures, 1927 г.).

«Полагаю, чтобы удовлетворить спрос на компьютеры на мировом рынке, хватит пяти штук» (Томас Уотсон, председатель IBM, 1943 г.).

«Нет никакого смысла каждому обзаводиться собственным компьютером» (Кен Олсен, президент Digital Equipment Corporation, 1977 г.).

---

Подобный опыт заставляет нас ещё тщательнее всматриваться в горизонт грядущего, чтобы вовремя успеть разглядеть слабые сигналы, контуры новой наступающей реальности, определяемой совокупным состоянием ценностей, потребностей и запросов человечества, и выработать правильное проектное решение.

Прекрасно осознавая это, западные исследователи разработали множество теорий человеческих мотивов и потребностей с целью научиться управлять будущим социума [60]. Одним из фундаментальных оснований механизмов прогноза и предвидения является концепция соотношения информационных состояний реального мира и наблюдателя (рисунок 1.31). Эта полезная дихотомическая концепция позволяет провести логически полный анализ закономерностей в принятии решений отдельными людьми и группами людей на основе имеющегося у них опыта и того, как этот опыт соотносится с информационным состоянием всего остального мира.

		Real-World Information State	
		Known	Unknown
Observer's Knowledge State	Known	<b>Known, known</b> “Things we know we know”	<b>Known, unknown</b> “We know there are some things we do not know”
	Unknown	<b>Unknown, known</b> “The information is out there, but we don't know we need it”	<b>Unknown, unknown</b> “We don't know what we don't know”

Рисунок 1.31 – Информационные состояния мира и его наблюдателя

Область «*known, known*» (известно, что известно) является самой простой. В ней отношения между причинами и следствиями очевидны и мы можем утверждать, что мы знаем вещи, которые знаем.



*Область «known, unknown» (известно, что неизвестно)* является более комплексной, так как в ней отношения между причинами и следствиями требуют анализа или другой формы исследования. Находясь в этой области, мы можем утверждать, что знаем, что существуют некоторые знания, которых мы не знаем.

*Область «unknown, known» (неизвестно, что известно)* является ещё более сложной по сравнению с предыдущей, поскольку в ней причинно-следственные отношения могут проследиваться лишь в ретроспективном обзоре и то не в совершенстве. Без эффективных механизмов поиска существующих знаний, которые нам необходимы, эта область является наглядным примером метода проб и ошибок.

*Область «unknown, unknown» (неизвестно, что неизвестно)* является абсолютно неупорядоченной в причинно-следственном отношении на системном уровне, потому как мы не знаем даже того, чего не знаем.

Переноса положения этой концепции на задачи прогнозирования потребностей общества, можно утверждать следующее.

Отсутствие в текущий момент времени потребностей в какой-либо области или сфере человеческой деятельности ещё не означает, что их там нет или они там не появятся через некоторое время [61]. Потребности могут «витать в воздухе» и быть неосознанными. Просто они ещё не оформились в сознании общества. С точки зрения рынка критически важно уметь распознавать существующие, но пока неосознанные потребности и заранее предвидеть появление новых потребностей в будущем. Последнюю задачу решает дисциплина, которая называется прогнозированием [48].

Прогнозирование (от греч. prognosis – предвидение, предсказание) – разработка прогноза – вероятного суждения о состоянии какого-либо явления в будущем. В узком значении это специальное научное исследование перспектив развития какого-либо явления, преимущественно с количественными оценками и с указанием более или менее определённых сроков изменения этого явления. Прогнозирование как одна из форм предвидения научного в социальной сфере находится во взаимосвязи с целеполаганием, планированием, программированием, проектированием и управлением. Там, где объекты неуправляемы (особенно в естественных науках), имеет место безусловное предсказание с целью приспособить действия к ожидаемому состоянию объекта. Но нередко (особенно в общественных науках) обратная связь приводит к самоосуществлению или саморазрушению прогноза путём действий с учётом последнего [41].

Отсюда вытекает методологическая ориентация прогнозирования управляемых (большой частью социальных) явлений на оценку вероятного (при условии сохранения наблюдаемых тенденций) и желательного (при условии заранее заданных норм) состояния объекта с целью оптимизации принимаемых решений. Соответственно разрабатываются поисковый и нормативный прогнозы.

Прогнозирование – процесс предвидения, предсказания тенденций и перспектив дальнейшего развития тех или иных объектов и их будущего состояния на основе знания закономерностей развития их в прошлом и в настоящее время [62]. Прогнозирование отличают от научного предвидения: первое, как правило, решает более

узкие практические задачи. Методика прогнозирования включает ряд приёмов исследования:

- 1) частно-научные методы, применяемые в рамках отдельных наук;
- 2) общенаучные методы, применяемые во всех науках (формально-логические, математические, эвристические);
- 3) общеметодологические принципы диалектики.

Результат прогнозирования называется прогнозом и содержит информацию о каком-либо объекте, опережающую по времени процесс развития данного объекта.

Прогнозирование в области новых потребностей, а следовательно, в области создания новых ТО или новых конструкций существующих технических объектов приобретает все большую значимость и охватывает широкий круг научных и технических направлений. Значение прогнозирования повышается, когда имеет место относительно частое изменение требований, предъявляемых к ТО [7].

Одним из положений научного прогнозирования является то, что утверждение о вероятности наступления определенного события делают на основании анализа событий, которые уже произошли [26]. В условиях огромных потоков информации, имеющей как специальное, так и общетехническое направление, недостаточно личного опыта проектировщика и традиционных методов предвидения развития ТО. В настоящее время в связи с необходимостью научно обоснованного предвидения развития техники, технологии получения новых материалов и т.п. интенсивно развивается инженерное прогнозирование.

Под инженерным прогнозированием понимают научно обоснованную информацию, отражающую в виде вероятностной категории потенциальные возможности развития техники [63]. Вопросы экономики входят в содержание прогнозирования как составная часть. В то же время техническое прогнозирование создаёт базу для экономических прогнозов.

Эффективность инженерного прогнозирования перед началом проектирования ТО весьма значительна, и расходы на его выполнение вполне окупаются. Однако для этого необходимо преодолеть ряд сложностей применения методов инженерного прогнозирования, связанных с соответствующей подготовкой исходной информации.

Во-первых, зачастую недостаточен объём исходной информации и отсутствуют количественные данные, по которым можно оценить возможные варианты технических решений. Во-вторых, необходимо учитывать большое число параметров и связей между ними даже в относительно простом проекте, в связи с чем невозможно или весьма затруднительно дать обобщенную оценку техническому решению по разным критериям. Эти сложности могут быть существенным образом скомпенсированы за счет знания общих и частных законов эволюции технических объектов, и РЭС в частности.

Основу инженерного прогнозирования составляют три направления, определяющие:

- значимость новых открытий и изобретений;
- цель и техническую стратегию разработки и внедрения ТС;

– перспективный уровень развития технических решений изделий.

Первые два направления применяют в основном для среднесрочного и долгосрочного прогнозирования (5–30 лет), а последнее направление – преимущественно для краткосрочного прогнозирования (2–4 года). В инженерном прогнозировании используют теоретические и экспериментальные средства анализа и синтеза и опираются на информацию, содержащуюся в законченных проектных и научно-исследовательских разработках, в патентах и авторских свидетельствах.

На основе инженерного прогнозирования можно определить:

- направления, которые займут лидирующее положение в технике;
- возможные пропорции внедрения в практику конкурирующих направлений;
- вероятность использования техники;
- предполагаемую экономическую эффективность реализации технических направлений;
- ожидаемое время внедрения в производство техники или целевых направлений её развития.

В исследовательском проектировании выбор целей, признаков объекта проектирования, его параметров должен производиться с учётом того, что за время с момента начала разработки до ее завершения могут произойти изменения в сфере факторов окружения объекта. Для того чтобы создаваемая система не оказалась морально устаревшей, выйдя из сборочного цеха, и цели, и признаки, и параметры должны прогнозироваться [14].

Рассматривая каждый фактор как объект, следует подобрать к нему наиболее соответствующий метод прогнозирования. Классификация этих методов проводится по шести признакам [64].

1. По природе объекта прогнозирования:

- а) научно-технические (развитие фундаментальных и прикладных исследований, развитие науки, новые виды техники, технические характеристики, изобретения и открытия в области науки и техники, новые материалы, технология);
- б) технико-экономические (экономика народного хозяйства по отраслям, развитие и размещение производства, промышленные предприятия, технико-экономические показатели производства продукции, организационно-экономические системы управления, освоение новых видов продукции, финансирование производства);
- в) социально-экономические (демография, трудовые ресурсы, размещение производительных сил, образование, национальный доход, спрос, потребление);
- г) военно-политические (международные отношения, опасные зоны, военный потенциал, стратегический курс, военные конфликты);
- д) естественно-природные (погода, окружающая среда, природные ресурсы).

2. По масштабности объекта прогнозирования, определяемой числом переменных, входящих в полное описание объекта:

- а) сублокальные – с числом значащих переменных от 1 до 3 (производственная функция, траектория движения в трехмерном пространстве, рабочее место);
- б) локальные – с числом значащих переменных от 4 до 14 (производственный участок, материал, несложное техническое устройство);

в) субглобальные – с числом переменных от 15 до 35 (цех, спрос на продукцию предприятия с соответствующей номенклатурой);

г) глобальные – с числом переменных от 36 до 100 (предприятия, техническая система типа «радиоэлектронное устройство», «радиоэлектронный функциональный узел»);

д) суперглобальные – с числом переменных свыше 100 (отрасль, крупное предприятие, большая техническая система).

3. По сложности объекта прогнозирования:

а) сверхпростые – объекты с отсутствием существенных взаимосвязей между переменными;

б) простые – объекты, в описании которых содержатся парные связи;

в) сложные – объекты, в описании которых содержатся парные и множественные связи;

г) сверхсложные – объекты, в описании которых нужно учитывать взаимосвязи всех значащих переменных.

4. По степени детерминированности:

а) детерминированные – объекты, в характеристиках которых случайная составляющая несущественна;

б) стохастические – объекты, в описании которых необходим учет случайной составляющей переменных;

в) случайные, имеющие как детерминированные, так и стохастические характеристики.

5. По характеру развития во времени:

а) дискретные – характеристики изменяются скачками;

б) аперiodические – характеристики изменяются в виде аперiodической непрерывной функции;

в) циклические – характеристики изменяются в виде перiodической непрерывной функции.

6. По степени информационной обеспеченности:

а) объекты с достаточной количественной ретроспективной информацией;

б) объекты с недостаточной для обеспечения заданной точности прогнозирования количественной ретроспективной информацией;

в) объекты, имеющие лишь качественную ретроспективную информацию;

г) объекты с полным отсутствием ретроспективной информации.

Разнообразие решаемых задач в области прогнозирования привело к разработке большого числа методов. В отечественной и зарубежной практике можно насчитать свыше 100 методов прогнозирования. Рекомендации для однозначного выбора метода прогнозирования сегодня ещё не разработаны. В таблице 1.17 представлены наиболее распространенные методы прогнозирования и позиции по шести классификационным признакам, характеризующим объект.

Таблица 1.17 – Классификация методов прогнозирования

Метод прогнозирования	Объект прогнозирования					
	1	2	3	4	5	6
Математическая подгонка полиномами	а, б, в, д	а–д	а, б	а	б, в	а, б
Экстраполяция по элементарным функциям	а, б, в, д	а–д	а, б	а, б	б, в	а, б
Экстраполяция с дисконтированием	а, б, в, д	а–д	а, б	в, г	а, б	а
Функции с гибкой структурой	а, б	а–д	а, б	а, б, г	б, в	а
Экстраполяция по огибающим кривым	а	а	а	б	а, б	а
Авторегрессионные модели	а, б, в, д	а–д	а	б	б, в	а
Парные регрессии	а, б, в, д	а	б	б	б	а, б
Множественные регрессии	а, б, в, д	б–д	в, г	б	б, в	а, б
Компонентный анализ	а, б, в, д	в, г, д	в, г	б	б, в	а
Многофакторные модели	а, б, в, д	в, г, д	в, г	б	б, в	а
Биолого-технические аналоги	а	а	а, б	а, б	б, в	б
Экономические аналоги по опережающей стране	б	а, б	а–г	а, б	а, б, в	а, б, в
Технические прогнозы по опережающей области	а	а, б	а–г	а, б, в	а, б, в	а, б, в
Анализ динамики патентования	а	а, б	б	б	а, б, в	а, б, в
Публикационные методы	а	а, б, в	б, в, г	б, в	а, б, в	а, б
Цитатно-индексные методы	а, б	а, б, в	б, в, г	б, в	б, в	а, б
Коэффициент полноты и уровня техники	а, б	а, б	а–г	а, б, в	а, б, в	а, б, в
Индивидуальный экспертный опрос	а–г	а, б	а, б, в	а, б, в	а, б, в	а, б, в
Коллективный экспертный опрос	а–г	а, б, в	а–г	а, б, в	а, б, в	б, в, г
Историко-логический анализ	б, в, г	а, б	а–г	а, б, в	а, б, в	б, в
Экспертные комиссии	а–г	а, б	б, в, г	а, б, в	а, б, в	б, в, г
Морфологический анализ	а, б	а, б	а–г	а, б, в	а, б, в	в, г
Синоптическая модель	а, б, в	а, б, в	а–г	а, б, в	а, б, в	б, в, г
Метод «Дельфи»	а, б, в	а, б	а–г	а, б, в	а, б, в	б, в, г
Метод эвристического прогнозирования	а, б, в	а, б, в	а–г	а, б, в	а, б, в	б, в, г
Коллективная генерация идей	а–г	а	а–г	б, в	А	в, г
Деструктивная отнесенная оценка	а–г	а	а–г	б, в	В	в, г
Динамический концептуальный анализ	а, б, в	а, б, в	в, г	б, в	А	в, г
Политические игры	г	а, б	в, г	б, в	А	в, г
Экономические игровые модели	б	а, б	б, в, г	б, в	а, б, в	б, в, г
Экстраполяция факторов	а, б, в, д	в, г, д	в, г	б	Б	а
Биологические модели роста	а, б	а	а	а, д	Б	б

Приступая к прогнозированию, необходимо вначале отыскать позиции, относящиеся к объекту по всем классификационным признакам, а затем подобрать метод, охватывающий возможно большее число характеризующих объект позиций [14, 64]. Введем понятие коэффициента общности метода прогнозирования:

$$k_{\text{общ}} = \sigma_p / \Sigma_p ,$$

где  $\sigma_p$  – количество позиций по всем характеристическим признакам, охватываемых методом прогнозирования;  $\Sigma_p$  – общее количество позиций по всем признакам.

Наибольшим коэффициентом общности обладает метод коллективного экспертного опроса (20 позиций из 24). Все методы, имеющие отношение к опросу экспертов, обладают высоким значением этого показателя. Из других методов прогнозирования с большой общностью можно выделить метод «Дельфи» и морфологический анализ.

Среди всех методов определенную группу объединяет инженерное прогнозирование [40, 64]. Оно опирается на информацию, содержащуюся в законченных проектных и научно-технических разработках, в патентах.

Инженерное прогнозирование – научно обоснованная информация, определяющая в вероятностной постановке потенциальные возможности техники. Оно охватывает срок до 15 лет и способно дать оценку перспективности как отдельного объекта, так и целого технического направления.

Методы инженерного прогнозирования весьма разнообразны, но в их основе лежит небольшое число принципов: экспертный опрос, экстраполяция, морфологический анализ, математическое моделирование. При этом используются три основных метода прогнозирования: экстраполяция, экспертиза (метод экспертных оценок), моделирование. Но такая классификация условна, потому что прогностические модели предполагают экстраполяцию и экспертные оценки, последние представляют итоги экстраполяции и моделирования экспертом исследуемого объекта и т.д. В разработках прогнозов применяют также методы аналогии, индукции и дедукции, различают статистические, экономические, социологические и другие методы.

В логическом смысле прогнозирование обратное планированию, так как задачей прогнозирования является описание образа будущего объекта или ситуации на основе имеющихся данных, а задачей планирования является описание последовательности действий для достижения известной (желаемой, сформулированной, намеченной) цели.

В таблице 1.18 представлены источники информации для прогнозирования и виды прогнозов на их основе.

*Экспертный опрос* строится на использовании мнений специалистов. Результаты опроса обрабатываются средствами математической статистики, при этом возможен учет квалификации специалистов. Экспертный опрос применим ко всем видам прогнозирования. Опрос экспертов может проводиться в устной форме (интервью) или в форме заполнения анкет. В качестве экспертов следует выбирать специалистов, признанных ведущими в данной области и имеющих некоторый опыт

прогнозирования. Количественный состав экспертной группы формируют с учётом возможных последствий от неверного выбора целей проектирования. Суть метода сводится к тому, что группе экспертов ставят ряд вопросов, касающихся развития данного технического направления или прогнозируемого объекта. Затем с помощью математической обработки результатов опроса экспертов выясняется преобладающее мнение. Сложным при использовании этого метода, который носит субъективный характер, является установление принципов проведения опроса, оценка точности результатов и др.

Таблица 1.18 – Источники информации для прогнозирования и виды прогнозов на их основе

Прогнозы	Этапы работ	Вид прогноза
Сверхдолгосрочные (более 30 лет)	Поисковые	Научное предвидение
Долгосрочные (15–30 лет)	Планируемые НИР	
	Законченные НИР	Инженерное прогнозирование
Среднесрочные (5–15 лет)	Патенты	
Краткосрочные (2–4 года)	Законченные проектные разработки	
	Существующее состояние техники	

Этот метод целесообразно использовать в случае отсутствия достаточно систематизированной информации о прошлом или когда научно-техническое развитие в большей степени зависит от принимаемых решений, чем от технических возможностей.

*Экстраполяция* при прогнозировании заключается в переносе закономерностей развития техники из прошлого в будущее. Этот метод широко применяется при краткосрочном прогнозировании преимущественно в областях техники, где не предвидятся существенные качественные изменения в развитии. Областью исследования метода являются в основном события, развивающиеся эволюционным путём и достаточно медленно во времени. Прогнозирование методом экстраполяции тесно связано с использованием выявленных законов и закономерностей развития техники.

Методом экстраполяции можно решать задачи двух типов:

1) статические, в которых анализируют связи между главным параметром и другими без учета фактора времени. Статическая задача связана с определением одного какого-либо значения прогнозируемого признака объекта по ранее установленным величинам других признаков;

2) динамические, в которых непременной составляющей уравнений является фактор времени. Динамическая задача экстраполяции связывает значение прогнозируемого признака со временем.

При решении задач второго типа устанавливают изменения главного параметра в будущем. Исходной информацией для решения таких задач является динамический ряд, отражающий изменение главного параметра в функции времени.

Прогнозирование развития техники на базе динамических рядов состоит из следующих основных операций:

- а) приведения исходной информации к виду, приемлемому для предварительного анализа ряда;
- б) нахождения зависимости между главным параметром и фактором времени;
- в) проверки точности прогнозирования по главному параметру;
- г) корректирования результатов расчета в случае существенных расхождений.

*Морфологический анализ* связан с разделением задачи на составные части в соответствии с определенными характеристиками объекта прогнозирования (надежностью, технологичностью, эргономичностью, эстетичностью, экономичностью, научной обоснованностью и др.). Характеристики подразделяются на позиции в нарастающем смысловом значении. И характеристики, и позиции получают оценки. Характеристики оцениваются в долях единицы. Чем выше оценка, тем важнее характеристика. Оценку дают эксперты.

Перспективность целого научно-технического направления определяется по приведенному числу патентов, которое выражается следующей зависимостью:

$$N_A = \sum_{i=1}^n \tau_i,$$

где  $n$  – число патентов по научно-техническому направлению  $A$ ;  $\tau_i$  – коэффициент научно-технической значимости патента  $i$  по направлению  $A$ .

Таким образом, перспективность того или иного научно-технического направления оценивается суммой коэффициентов научно-технической значимости всех патентов, выданных по этому направлению за некоторый ретроспективный период, например за последние 15 лет. Наиболее перспективным следует считать направление, имеющее наибольшее значение приведенного числа патентов.

Схема процесса прогнозирования содержит этапы прогнозирования и связи между ними (рисунок 1.32). Исходным положением является определение цели прогнозирования. В зависимости от неё выбирают объект прогнозирования (связь 1).

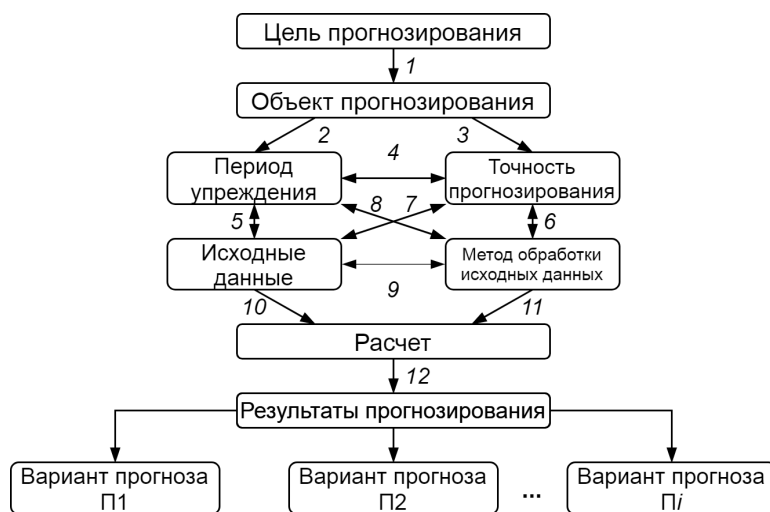


Рисунок 1.32 – Схема процесса прогнозирования



Период упреждения и точность прогнозирования устанавливаются исходя из цели и объекта прогнозирования (связи 2 и 3). Период упреждения (период, на который составляют прогноз) зависит от требуемой точности прогнозирования: чем больше период упреждения, тем меньше точность прогнозирования; при необходимости повысить точность прогнозирования уменьшается период упреждения (взаимосвязь 4).

В зависимости от периода упреждения устанавливается необходимый объем и содержание исходных данных об объекте прогнозирования: чем больше период упреждения, тем полнее должны быть исходные данные; при малом объеме исходных данных период упреждения уменьшается (взаимосвязь 5).

Выбираемый метод обработки исходных данных зависит от требуемой точности прогнозирования: чем выше точность прогнозирования, тем точнее должен быть метод обработки исходных данных; при снижении точности прогнозирования принимают менее точный метод обработки исходных данных (взаимосвязь 6). Для обеспечения требуемой точности прогнозирования необходимо располагать соответствующим объемом и содержанием исходных данных об объекте прогнозирования. Для повышения точности прогнозирования объем и содержание исходных данных должны быть более полными (взаимосвязь 7).

Выбор метода обработки исходных данных об объекте прогнозирования зависит от принимаемого периода упреждения: чем он больше, тем точнее должен быть метод обработки исходных данных (взаимосвязь 8).

Наличие объема и содержания исходных данных определяет выбор метода их обработки: чем полнее исходные данные, тем точнее может быть метод их обработки. В то же время определенный метод требует соответствующего объема исходных данных (взаимосвязь 9).

Определив объем и содержание исходных данных о прогнозируемом объекте и приняв соответствующий метод обработки исходных данных, можно выполнить необходимые расчеты (связи 10 и 11), которые должны дать возможность получить требуемый результат прогнозирования (связь 12). На его основе могут быть разработаны допустимые варианты прогноза. Не исключается, что полученный результат прогнозирования не будет полностью отвечать поставленной цели. В этом случае необходимо уточнить отдельные этапы прогнозирования, используя обратные связи.

Рассмотренная схема процесса прогнозирования может оказаться для некоторых классов задач проектирования неприемлемой. Тогда прогнозирование можно выполнять по следующему сценарию:

- 1) разработка общей схемы прогнозирования;
- 2) установление комплекса прогнозируемых параметров;
- 3) определение требуемой точности прогнозирования;
- 4) установление продолжительности периода упреждения.

Процесс прогнозирования может иметь три составляющие, различающиеся точностью предсказания:

- 1) детерминированную, поддающуюся точному расчету;
- 2) вероятностную, позволяющую установить предполагаемую закономерность протекания процесса;

3) случайную, которая не поддается расчёту.

Научное детерминированное прогнозирование характеризуется тем, что период упреждения может быть значительным и при этом точность прогнозирования во времени не снижается. При вероятностном прогнозировании точность ниже. Использование детерминированной и вероятностной составляющих позволяет сравнить прогноз с действительным протеканием процесса и установить влияние случайной составляющей. Соотношение между всеми тремя составляющими зависит от уровня научного познания рассматриваемого процесса и может изменяться со временем. Научно-технический прогресс способствует увеличению влияния детерминированной составляющей и снижению влияния других составляющих. Поэтому повышение значимости детерминированной составляющей и точности вероятностной составляющей приводит к повышению общей точности прогнозирования.

Продолжительность периода упреждения следует устанавливать с учетом, во-первых, продолжительности реализации прогнозируемых процессов, во-вторых, возможности уточнения первичных результатов прогнозирования по мере получения информации о ходе реализации прогнозируемых процессов.

Прогнозирование конструкций ТО основывается на ЗРТС, при этом рассматриваются следующие основные свойства и факторы ТО.

1. Функциональное назначение.
2. Основные технические и экономические параметры.
3. Возможные компоновочные схемы.
4. Новые материалы.
5. Новые технологические процессы, оборудование и технологическая оснастка.
6. Новые формы и методы организации и управления производством.
7. Потребность и предполагаемый план изготовления ТО.
8. Строительство нового или реконструкция действующего предприятия.
9. Экономическая эффективность нового технического решения.

Прогнозировать можно и отдельные параметры ТО, например массу, габариты и т.п. В ряде конструкций особое значение приобретает необходимость ограничения массы на ранних стадиях проектирования. Для этого анализируют аналогичные конструкции и устанавливают математическую зависимость массы от основных параметров ТО. Учитывают влияние на массу повышения конструктивной сложности отдельных сборочных единиц, а также коэффициента прогрессивного снижения массы конструкции при совершенствовании методов расчета и конструирования, применении прогрессивных материалов, электронной компонентной базы и т.д.

## 1.4 Формализованное описание назначения технической системы

С точки зрения иерархии описаний ТС потребность – это общепринятое и краткое описание на естественном языке назначения ТС или цели ее создания (существования). При описании потребности отвечают на вопрос: «Что (какой результат) желательно иметь (получить) и каким особым условиям и ограничениям при этом нужно удовлетворить?».

При формулировании функций в зависимости от того, какую задачу предполагают решать, можно ставить две цели [31]:

1) сформулировать задание для создания нового ТО. Это подготовительный этап для определения возможных физических операций и синтеза возможных вариантов ФПД проектируемого ТО;

2) провести функциональный анализ уже разработанного ТО, чтобы выявить его недостатки и улучшить.

В обоих случаях для того, чтобы определить функцию ТО, нужно ответить на вопрос: «Какую операцию он выполняет или должен выполнять?».

Если рассматривать описание потребности более детально, то оно должно включать следующую информацию [15]:

- необходимое действие (наименование действия);
- объект или процесс (предмет обработки), на который направлено это действие;
- особые условия и ограничения.

---

*Например, измерять температуру твердого тела в диапазоне от минус 50 до плюс 50 °С. Защитить от вибрации радиоэлектронный блок в диапазоне частот от 20 до 1000 Гц при перегрузке, изменяющейся по линейному закону от 5 до 20 g.*

---

В формулировке функции содержится задание для разработки объекта. Поэтому важно, с одной стороны, чтобы задание было предельно конкретным и позволяло понять, в каком направлении искать решение и какие средства (ресурсы) можно привлечь, а с другой стороны, чтобы его формулировка не сужала область поиска и не создавала вектор психологической инерции. То есть в формулировке функции не должно быть даже намека на возможный принцип действия создаваемой ТС, и тем более на возможное техническое или конструкторско-технологическое решение [31].

Действие можно сформулировать двумя способами: либо применить глагол, либо использовать отглагольное существительное (таблица 1.19).

При использовании глагольной формы действие должно выражаться глаголом прямого действия, который конкретизирует задачу. Глаголы непрямого действия, например улучшить, исключить, добиться, обеспечить, предотвратить и т.д., не дают, как правило, четкости в формулировке задачи. Поэтому их употреблять не рекомендуется!

Форма с использованием отглагольного существительного описывает предназначение объекта и в ряде случаев оказывается более естественной.

Таблица 1.19 – Две формы описания функции технической системы

Техническая система	Глагольная форма – действие	Форма с использованием отглагольного существительного – предназначение
Датчик	Измеряет положение объекта	Измерение положения объекта
Трансформатор	Понижает напряжение переменного электрического тока	Понижение напряжения переменного электрического тока
Сердечник	Проводит магнитный поток	Проведение магнитного потока

Объект функции может выражаться либо конкретным понятием, обозначающим, например, некоторый объект, который нужно изменить или обнаружить: переместить датчик, повернуть антенную систему, перемешивать раствор, фиксировать механизм в заданном положении (защелка), обнаружить БПЛА, либо абстрактным понятием, обозначающим простые свойства вещества, поля или процессов, в которых нужно что-то обнаружить, измерить или изменить, преобразовать.

---

*Например, измерять температуру среды, перекрывать поток жидкости, регулировать расход газа и т.д. Процесс проверки герметичности – определить места (полевая характеристика) и величину утечки среды (параметр).*

---

Свойство должно быть простым и характеризоваться одним параметром. В формулировке функции нельзя использовать наименования свойств, которые характеризуются несколькими простыми, например повысить надежность, эффективность, качество. Надежность – это комплексный показатель, который характеризуется частными показателями: долговечностью, безотказностью, ремонтпригодностью и сохраняемостью. Поэтому в формулировке: «повысить надёжность...» непонятно, о чем идет речь.

Понятие «эффективность» очень широкое, например экономическая эффективность, энергетическая эффективность.

Часто ТС выполняет не одну, а несколько функций. И если хотя бы одну из них она не выполняет, то пропадает ее полезность.

Несколько функций могут быть связанными или находиться в отношении подчинения.

В формулировке главной полезной функции нужно указывать все необходимые связанные функции.

Если ТС должна выполнять несколько функций, то необходимо проверить, не находятся ли они в отношении подчинения. Подчинённая функция отражает дополнительное требование. Это не означает, что оно менее важно. Без выполнения этой функции могут пропасть потребительские свойства ТС. Просто подчинённая функция может быть выполнена только после того, как выполнена подчиняющая.

---

*Например, конструкция корпуса электронного средства должна удерживать детали и сборочные единицы в заданном взаимном положении ( $\Phi 1$ ) и сохранять это положение при воздействии на него нагрузок, т.е. обеспечивать жесткость корпуса ( $\Phi 2$ ). Функция  $\Phi 2$  является подчинённой по отношению к функции  $\Phi 1$ .  $\Phi 2$  – это дополнительное требование.*

---

В случае подчинения функций нужно давать формулировку только подчиняющей функции. Подчинённая функция будет относиться к вспомогательной функции.

Опыт показывает, что даже людям, имеющим навыки в проведении функционального анализа, не всегда сразу удается четко сформулировать функции исследуемых объектов. Поэтому рекомендуется сначала сформулировать функцию в том виде, как она естественно следует из условия решаемой задачи. Затем подобрать синонимы и выбрать наиболее емкий термин, т.е. обобщить понятия, которые участвуют в формулировке, как в отношении действия, так и в отношении объекта функции.

---

*Например, электрический фильтр должен очищать спектр сигнала. Такая конкретная формулировка ориентирует на использование именно этого принципа действия – очищать. Более общая формулировка – фильтровать спектр сигнала – способствует поиску и других принципов действия. А формулировка «обрабатывать сигнал» настолько общая, что непонятно, о каком действии идет речь. Это может быть очищать, фильтровать, удалять, видоизменять и т.д.*

---

Формулировка функций является одним из видов моделирования задачи и, как всякая модель, она должна быть прагматичной, обладать эвристической силой. Поэтому нужно найти такие формулировки, которые способствуют продвижению вперед при решении задачи.

Если имеется прототип или спроектирован черновой набросок ТС, то проведение функционального анализа для ее улучшения имеет некоторые особенности. Для выделенных функциональных компонентов формулируются выполняемые ими функции. Типовой ошибкой при формулировании функции является либо сужение функции, либо её расширение.

Чтобы убедиться в правильности сформулированной функции, необходимо:

1) выявить рабочий орган ТС. Именно он непосредственно участвует в выполнении главной полезной функции (ГПФ). Все остальные функциональные компоненты участвуют в выполнении ГПФ опосредованно, через рабочий орган (РО). Для этого нужно посмотреть, к какому компоненту ТС подводится энергия и управляющий сигнал. Если ТС выполняет несколько функций, то у нее может быть несколько РО;

2) проверить, может ли ТС сама выполнить сформулированную функцию;

3) проверить, не состоят ли несколько выделенных функций в отношении подчинения. Для этого нужно проанализировать, не выполняет ли рассматриваемая ТС

какие-либо другие функции. И если выполняет, то являются ли все выполняемые ею функции независимыми или связаны между собой;

4) проверить, не произошло ли сужение или расширение функции. Для этого целесообразно описать, зачем (для чего) выполняется эта функция, и проверить, соответствует ли функция предъявляемым требованиям. Здесь необходимо отметить, что объектом функции всегда является некоторый компонент ближайшей надсистемы или свойство, её характеризующее.

---

*Например, электрическая лампа: излучать свет, РО – нить накаливания; светильник: освещать предметы, ТО – светильник, ПЭ – нить накаливания, РО – отражатель, рассеиватель. Функция лампы – излучать свет. Можно сказать: преобразовывать электрическую энергию (ПЭ) в световую. Но вторая формулировка уже ориентирует на использование электрической энергии, т.е. она исключает из рассмотрения другие принципы получения света.*

---

Главная полезная функция технической системы в целом или её компонента направлена на выполнение требований первой вышестоящей системы. Поэтому формулирование функций ТС и её компонентов целесообразно осуществлять одновременно с анализом связей между функциями, выполняемыми компонентами.

Итак, описание потребности в ТО (или ТС) формализованно можно представить в виде

$$P = (D, G, H), \quad (1.1)$$

где  $D$  – указание действия, производимого ТО и приводящего к желаемому результату, т.е. к удовлетворению (реализации) интересующей потребности;  $G$  – указание объекта, процесса или предмета, на который направлено действие  $D$ ;  $H$  – указание особых условий и ограничений, при которых выполняется действие  $D$ .

В таблице 1.20 приведены примеры покомпонентного описания потребности.

Еще раз отметим, что наряду с понятием потребности в инженерной практике широко используется понятие функции ТО. Доказано [15], что описания потребности и функции ТО тождественно совпадают. Различие между потребностью и функцией состоит в том, что понятие потребности всегда связано с человеком (коллективом людей) или автоматом (автоматами), поставившим задачу реализации потребности и выполняющим проектирование соответствующего ТО и его изготовление. Понятие функции всегда связано с ТО, реализующим эту потребность. Интересно отметить, что человек часто выступает в двух качествах: как субъект, формулирующий потребность, и как элемент ТО (имеется в виду система типа «человек–машина»), реализующий эту потребность. Чтобы отличать эти понятия, в описании потребности будем пользоваться отглагольным существительным, а в описании функции – глаголом. В таблице 1.20 в скобках указаны описания функции.

Таблица 1.20 – Примеры описания потребности в ТС

ТС	D	G	H
Электронный контактный термометр	Измерение (измеряет)	Температура среды	Температура плавления самого прибора (электронного термометра) должна быть выше, чем максимально возможная температура среды
Телевизор	Отображение (отображает) и вещание (вещает)	Телевизионный и аудио сигналы	Уровень помех в радиоканале должен удовлетворять требованиям алгоритма обработки телевизионного сигнала
Радар	Зондирование (зондирует)	Окружающее пространство, среда	Класс радарных целей, состояние среды должны удовлетворять техническим характеристикам радара
Устройство автоматического освещения	Освещение (освещает)	Помещение или произвольная часть пространства	Параметры помещения должны соответствовать мощности источника освещения, чтобы удовлетворять заданному (требуемому) уровню освещенности
Источник вторичного электропитания	Преобразование (преобразует)	Переменный ток электросети	Переменный ток электросети имеет постоянные параметры амплитуды и частоты

## 1.5 Формализация научно-исследовательских и проектных задач системотехники

После уяснения целей и задач проекта, необходимо осуществить их формализованное описание. Формализация позволяет представить предметную область исследовательской или проектной задачи в компактном и полном виде. При формализации задач исследования с помощью корректной математической записи требуется сформулировать ее суть, критерий решения, входные и выходные данные, существенные факторы и условия, свойственные решаемой задаче [65].

Рассмотрим примеры формализации некоторых наиболее часто встречающихся в проектной деятельности типовых исследовательских задач.

### Задача на моделирование

*Дано:*  $S$  – система (объект исследования);  $X$  – множество входных параметров;  $Y$  – множество выходных параметров (предмет исследования);  $Z$  – множество внутренних параметров системы;  $E$  – множество параметров среды (условий функционирования);  $Q$  – множество показателей качества/эффективности функционирования системы (предмет исследования).

*Содержательная (вербальная) постановка научной задачи:* разработать модель  $\mu$  системы  $S$ , устанавливающую закономерность изменения множества выходных параметров  $Y$  и множества показателей качества/эффективности функционирования системы  $Q$  от множества значений входных параметров  $X$ , множества значений

внутренних параметров  $Z$ , множества значений параметров условий функционирования  $E$ . При этом на значения параметров множеств  $X, Y, Z, E$  наложены условия физической реализуемости:

$$X \subseteq X_{\text{доп}}, Y \subseteq Y_{\text{доп}}, Z \subseteq Z_{\text{доп}}, E \subseteq E_{\text{доп}},$$

где индекс «доп» означает «допустимые».

*Формальная постановка научной задачи:*

$$\mu: \langle S, X, Z, E \rangle \rightarrow Y, Q \mid X \subseteq X_{\text{доп}}, Y \subseteq Y_{\text{доп}}, Z \subseteq Z_{\text{доп}}, E \subseteq E_{\text{доп}}.$$

### **Задача на исследование модели и выявление существенных факторов**

*Дано:*  $S$  – система (объект исследования);  $X$  – множество входных параметров (предмет исследования);  $Z$  – множество внутренних параметров системы (предмет исследования);  $E$  – множество параметров среды и условий функционирования (предмет исследования);  $Y$  – множество выходных параметров;  $Q$  – множество показателей качества/эффективности функционирования системы;  $\mu$  – модель системы  $S$ .

*Содержательная (вербальная) постановка научной задачи:* на основе модели  $\mu$ , устанавливающей закономерность изменения множества выходных параметров  $Y$  и множества показателей качества функционирования системы  $Q$  от множества значений входных параметров  $X$ , множества значений внутренних параметров  $Z$ , множества значений параметров условий функционирования  $E$ , выявить множество существенных параметров как среди входных параметров  $X_c \subseteq X$ , так и среди параметров среды  $E_c \subseteq E$ , которые определяют поведение системы  $S$ . Критерием существенности параметров является интегральный критерий – превышение выходным параметром  $y_i$  ( $y_i \in Y$ ) граничного значения  $y_i^{\text{гп}}$  или снижение значения параметра качества/эффективности  $q_j$  ( $q_j \in Q$ ) ниже требуемого значения  $q_j^{\text{гп}}$  при варьировании значений множества входных параметров  $X$ , внутренних параметров  $Z$  и параметров среды  $E$  на всём диапазоне допустимых значений:  $X \subseteq X_{\text{доп}}, Z \subseteq Z_{\text{доп}}, E \subseteq E_{\text{доп}}$ , где индекс «доп» означает «допустимые».

*Формальная постановка научной задачи:* на основе модели

$$\mu: \langle S, X, Z, E \rangle \rightarrow Y, Q$$

найти существенные параметры системы

$$x \in X_c, z \in Z_c, e \in E_c \mid X_c \subseteq X \subseteq X_{\text{доп}}, Z_c \subseteq Z \subseteq Z_{\text{доп}}, E_c \subseteq E \subseteq E_{\text{доп}},$$

такие, что  $\forall$  значений параметров

$$x, z, e (x \in X \subseteq X_{\text{доп}}, z \in Z \subseteq Z_{\text{доп}}, e \in E \subseteq E_{\text{доп}}):$$

$$x = \begin{cases} x \in X_c, \text{ если } \exists (y_i(x, z, e) > y_i^{\text{гп}}) \vee (q_j(x, z, e) > q_j^{\text{гп}}) \mid i = 1 \dots |Y|, j = 1 \dots |Q|, \\ x \notin X_c \text{ в противном случае;} \end{cases}$$



$$z = \begin{cases} z \in Z_c, \text{ если } \exists (y_i(x, z, e) > y_i^{\text{гп}}) \vee (q_j(x, z, e) > q_j^{\text{гп}}) \Big| i = 1 \dots |Y|, j = 1 \dots |Q|, \\ z \notin Z_c \text{ в противном случае;} \end{cases}$$

$$e = \begin{cases} e \in E_c, \text{ если } \exists (y_i(x, z, e) > y_i^{\text{гп}}) \vee (q_j(x, z, e) > q_j^{\text{гп}}) \Big| i = 1 \dots |Y|, j = 1 \dots |Q|, \\ e \in E_c \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

### **Задача по повышению эффективности или качества функционирования системы**

*Дано:*  $S$  – система (объект исследования);  $X$  – множество входных параметров;  $Y$  – множество выходных параметров;  $Z$  – множество внутренних параметров системы;  $E$  – множество параметров среды и условий функционирования;  $Q$  – множество показателей качества/эффективности функционирования системы;  $q_1, \dots, q_n$  – повышаемые показатели качества/эффективности (предмет исследования).

*Содержательная (вербальная) постановка научной задачи:* разработать метод/методику  $M$  повышения качества/эффективности функционирования системы по показателям  $q_1, \dots, q_n$  в диапазоне значений входных и выходных параметров ( $X, Y$ ) системы за счет варьирования значений её внутренних параметров  $Z$  и при ограничениях на значения параметров среды  $E \subseteq E_{\text{доп}}$ , где индекс «доп» означает «допустимые».

*Формальная постановка научной задачи:* найти метод/методику  $M$  такой(-ую), что

$$M: \langle S, X, Y, Z, E, Q \rangle \rightarrow \{ \Delta q_1, \dots, \Delta q_n \} \Big| \forall \Delta q_i > 0, q_i \in Q, i = 1 \dots n,$$

при этом

$$\Delta q_i = q_i^{\text{п}} - q_i^{\text{д}}, i = 1 \dots n,$$

где индекс «д» означает «до использования метода»; индекс «п» – «после использования метода»;

ограничения на варьируемые параметры:

$$z_k \in [z_{k \text{ min}}, z_{k \text{ max}}], z_k \in Z \subseteq Z_{\text{доп}}, k = 1 \dots |Z|;$$

ограничения на неварьируемые параметры:

$$x_j \in [x_{j \text{ min}}, x_{j \text{ max}}], x_j \in X \subseteq X_{\text{доп}}, j = 1 \dots |X|;$$

$$y_m \in [y_{m \text{ min}}, y_{m \text{ max}}], y_m \in Y \subseteq Y_{\text{доп}}, m = 1 \dots |Y|;$$

$$e_l = \text{const}, e_l \in E \subseteq E_{\text{доп}}, l = 1 \dots |E|.$$

### Задача на оптимизацию выходного параметра системы

*Дано:*  $S$  – система (объект исследования);  $X$  – множество входных параметров;  $Y$  – множество выходных параметров;  $y_1, \dots, y_n$  – оптимизируемые выходные параметры (предмет исследования);  $Z$  – множество внутренних параметров системы;  $E$  – множество параметров среды и условий функционирования.

*Содержательная (вербальная) постановка научной задачи:* разработать метод/методику  $M$  обеспечения максимизации/минимизации выходных параметров системы  $y_1, \dots, y_n$  ( $y_i \in Y, i = 1 \dots n$ ) в диапазоне значений входных параметров  $X$  за счёт варьирования значений внутренних параметров  $Z$  при ограничениях на значения параметров среды  $E \subseteq E_{\text{доп}}$ , где индекс «доп» означает «допустимые».

*Формальная постановка научной задачи:* найти метод/методику  $M$  такой(-ую), что

$$M: \langle S, X, Y, Z, E \rangle \rightarrow \max y_i | y_i \in Y, i = 1 \dots n,$$

или

$$M: \langle S, X, Y, Z, E \rangle \rightarrow \min y_i | y_i \in Y, i = 1 \dots n,$$

$$\Delta q_i = q_i^n - q_i^{\text{н}}, i = 1 \dots n,$$

при ограничениях:

а) на варьируемые параметры

$$z_k \in [z_{k \min}, z_{k \max}], z_k \in Z \subseteq Z_{\text{доп}}, k = 1 \dots |Z|;$$

б) на неварьируемые параметры

$$x_j \in [x_{j \min}, x_{j \max}], x_j \in X \subseteq X_{\text{доп}}, j = 1 \dots |X|;$$

$$e_l = \text{const}, e_l \in E \subseteq E_{\text{доп}}, l = 1 \dots |E|.$$

### Задача на оптимизацию показателя эффективности или качества функционирования системы

*Дано:*  $S$  – система (объект исследования);  $X$  – множество входных параметров;  $Y$  – множество выходных параметров;  $Z$  – множество внутренних параметров системы;  $E$  – множество параметров среды (условий функционирования);  $Q$  – множество показателей качества/эффективности функционирования системы;  $q_1, \dots, q_n$  – оптимизируемые показатели качества/эффективности (предмет исследования).

*Содержательная (вербальная) постановка научной задачи:* разработать метод/методику  $M$  обеспечения максимизации/минимизации параметров качества функционирования системы  $q_1, \dots, q_n$  ( $q_i \in Q, i = 1 \dots n$ ) в диапазоне значений входных и выходных параметров ( $X, Y$ ) системы за счёт варьирования значений её внутренних параметров  $Z$  и при ограничениях на значения параметров среды  $E \subseteq E_{\text{доп}}$ , где индекс «доп» означает «допустимые».

*Формальная постановка научной задачи:* найти метод/методику  $M$  такой(-ую), что

$$M: \langle S, X, Y, Z, E, Q \rangle \rightarrow \max q_i | q_i \in Q, i = 1 \dots n,$$

или

$$M: \langle S, X, Y, Z, E, Q \rangle \rightarrow \min q_i | q_i \in Q, i = 1 \dots n,$$

при ограничениях:

а) на варьируемые параметры

$$z_k \in [z_{k \min}, z_{k \max}], z_k \in Z \subseteq Z_{\text{доп}}, k = 1 \dots |Z|;$$

б) на неварьируемые параметры

$$x_j \in [x_{j \min}, x_{j \max}], x_j \in X \subseteq X_{\text{доп}}, j = 1 \dots |X|;$$

$$y_m \in [y_{m \min}, y_{m \max}], y_m \in Y \subseteq Y_{\text{доп}}, m = 1 \dots |Y|;$$

$$e_l = \text{const}, e_l \in E \subseteq E_{\text{доп}}, l = 1 \dots |E|.$$

**Задача на обеспечение требуемого значения показателя эффективности или качества функционирования системы в условиях дестабилизирующего влияния среды**

*Дано:*  $S$  – система (объект исследования);  $X$  – множество входных параметров;  $Y$  – множество выходных параметров;  $Z$  – множество внутренних параметров системы;  $E$  – множество параметров среды (условий функционирования);  $e_1, \dots, e_m$  – дестабилизирующие параметры среды; оптимизируемые показатели качества/эффективности (предмет исследования);  $Q$  – множество показателей качества/эффективности функционирования системы;  $q_1, \dots, q_n$  – контролируемые показатели качества/эффективности (предмет исследования).

*Содержательная (вербальная) постановка научной задачи:* разработать метод/методику  $M$  обеспечения требуемых значений  $q_1^{\text{TP}}, \dots, q_n^{\text{TP}}$  показателей качества функционирования системы  $q_1, \dots, q_n$  ( $\forall q_i \geq q_i^{\text{TP}}, q_i \in Q, i = 1 \dots n$ ) в диапазоне значений входных и выходных параметров ( $X, Y$ ) системы за счет варьирования значений её внутренних параметров  $Z$  в условиях воздействия дестабилизирующих параметров среды  $e_1, \dots, e_m$  ( $e_j \in E, j = 1 \dots m$ ).

*Формальная постановка научной задачи:* найти метод/методику  $M$  такой(-ую), что

$$M: \langle S, X, Y, Z, E, Q \rangle \rightarrow q_i | \forall q_i \geq q_i^{\text{TP}}, q_i \in Q, i = 1 \dots n,$$

при ограничениях:

а) на варьируемые параметры

$$e_j \in [e_{j \min}, e_{j \max}], e_j \in E \subseteq E_{\text{доп}}, j = 1 \dots |E|; z_k \in [z_{k \min}, z_{k \max}],$$

$$z_k \in Z \subseteq Z_{\text{доп}}, k = 1 \dots |Z|;$$

б) на неварьируемые параметры

$$x_v \in [x_{v\min}, x_{v\max}], x_v \in X \subseteq X_{\text{доп}}, v = 1 \dots |X|; y_m \in [y_{m\min}, y_{m\max}], \\ y_m \in Y \subseteq Y_{\text{доп}}, m = 1 \dots |Y|.$$

## 1.6 Обобщённый алгоритм обоснования потребности в проектировании

Схема обобщённого алгоритма обоснования потребности показана на рисунке 1.33.

### Фиксация проблемной ситуации

1. Выявить и проанализировать требования (потребности) человека, группы людей, сообщества, социума посредством опроса общественного мнения или проведения социально-инженерного исследования.

2. Выявить текущие условия реальности в заданной области деятельности посредством анализа опыта эксплуатации и сценариев использования ТС, практики, жизненного опыта пользователей.

3. Выявить и сформулировать поверхностное противоречие стейкхолдеров и текущих условий реальности.

4. Противоречие найдено?

4.1. Если противоречие не найдено, то сделать вывод об отсутствии текущей потребности в разработке ТС и принять решение о прогнозировании возникновения будущих потребностей в исследуемой области реальности, провести прогностическое исследование;

4.2. Если противоречие найдено, то выявить функцию, устраняющую существующее противоречие.

5. Назвать объект проектирования.

### Поиск функциональных аналогов

6. Осуществить маркетинговое исследование.

7. Функциональные аналоги (ФА) найдены? (При этом помнить, что могут существовать ФА ТС, работающие не на принципах Э/РЭ/РТ, а на ФПД из других отраслей науки и техники. Возникают задачи поиска ФА на разных ФПД и исследования возможности реализации целевой функции ТС на заданных ФПД.

7.1. Если функциональные аналоги на рынке не найдены, то осуществить патентное исследование.

7.1.1. Если функциональные аналоги найдены в виде патентов, то принять одно из следующих решений:

а) патент купить;

б) дождаться, когда срок действия патента закончится, и воспользоваться готовой формулой изобретения;

в) обойти мешающий патент и придумать своё изобретение, затем защитить результат интеллектуальной деятельности.

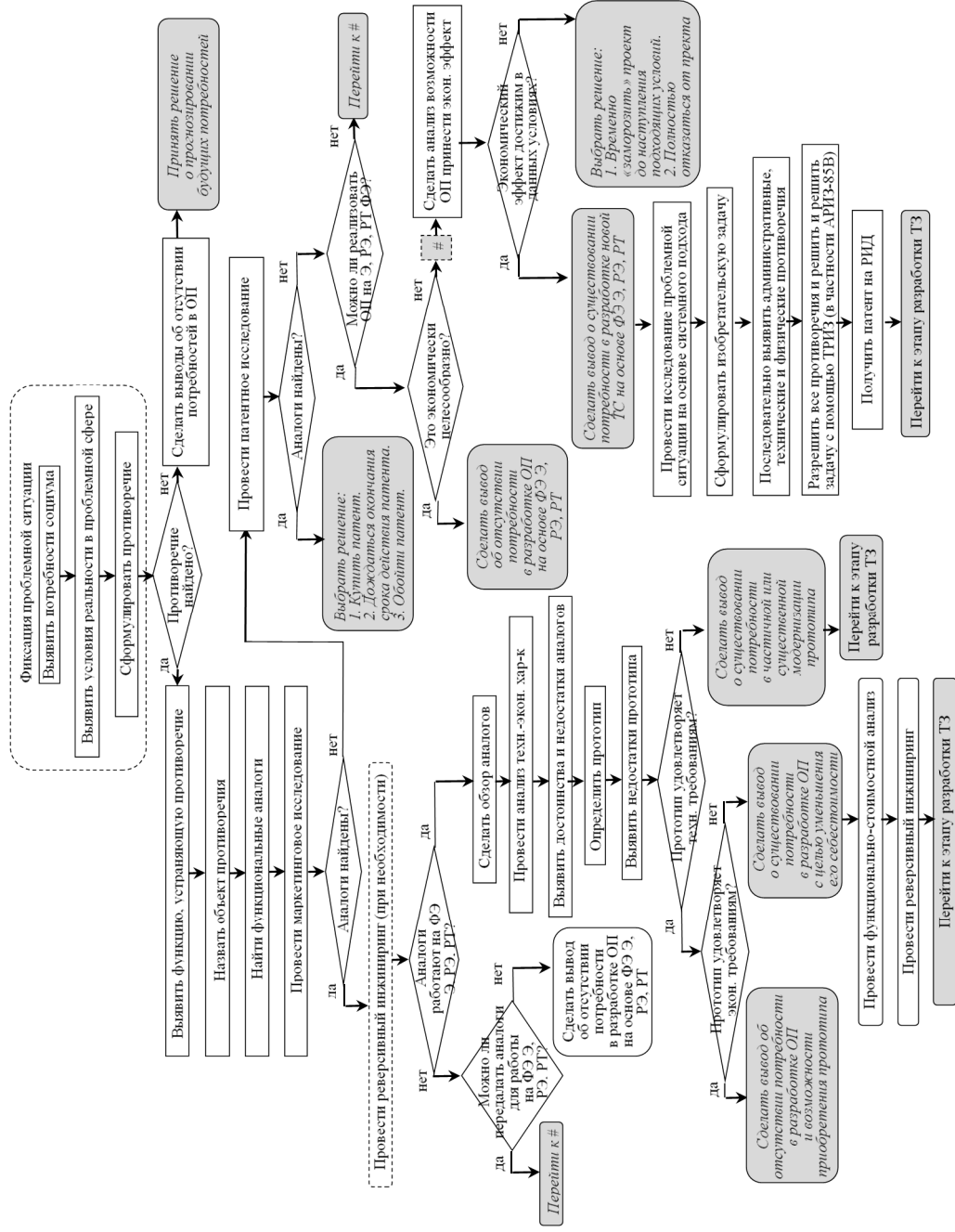


Рисунок 1.33 – Схема обобщённого алгоритма обновления потребности в разработке технической системы

7.1.2. Если функциональные аналоги в виде патентов не найдены, то выяснить, можно ли реализовать объект проектирования на ФПД, отличных от ФПД Э/РЭ/РТ (например, на ФПД квантовой механики или оптики).

7.1.2.1. Если объект проектирования нельзя реализовать на ФПД, отличных от ФПД Э/РЭ/РТ, то перейти к пункту 7.1.2.2.2.

7.1.2.2. Если объект проектирования можно реализовать на ФПД, отличных от ФПД Э/РЭ/РТ, то можно ли отказаться от объекта проектирования, реализующего выполнение потребности на основе принципов Э/РЭ/РТ, в пользу его реализации на других ФПД?

7.1.2.2.1. Если можно отказаться, то сделать вывод об отсутствии потребности в разработке ТС на основе ФПД Э/РЭ/РТ.

7.1.2.2.2. Если нельзя отказаться, то провести прогностический анализ способности объекта проектирования принести ожидаемый экономический эффект.

7.1.2.2.2.1. Экономический эффект достижим в данных условиях (политика, экономика, уровень развития науки и техники, дедлайн проекта)?

7.1.2.2.2.1.1. Если экономический эффект не достижим в данных условиях, то принять одно из следующих решений:

- а) временно «заморозить» проект до наступления подходящих условий;
- б) полностью отказаться от реализации проекта.

7.1.2.2.2.1.2. Если экономический эффект достижим в данных условиях, то сделать вывод о существовании потребности в разработке новой ТС на основе ФПД Э/РЭ/РТ.

7.1.2.2.2.1.3. Провести исследование проблемной ситуации на основе системного подхода (сделать системный анализ проблемной ситуации).

7.1.2.2.2.1.4. Сформулировать изобретательскую задачу.

7.1.2.2.2.1.5. Последовательно выявить административное, техническое и физическое противоречия.

7.1.2.2.2.1.6. Разрешить все противоречия и решить изобретательскую задачу с помощью инструментов ТРИЗ.

7.1.2.2.2.1.7. Получить результат интеллектуальной деятельности и защитить его (получить патент).

7.1.2.2.2.1.8. Перейти к этапу разработки требований технического задания на проектирование ТС.

7.2. Если функциональные аналоги на рынке найдены, то при необходимости провести реверсивный инжиниринг.

7.3. Работа найденных на рынке ФА основана на ФПД Э/РЭ/РТ?

7.3.1. Если нет, то можно ли реализовать ФА, работа которых основана на других ФПД?

7.3.1.1. Если да, то перейти к пункту 7.1.2.2.2.

7.3.1.2. Если нет, то сделать вывод об отсутствии потребности в разработке объекта проектирования на основе ФПД Э/РЭ/РТ.

7.3.2. Если работа найденных на рынке ФА основана на ФПД Э/РЭ/РТ, то сделать обзор найденных ФА.

7.3.3. Провести оценку технических характеристик ФА.

7.3.4. Определить достоинства и недостатки ФА.

7.3.5. Определить лучший из ФА (прототип).

7.3.6. Выявить противоречия между потребностями стейкхолдеров и характеристиками прототипа.

7.3.7. Сформулировать уточнённые технические требования к объекту проектирования.

7.3.8. Удовлетворяет ли прототип уточнённым техническим требованиям?

7.3.8.1. Если прототип не удовлетворяет уточнённым техническим требованиям, то сделать вывод о необходимости модернизации прототипа.

7.3.8.1.1. Сформулировать противоречие между техническими требованиями и реальными характеристиками прототипа.

7.3.8.1.2. Перейти к этапу разработки технического задания на проектирование технического объекта.

7.3.8.2. Если прототип удовлетворяет уточнённым техническим требованиям, то удовлетворяет ли прототип экономическим требованиям?

7.3.8.2.1. Если прототип удовлетворяет экономическим требованиям, то сделать вывод об отсутствии потребности в разработке объекта проектирования и возможности приобретения прототипа.

7.3.8.2.2. Если прототип не удовлетворяет экономическим требованиям, то сделать вывод о существовании потребности в разработке объекта проектирования с целью уменьшения его себестоимости.

7.3.8.2.2.1. Осуществить реверс-инжиниринг.

7.3.8.2.2.2. Перейти к этапу разработки технического задания на проектирование технического объекта.

Таким образом, на этапе обоснования потребности в проектировании ТС имеются следующие возможные проектные выходы/решения:

- 1) не разрабатывать ТС;
- 2) спрогнозировать будущие потребности;
- 3) купить патент;
- 4) дождаться окончания срока действия патента;
- 5) обойти мешающий патент;
- 6) сформулировать задачу разработки объекта проектирования для специалистов других предметных областей;
- 7) приобрести прототип;
- 8) сделать реверс-инжиниринг прототипа;
- 9) уменьшить себестоимость прототипа;
- 10) улучшить технические характеристики прототипа;
- 11) существенно улучшить технические характеристики прототипа;
- 12) заморозить проект;
- 13) изобрести новую ТС.

Результаты проведенного анализа по обоснованию потребности в разработке ЭРЭС удобно представить в виде комбинации дихотомий: «существования–

не существования» потребности в ТС и «существования–не существования» самой ТС. Это дает нам четыре возможные комбинации:

1) ТС не существует, но потребность в её функции существует (задача изобретения новой ТС с новой функцией или внедрение нового ФПД на основе использования новых ФТЭ, ФЭ);

2) ТС не существует и потребности в её проектировании нет (задача прогнозирования будущих потребностей и поиска существующих, но еще неосознанных или невыявленных потребностей);

3) ТС существует (в виде готового изделия) и потребности в её проектировании нет:

а) ТС можно купить;

б) она удовлетворяет требованиям заказчика/пользователя;

в) экономический эффект от её использования равен нулю (ТС не окупится: малый спрос (единичная, малая серия изделий));

г) ТС может быть исполнена на ФПД, отличных от физических принципов электроники, радиоэлектроники и радиотехники (задача доведения информации до специалистов других отраслей науки и техники; формулирование задачи для специалистов другого профиля).

ТС существует в виде идеи, описанной в формуле изобретения (патент), и потребность в проектировании ТС существует (задачи: покупка патента; обход патента; ожидание окончания срока его действия);

4) ТС существует (например, зарубежом) и потребность в её проектировании существует:

а) её нельзя купить (например, в случае военных технологий, экономических санкций; задача импортозамещения);

б) она не удовлетворяет техническим и/или экономическим требованиям (выполнено на основе устаревших ФПД, слишком дорога в обслуживании и эксплуатации) заказчика/пользователя (задача модернизации ТС: простой, существенной);

в) отсутствует комплект проектной и конструкторской документации (задача реверс-инжиниринга с целью импортозамещения (изготовление своих более дешевых и совершенных ТС), перепроектирования для перевыпуска вышедшей из моды продукции (старые сотовые телефоны: компании, их выпускавшие, давно не существуют, КД нет, но есть потребность в изделии, адаптированном под современные технологии), изготовления или диверсионного анализа (поиск уязвимостей с целью осуществления радиоэлектронной борьбы, промышленного шпионажа)).



## Выводы

1. Источниками потребностей являются человек, общество, социум.
2. Движущей силой эволюции технических средств является эволюция потребностей человека.
3. Необходимым основанием технологического развития современного общества является его способность к опережающему, точному и дальновидному прогнозированию будущих, ещё не проявленных в настоящее время массовых потребностей общества.
4. Классификация потребностей общества является основанием классификации ЭРЭС по функциональному назначению.
5. Всякая искусственная система имеет определённое назначение, которое может быть описано системой целей. Цель – это некоторое (возможно, воображаемое) положение дел, к осуществлению которого стремятся. Тогда система целей может быть определена как множество и отношений между ними. Подцель может конкретизировать цель. Зачастую подцель является средством достижения цели.
6. Назначение ЭРЭС как особой категории технических систем, работающих на принципах электроники и радиотехники, заключается в удовлетворении определённого класса потребностей человека, которые можно подразделить на информационные (обмен информацией, т.е. её прием и передача; извлечение, разрушение, регистрация, защита, кодирование, декодирование, шифрование, дешифрование, обработка и хранение данных и информации); управления (управление техническими процессами и регулирование их параметров); контроля (идентификация, классификация и учет физических объектов); измерения параметров физических сред, процессов и объектов; энергетические (обеспечение электропитания других ТС и РЭС); эстетические (электронные музыкальные инструменты, техническое искусство); технические (повышение качества жизни, обеспечение её безопасности, создание комфортных условий жизни).
7. Потребность человека есть функция технической системы.
8. Техническая система есть материальный носитель функции.
9. Техническая система может выполнять одну и ту же функцию, будучи реализованной на основе использования разных физико-технических принципов, отличных от принципов электроники и радиотехники. Проектировщик должен оценить, использование каких ФТП для реализации данной функции более целесообразно (более эффективно, экономично и т.п.).
10. Принятию любого решения сопутствует риск.
11. Прогнозирование и оценка рисков при принятии решения необходимый этап процесса обоснования потребности в проектировании ТС.
12. Технический объект необходимо проектировать тогда, когда подобных объектов не существует и от него нельзя отказаться, когда затраты на проектирование, подготовку производства и изготовление окупаются в установленный срок и приносят положительный экономический эффект. Проектирование требует капиталовложений и теряет смысл, если нет реального потребителя.

13. Прежде чем разрабатывать новую систему, необходимо установить, нужна ли она. Всякое заявление о важности задачи должно опираться на фактические данные. Процесс определения абсолютной ценности потребности, её ценности по сравнению с другими потребностями и желательных свойств данной ТС называется исследованием потребностей. Потребность в разработке ТС необходимо не только выявить и обосновать, но и измерить или оценить количественно, т.е. определить, насколько эта потребность велика. Кроме того, нужно понять, что эффективнее: реализовать ТС на принципах электроники и радиотехники или на других ФПД.

14. Потребность в проектировании на специализированных предприятиях диктуется необходимостью совершенствования выпускаемой продукции, иначе предприятие потеряет рынки сбыта.

15. В организациях, выполняющих работу по внешним заказам, или в том случае, когда предприятие вынуждено переходить на выпуск принципиально новой продукции, приходится принимать решение, нужно ли проектировать. К чему может привести неправильное решение? Во-первых, может быть спроектирован уже существующий объект. Во-вторых, в ходе проектирования или даже в конце его объект может оказаться не нужным заказчику из-за изменившихся условий производства. В-третьих, объект, созданный по выполненному проекту, не принесет ожидаемый эффект. В-четвертых, может оказаться, что объект существует, например, в другой стране и его целесообразней купить.

16. Процедура определения потребности в проектировании относится к маркетинговым исследованиям и выполнять ее заказчик может вместе с проектировщиком.

17. В самом общем случае логика обоснования потребности в разработке технической системы проста: техническую систему нужно проектировать тогда, когда таковой системы не существует, а если она есть, её нельзя приобрести; от системы нельзя отказаться; когда затраты на проектирование, подготовку производства и изготовление окупятся в установленный срок и принесут положительный эффект. Однако более детальный анализ этого алгоритма позволяет выявить ещё несколько важных потенциальных решений, которые может принять проектировщик на данном этапе работы.

18. Главные вопросы, на которые должен ответить системотехник на этапе обоснования потребности:

- существует ли потребность в объекте проектирования (нужно ли и целесообразно ли проектировать);
- каков характер потребности (требуется создать новую ТС или модернизировать существующие ТС, в какой степени);
- каков масштаб (объём) потребности (сколько потребителей будут пользоваться ТС);
- можно ли реализовать ОП на основе других ФТП, дешевле ли это будет;
- как долго будет существовать потребность в ОП;
- как появление новой ТС изменит сценарии поведения использующих её людей?

19. Таким образом, имеем следующее условие задачи и описание ожидаемого результата её решения.

*Исходные данные для обоснования потребности в проектировании ЭРЭС:*

- 1) результат выявления и исследования социальных запросов и потребностей общества в условиях настоящего времени;
- 2) результат научно-технического прогнозирования эволюции общественных потребностей.

*Результаты обоснования потребности в проектировании ЭРЭС:*

- 1) обоснованный вывод проектировщика о наличии или об отсутствии потребности в проектировании ЭРЭС с конкретизацией решения для первого случая;
- 2) определение типа решаемой задачи (разработка новых ЭРЭС, модернизация (частичная или существенная) имеющихся ЭРЭС);
- 3) масштаб потребности, определяющий объем производства ЭРЭС.

### **Контрольные вопросы**

1. Как открывается новое знание? Предложите алгоритм открытия нового знания.
2. Что такое уровни разукрупнения РЭС?
3. Чем большие системы отличаются от сложных?
4. Как между собой соотносятся следующие понятия: радиоэлектронное средство, техническое средство, техническая система, технический объект?
5. Каковы особенности конструктивных определений понятия «система»?
6. Что такое системотехника РЭС?
7. Чем макропроектирование отличается от микропроектирования?
8. Какую роль выполняет схема в деятельности проектировщиков и системотехников?
9. Что такое схемотехника РЭС?
10. Как можно кратко изложить суть деятельности системотехника РЭС?
11. Как можно кратко изложить суть деятельности схемотехника РЭС?
12. Что такое проектирование?
13. Что является результатом процесса проектирования?
14. Какие уровни иерархии описаний ЭРЭС существуют?
15. Что является ядром иерархии описаний ЭРЭС?
16. Какова систематика задач поиска и выбора проектно-конструкторских решений?
17. Как связан экономический эффект решения с уровнем задач выбора проектно-конструкторских решений?
18. Что такое жизненный цикл РЭС? Из каких стадий он состоит?
19. В чем состоит содержание CALS-технологий?
20. Что такое уровни готовности технологий? Для каких целей они применяются?

21. Каковы перспективы развития электронных и радиоэлектронных средств с точки зрения смежных наук?
22. Как связаны процессы научного исследования, проектирования, конструирования и производства радиоэлектронных средств?
23. Почему в системотехнике важное место отводится изучению креативных методов мышления?
24. Какие креативные методы мышления проектировщика существуют?
25. Какие существуют задачи проектирования?
26. Что такое системный подход? Каковы его основные задачи?
27. Что понимается под методологией системотехнического проектирования?
28. Что такое эволюция технических систем?
29. Какие существуют законы развития технических систем?
30. К чему сводится иерархическое исчерпание возможностей конструкторско-технологических решений?
31. Что такое S-кривая и как она связана с понятием изменения показателя качества технической системы при ее конструктивной эволюции?
32. Какова роль программного обеспечения в разработке и эксплуатации ТС?
33. Какие существуют законы развития программных систем?
34. Что такое потребности?
35. Какова классификация потребностей?
36. Какова структура противоречия?
37. С какой целью используются дихотомии существования ТС и потребности в её проектировании?
38. Сколько возможных решений и каких может принять системотехник на этапе обоснования потребности?
39. В чем заключается цель исследования окружения технической системы?
40. Для чего используются перечни контрольных вопросов Мэтчетта и Холла?
41. Как проводится маркетинговое исследование?
42. Что такое реверс-инжиниринг?
43. Какова цель патентного исследования?
44. Какие существуют информационные состояния мира и его наблюдателя?
45. Как осуществляется прогнозирование?
46. Для чего и каким образом осуществляется формализация научно-исследовательских и проектных задач системотехники?
47. Как можно охарактеризовать отношение понятий «план» и «прогноз»?

## Упражнения

1. Разработайте форму анкеты для опроса общественного мнения и с ее помощью соберите у одноклассников и своих товарищей по вузу информацию о существующих нереализованных технических средствах потребностях общества. Результаты исследования зафиксируйте в письменном виде. Предложите и опишите функции, устраняющие зафиксированные противоречия. Подберите потенциальным объектам проектирования подходящие названия.

2. Проведите анализ эволюции потребностей и возможностей современной науки и техники: выясните, чем стали отличаться потребности человека, использующего современный смартфон, от потребностей человека, использовавшего телефон с дисковым набирателем номера. Охарактеризуйте социальные условия каждого периода исторического времени. Опишите поведение пользователя каждой ТС и сформулируйте сценарии использования каждого устройства.

3. Выберите из приложения 4 10 разных ТС, проведите их исследование и сформулируйте идеи (например монитор без кабелей электропитания и сигнала, система управления дорожным движением (светофоры, видеокамера, нейрокompьютер) с видеонаблюдением за дорожной и пешеходной обстановкой и нейросетевым управлением) для не менее 10 задач для каждой ТС по их частичной и существенной модернизации (используйте критерий ИКР и инструментарий ТРИЗ). Придумайте не менее 10 абсолютно новых ТС РЭС.

4. Сформулируйте не менее 10 задач синтеза нового знания в области Э/РЭ/РТ на фундаментальном уровне.

5. Проведите исследование и выясните, как можно улучшить главный показатель выбранной вами ТС; второстепенные показатели ТС. Используйте методы ТРИЗ.

6. Используя методы и инструменты ТРИЗ, выявите и сформулируйте актуальные противоречия между потребностями современного общества и текущими условиями реальности, которые можно было бы устранить с помощью новых классов ТС и достичь тем самым существенных экономического, политического, военного, социального и других эффектов.

7. Для известных вам представителей РЭА (бытовой, промышленной и др.): выявите и сформулируйте требования и условия, назовите противоречия, которые устраняются этой РЭА.

8. Используя методы подавления психологической инерции из арсенала ТРИЗ (в частности ИКР), спрогнозируйте возможные перспективы развития потребностей общества или определенных социальных групп по отдельным отраслям науки и техники (мобильные технологии, умный дом, IoT, робототехника (включая БПЛА), медицинская, промышленная, военная электроника и т.д.).

9. Приведите примеры областей жизнедеятельности человека, в которых противоречие между потребностями и условиями реальности в настоящее время отсутствует, однако может проявиться в ближайшем будущем. Ответ обоснуйте.

10. Задайте противоречие. Опишите функцию, которая его устраняет.

11. Задайте ФПД ЭРЭС (например ФПД мемристора). Охарактеризуйте свойства ТС, которая будет реализована на этом ФПД.

12. Задайте ТС, работающую на ФПД, отличных от ЭРЭ. Предложите возможные ФПД ЭРЭ (пользуясь приложением 1), с помощью которых можно реализовать ТС с той же функцией.

13. Заданы механический арифмометр и современный персональный компьютер. На каких ФПД основана работа каждого ТО? Проанализируйте алгоритм работы каждого ТО.

14. Предложите ТС, реверс-инжиниринг которых в настоящее время мог бы принести ощутимый экономический эффект нашей стране.

15. Изобретите новую ТС.

16. Задана функция ТО. Найдите аналоги этого ТО (их работа может быть основана на ФПД, отличных от ЭРЭ).

17. Проведите поиск функциональных аналогов, патентное исследование, маркетинговое исследование для выбранной ТС.

18. Нарисуйте генеалогическое дерево эволюции интересующего вас бытового ЭРЭС (годы, изобретатели, обстоятельства, при которых было открыто улучшение ЭРЭС, использующиеся ФПД). Какие ФПД, ФТЭ используются в каждом поколении предков этой ТС? Спрогнозируйте или постройте обоснованное предположение о том, каков будет представитель следующего поколения данного класса устройств. На каких ФПД он может работать? (пример: загоревшаяся от молнии ветка – факел – масляная лампа – свеча Яблочкова – лампа накаливания – светодиодная лампа – ...?).

19. Найдите функциональные аналоги заданных ТС (РЛС, система электрического освещения, система GPS-навигации, ...), работа которых основана на ФПД и ФЭ, отличных от ФПД электроники и радиотехники. Опишите их ФПД. Назовите разделы физики, в которых изучаются данные ФПД.

20. Определите аналог современной радиолокационной системы, которым пользовались люди несколько веков назад. Охарактеризуйте его ФПД.

21. Проведите функциональный/конструктивный анализ выбранного ранее ЭРЭС. Оформите в виде инфографики, реферата, презентации.

22. Сделайте обзор последних моделей мобильных телефонов нескольких мировых компаний (например, Apple, Samsung, Xiaomi, Nokia, ...) и соберите информацию по их основным техническим характеристикам, используя сайты фирм-производителей или официальных дилеров продукции. Определите достоинства и недостатки каждой модели, проведите их сравнительный анализ и выявите лучший из аналогов (найдите прототип). Пользуясь методами ТРИЗ, найдите противоречия между потребностями пользователей этих продуктов и характеристиками прототипа, выявите в нём недостаток. Сформулируйте уточнённые технические требования к прототипу. Предложите возможные направления усовершенствования прототипа.

23. Выполните предыдущее задание для робопылесоса, телевизора, автомобильной сигнализации.

24. Используя методы ТРИЗ (в частности ИКР), спрогнозируйте возможные перспективы развития существующих ЭРЭС. Согласно сделанным прогнозам определите направления поисковых исследований новых ФПД.

25. Перечислите как можно большее количество известных вам ЭРЭС.

26. Приведите примеры ситуаций и условий возникновения потребности в осуществлении реверс-инжиниринга.

27. Представьте, что вы оказались на неизвестной планете с развитой технической инфраструктурой. Вам в руки попался некий предмет. Ваша задача определить, природного или искусственного происхождения этот объект. По каким признакам и каким образом (в каком порядке) вы решите эту задачу? (Задача по сюжетам фантастических романов С. Лема.)

28. Представьте себе, что вы живете в мире, где не существует интересующая вас ТС (например, УКВ-трансивер). Поставьте себя на место проектировщика, действующего по алгоритму системотехнического проектирования РЭС. К какому решению вы придете? На основе АСПЭ РЭС выберите и обоснуйте решение, которое вы должны принять в описанных условиях.

29. Выберите любой предмет и предложите его усовершенствование с помощью ТС, работающих на принципах ЭРЭС (например улучшите обычные очки).

30. Проведите классификацию множества ТС из приложения 1. Придумайте, какие основания классификации можно подобрать. В качестве подсказки используйте таблицу с примерами потребностей и функций ТС (см. таблицу 1).

31. Распределите по категориям потребностей (информационные, управления, контроля, измерения, эстетические, технические) РЭС из приложения 1.

32. Выберите конкретный тип устройств из приложения 1 и постройте его классификацию.

33. Пользуясь методами генерации новых идей, придумайте новые ТС.

34. Прочитайте книгу С. Лема «Сумма технологий» и на основе анализа современных реалий науки и техники определите, какие из описанных Лемом фантастических ТС уже реализованы или имеют значительный шанс реализоваться в ближайшем будущем.

35. Для каждого вопроса из контрольных перечней Мэтчетта и Холла обсудите, где получить наиболее надежные сведения: у конечного потребителя, у людей, которые будут устанавливать и ремонтировать ТС, у администрации или из некоторой комбинации этих источников.

36. Рассмотрите интересующую вас ТС и дайте качественные ответы на восемь вопросов «Перечня вопросов № 3: Характеристика рынка» (см. п. 1.3.4).

## Рекомендуемая литература

1. Диксон П. Фабрики мысли / П. Диксон ; пер. с англ. под общ. ред. В.И. Седова. – М. : Прогресс, 1976. – 419 с.
2. Физические явления и эффекты в технических системах / В.Л. Бурковский, Ю.Н. Глотова, Д.А. Ефремов [и др.]. – Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2007. – 247 с.
3. Селюцкий А.Б. Правила игры без правил / А.Б. Селюцкий. – Петрозаводск, Карелия, 1989.
4. Тринг М. Как изобретать? / М. Тринг, Э. Лейтуэт ; пер с англ. А.С. Добро-славского ; под ред. и с предисл. В.В. Патрикеева. – М. : Мир, 1980. – 272 с.
5. Техническое творчество: теория, методология, практика. Энциклопедиче-ский словарь-справочник / под ред. А.И. Половинкина, В.В. Попова. – М. : НПО «Ин-форм-система», 1995. – 408 с.
6. Клег Б. Интенсивный курс по развитию творческого мышления : пер. с англ. / Б. Клег, П. Бич. – М. : Астрель : АСТ, 2004. – 392 с.
7. Чяпяле Ю.М. Методы поиска изобретательских идей / Ю.М. Чяпяле. – Л. : Машиностроение, 1990. – 96 с.
8. Альтшуллер Г. Как стать гением: Жизненная стратегия творческой личности / Г. Альтшуллер, И. Верткин. – Мн. : Беларусь, 1994. – 479 с.
9. Альтшуллер Г. Найти идею: Введение в ТРИЗ – теорию решения изобре-тательских задач / Г. Альтшуллер. – 4-е изд. – М. : Альпина Паблишер, 2011. – 400 с. – (Серия «Искусство думать»).
10. Уразаев В.Г. ТРИЗ в электронике / В.Г. Уразаев. – М. : Техносфера, 2006. – 320 с. – (Серия «Мир электроники»).
11. Физические явления и эффекты в технических системах / В.Л. Бурковский, Ю.Н. Глотова, Д.А. Ефремов [и др.]. – Воронеж: ГОУВПО Воронежский гос. технич. ун-т, 2007. – 247 с.
12. Шарыгина Л.И. События и даты в истории радиоэлектроники / Л.И. Шары-гина. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2011. – 306 с.
13. Быховский М.А. Развитие телекоммуникаций: на пути к информационному обществу. История развития электроники в XX столетии : учеб. пособие / М.А. Бы-ховский. – М. : Книжный дом «Либроком», 2012. – 352 с.
14. Higgins J.M. 101 Creative Problem Solving Techniques. The Handbook of New Ideas for Business. – 1994. – 241 p.
15. Игошев Б.М. История технических инноваций : учеб. пособие / Б.М. Иго-шев, А.П. Усольцев. – М. : ФЛИНТА, 2013. – 352 с.
16. Юшина Л.Д. Твёрдотельная хемотроника / Л.Д. Юшина. – Екатеринбург : УрО РАН, 2003. – 103 с.
17. Лем С. Сумма технологии / С. Лем. – М. : АСТ, 2006.
18. Философия техники в ФРГ : пер. с нем. и англ. / сост. и предисл. Ц.Г. Арза-каняна, В.Г. Горохова. – М. : Прогресс, 1989. – 528 с.



19. Горохов В.Г. Введение в философию техники : учеб. пособие / В.Г. Горохов, В.М. Розин; науч. ред. Ц.Г. Арзаканян. – М. : ИНФРА-М, 1998. – 224 с.
20. Курушин В.Д. Дизайн техносферы / В.Д. Курушин. – М. : ДМК Пресс, 2014. – 560 с.
21. Демидова Л.А. Принятие решений в условиях неопределенности / Л.А. Демидова, В.В. Кираковский, А.Н. Пылькин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2012. – 288 с.
22. Науман Э. Принять решение – но как? : пер. с нем. / Э. Науман. – М. : Мир, 1987. – 198 с.
23. Теория прогнозирования и принятия решений : учеб. пособие / под ред. С.А. Саркисяна. – М. : Высш. шк., 1977.
24. Шейнбаум В.С. Методология инженерной деятельности : учеб. пособие / В.С. Шейнбаум. – Н. Новгород, 2007. – 360 с.
25. Техническая инновационика. Методы изобретательского творчества: моногр. / О.В. Измеров [и др.]. – Орел : Госуниверситет – УНПК, 2011. – 149 с.
26. Дружинин В.В. Проблемы системологии (проблемы теории сложных систем) / В.В. Дружинин, Д.С. Конторов. – М. : Сов. радио, 1976. – 302 с.
27. Дружинин В.В. Вопросы военной системотехники / В.В. Дружинин, Д.С. Конторов. – М. : Воениздат, 1976. – 224 с.
28. Дружинин В.В. Основы военной системотехники / В.В. Дружинин, Д.С. Конторов. – М. : Воениздат, 1983. – 416 с.
29. Дружинин В.В. Системотехника / В.В. Дружинин, Д.С. Конторов. – М. : Радио и связь, 1985. – 200 с.
30. Горохов В.Г. Методологический анализ системотехники / В.Г. Горохов. – М. : Радио и связь, 1982. – 160 с.

## Список литературы

1. Казаков Б.Н. Словарь научных терминов : справочное пособие / Б.Н. Казаков. – Казань, КГУ, 2008. – 32 с.
2. **ГОСТ Р 52003-2003.** Уровни разукрупнения радиоэлектронных средств. Термины и определения.
3. Радиотехника: Энциклопедия / под ред. Ю.Л. Мазора, Е.А. Мачусского, В.И. Правды. – М. : Издательский дом «Додэка-XXI», 2010. – 944 с.
4. **ГОСТ Р 57193-2016.** Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла систем.
5. Мизгулин В. Системный инженер. Как начать карьеру в новом технологическом укладе / В. Мизгулин. – «Издательские решения», 2017. – 109 с.
6. Хубка В. Теория технических систем / В. Хубка; пер. с нем. В.В. Ачкасова, Н.И. Зук, Е.Б. Матвеевой ; под ред. К.А. Люшинского. – М. : Мир, 1987. – 209 с.
7. Ярушин С.Г. Проектирование нестандартного оборудования : учеб. / С.Г. Ярушин, А.Г. Схиртладзе. – 2-е изд, перераб. и доп. – Пермь : Пермский гос. техн. ун-т, 2004. – 440 с.

8. Системная инженерия. Принципы и практика / А. Косяков, У. Свит [и др.] ; пер. с англ. под ред. В.К. Батоврина. – М. : ДМК Пресс, 2014. – 624 с.
9. Systems Engineering Principles and Practice / A. Kossiakoff, W.N. Sweet, S.J. Seymour [et al.]. – 2d ed. – Hoboken, New Jersey: A John Wiley & Sons, 2011. – 560 p.
10. Гуд Г.Х. Системотехника. Введение в проектирование больших систем / Г.Х. Гуд, Р.Э. Макол ; пер. с англ. К.Н. Трофимова, С.Е. Жорно, И.В. Соловьева ; под ред. Г.Н. Поварова. – М. : Советское радио, 1962. – 390 с.
11. Честнат Г. Техника больших систем (средства системотехники) / Г. Честнат ; пер. с англ. И.Н. Васильева, Е.Н. Дубровского, А.С. Манделя, В.Ю. Невраева ; под ред. О.И. Авена. – М. : Энергия, 1969. – 686 с.
12. Акоф Р. Основы исследования операций / Р. Акоф, М. Сасиени ; пер. с англ. В.Я. Алтаева ; под ред. И.А. Ушакова. – М. : Мир, 1971. – 532 с.
13. Акофф Р. О целеустремленных системах / Р. Акофф, Ф. Эмери ; пер. с англ. ; под ред. И.А. Ушакова. – М. : Советское радио, 1974. – 272 с.
14. Быков В.В. Исследовательское проектирование в машиностроении / В.В. Быков, В.П. Быков. – М. : Машиностроение, 2011. – 256 с.
15. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества : учеб. пособие для студентов вузов / А.И. Половинкин. – М. : Машиностроение, 1988. – 368 с.
16. Хорошев А.Н. Основы системного проектирования технических объектов / А.Н. Хорошев. – М., 2011. – 125 с.
17. Антипенский Р.В. Схемотехническое проектирование и моделирование радиоэлектронных устройств / Р.В. Антипенский, А.Г. Фадин. – М. : Техносфера, 2007. – 128 с. – Серия. Мир электроники.
18. Техническое творчество: теория, методология, практика. Энциклопедический словарь-справочник / под ред. А.И. Половинкина, В.В. Попова. – М. : НПО «Информ-система», 1995. – 408 с.
19. Р 50-605-80-93. Рекомендации. Система разработки и постановки продукции на производство. Термины и определения
20. Blanchard B.S. Systems Engineering and Analysis Pearson New International Edition / B.S. Blanchard, W.J. Fabrycky. – 5th Ed. – London : Pearson Education Limited, 2014. – 846 p.
21. ISO 15704:2000 Industrial automation systems – Requirements for enterprise-reference architectures and methodologies (ГОСТ Р ИСО 15704-2008. Требования к стандартным архитектурам и методологиям предприятия).
22. Батоврин В.К. Управление жизненным циклом технических систем: серия докладов (зеленых книг) в рамках проекта «Промышленный и технологический форсайт Российской Федерации» / В.К. Батоврин, Д.А. Бахтурин ; ред. И.С. Мацкевич, М.С. Липецкая; Фонд «Центр стратегических разработок «Северо-Запад» (Серия докладов в рамках проекта «Промышленный и технологический форсайт Российской Федерации»). – М., СПб., 2012. – Вып. 1. – 59 с.

23. Трухин М.П. Основы компьютерного проектирования и моделирования радиоэлектронных средств : учеб. пособие / М.П. Трухин. – М. : Горячая линия-Телеком, 2017.
24. Engel A. Practical creativity and innovation in systems engineering / A. Engel. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2018. – 507 p.
25. ISO/IEC/IEEE 24765:2017 Systems and software engineering – Vocabulary. – 2017.
26. Дрещинский В.А. Методология научных исследований : учеб. для бакалавриата и магистратуры / В.А. Дрещинский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Издательство Юрайт, 2017. – 324 с. – Серия. Бакалавр и магистр. Академический курс.
27. Гиг Дж. Ван. Прикладная общая теория систем : пер. с англ. / Дж. Ван Гиг. – М. : Мир, 1981. – Ч. 1. – 336 с.
28. Шнейберг Я.А. История выдающихся открытий и изобретений (электротехника, электроэнергетика, радиоэлектроника) / Я.А. Шнейберг. – М. : Издательский Дом МЭИ, 2009. – 118 с.
29. Проворов А.В. Техническое творчество : учеб. пособие для вузов / А.В. Проворов. – 2-е изд. – М. : Издательство Юрайт, 2020 ; Ярославль : Издат. Дом ЯГТУ, 423 с.
30. Кузубных Н.И. Физика функциональных устройств (Функциональные устройства с зарядовой связью и на поверхностных волнах) : учеб. пособие / Н.И. Кузубных, А.В. Убайчин. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2017. – 104 с.
31. Ревенков А.В. Теория и практика решения технических задач : учеб. пособие / А.В. Ревенков, Е.В. Резчикова. – М. : ФОРУМ, 2008. – 384 с.
32. Алексеев В.П. Системная технология инженерного проектирования РЭС в дипломировании : учеб. пособие / В.П. Алексеев, Д.В. Озёркин. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 97 с.
33. Меерович М.И. Теории решения изобретательских задач / М.И. Меерович, Л.И. Шрагина. – Минск : Харвест, 2003. – 428 с. (Библиотека практической психологии.)
34. Шпаковский Н.А. ОТСМ-ТРИЗ: подходы и практика применения : учеб. пособие / Н.А. Шпаковский. – М. : ИНФРА-М, 2020. – 504 с.
35. Бабич Н.П. Компьютерная схемотехника. Методы построения и проектирования : учеб. пособие / Н.П. Бабич, И.А. Жуков. – К. : МК-Пресс, 2004. – 576 с.
36. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Законы\\_Лемана](https://ru.wikipedia.org/wiki/Законы_Лемана).
37. Belady L.A. A model of large program development (англ.) / L.A. Belady, M.M. Lehman // IBM Systems Journal. – 1976. – Iss. 15, N 3. – P. 225–252. – doi:10.1147/sj.153.0225.
38. Lehman M.M. Programs, life cycles, and laws of software evolution (англ.) / M.M. Lehman // Proceedings of the IEEE. – 1980. – Iss. 68, N 9. – P. 1060–1076. – doi:10.1109/PROC.1980.11805.

39. Lehman M.M. Laws of software evolution revisited (англ.) / М.М. Lehman // Software process technology. – Springer Berlin Heidelberg, 1996. – P. 108–124. – doi:10.1007/BFb0017737.
40. Новиков А.М. Методология / А.М. Новиков, Д.А. Новиков. – М. : Синтег, 2007. – 668 с.
41. Философский энциклопедический словарь. – М. : Сов. энциклопедия, 1983.
42. Платонов К.К. Краткий словарь системы психологических понятий / К.К. Платонов. – М. : Высшая школа, 1981.
43. Краткий психологический словарь / сост. Л.А. Карпенко ; под общ. ред. А.В. Петровского, М.Г. Ярошевского. – М. : Политиздат, 1985.
44. Голдовский Б.И. Рациональное творчество. О направленном поиске новых технических решений / Б.И. Голдовский, М.И. Вайнерман. – М. : Речной транспорт, 1990.
45. Mobley R.K. Root cause failure analysis / R.K. Mobley. – Newnes, 1999. – 325 p.
46. Иерархическая модель потребностей человека по Абрахаму Маслоу. – Википедия.
47. Кривин Н.Н. Введение в методологию системо- и схмотехнического проектирования электронных и радиоэлектронных средств : учеб. пособие для бакалавриата, специалитета и магистратуры / Н.Н. Кривин. – Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2020. – 250 с.
48. Баркер Дж. Опережающее мышление: Как увидеть новый тренд раньше других : пер. с англ. / Дж. Баркер. – М. : Альпина Паблишер, 2014. – 188 с.
49. Аникин Б.А. Концепция создания продукции и достижений мирового уровня: моногр. / Б.А. Аникин, О.Б. Аникин, В.Н. Гришин. – М. : ИНФРА-М, 2019. – 178 с.
50. Холл А.Д. Опыт методологии для системотехники : пер. с англ. / под ред. Г.Н. Поварова. – М. : Советское радио, 1975. – 448 с.
51. Джонс Д. Методы проектирования / Д. Джонс. – М. : Мир, 1986.
52. Дикарев В.И. Справочник изобретателя / В.И. Дикарев. – СПб. : Лань, 1999. – 352 с.
53. Протокол заседания Правительственной комиссии по импортозамещению; О реализации планов импортозамещения в промышленности // Правительство России <http://government.ru/news/22797/>.
54. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Обратная\\_разработка](https://ru.wikipedia.org/wiki/Обратная_разработка).
55. Wang W. Reverse Engineering: Technology of Reinvention / W. Wang. – CRC Press, 2011.
56. Bell W. Reverse engineering / W. Bell. – Global Media-Education for everyone, 2007.
57. Messler R. Reverse Engineering Mechanisms, Structures, Systems Materials / R. Messler. – McGraw Hill Education, 2014.

58. Соснин Э.А. Методология управления результатами интеллектуальной деятельности : учеб. пособие / Э.А. Соснин, В.Ф. Канер, Е.Н. Пантюшина. – Томск : Издательский Дом ТГУ, 2016. – 178 с.
59. Повилейко Р.П. Инженерное творчество / Р.П. Повилейко. – М. : Знание, 1977. – 62 с.
60. Patrick T. Hester. Systemic Thinking. Fundamentals for Understanding Problems and Messes / Patrick T. Hester, Kevin MacG. Adams. – Springer, 2014. – 251 p.
61. Salmon P.M. Systems thinking in practice. Applications of the event analysis of systemic teamwork method / P.M. Salmon, N.A. Stanton, G.H. Walker. – CRC Press, 2019. – 319 p.
62. Философский энциклопедический словарь. – М. : Сов. энциклопедия, 1983. – 840 с.
63. Кондаков Н.И. Логический словарь-справочник / Н.И. Кондаков. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Наука, 1975. – 722 с.
64. Systems Engineering Handbook. – 4<sup>th</sup> ed. – INCOSE, Wiley, 2015.
65. Эйрес Р. Научно-техническое прогнозирование и долгосрочное планирование / Р. Эйрес. – М. : Мир, 1971.
66. Макаренко С.И. Справочник научных терминов и обозначений / С.И. Макаренко. – СПб. : Наукоемкие технологии, 2019. – 254 с.

## 2 ФОРМУЛИРОВКА ТРЕБОВАНИЙ К ОБЪЕКТУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Кто хочет много достигнуть,  
должен ставить высокие требования.

*Йоганн Вольфганг Гёте*

### 2.1 Постановка задачи

Проектирование как осознанная целенаправленная деятельность обладает определённой структурой, то есть последовательностью и составом стадий и этапов разработки проекта, совокупностью процедур и привлекаемых технических средств, взаимодействием участников процесса.

В настоящее время существуют два представления структуры проектирования, подобные по форме, но различные по целям и подходам к деятельности. Это структура в виде стадий разработки проектной документации (стадий проектирования) и структура процесса проектирования [1].

Стадии проектирования регламентированы ГОСТ 2.103-2013 и ГОСТ Р 15.301-2016. Последовательность выполнения всех стадий образует официальную структуру процесса разработки проектной документации, которая, как правило, используется при официальных взаимоотношениях между заказчиком и исполнителем или между соисполнителями работ (рисунок 2.1). Документация необходима для отчёта перед заказчиком о проделанной работе, проверки или повторения разработок другими исполнителями, подготовки производства и обслуживания изделия в период эксплуатации.

Структура проектирования устанавливает стадии разработки конструкторской документации на изделия всех отраслей промышленности и этапы выполнения работ внутри каждой стадии, то есть состав документации и виды работ. Основные стадии структуры включают: разработку технического задания (ТЗ), технического предложения, эскизного проекта, технического проекта, рабочей документации [2]. Связь стадий и процедур проектирования показана на рисунке 2.2.

*Разработка технического задания* – формулировка назначения и области применения разрабатываемых ЭРЭС, технических, конструктивных, эксплуатационных и экономических требований к ЭРЭС, условий их хранения и транспортирования, требований по надежности, правил проведения испытаний и приемки образцов в производство.

*Техническое предложение (ТП)* – проведение анализа существующих технических решений, патентных исследований, проработка возможных вариантов создания ЭРЭС, выбор оптимального решения, макетирование отдельных узлов ЭРЭС, выработка требований для последующих этапов проектирования, оценка стоимости опытного образца ЭРЭС.

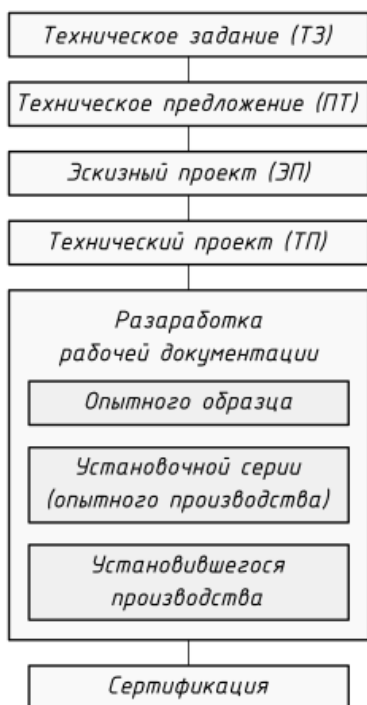


Рисунок 2.1 – Стадии проектирования



Рисунок 2.2 – Процедурная модель проектирования

*Эскизный проект (ЭП)* – осуществление конструкторской и технологической проработки выбранного варианта реализации ЭРЭС; изготовление действующего образца или серии ЭРЭС; проведение их испытаний в объеме, достаточном для подтверждения установленных в ТЗ технических и эксплуатационных параметров; организация разработки в полном объеме необходимой конструкторской документации с присвоением ей литеры «Э»; проработка основных вопросов технологии изготовления, наладки и испытания элементов, узлов, устройств и ЭРЭС в целом; предварительная оценка надежности изделия.

Результатом ЭП является совокупность документов, содержащих принципиальные решения и дающих общее представление об устройстве и принципе работы разрабатываемого объекта, а также данные, определяющие его назначение, основные параметры и габаритные размеры. В случае большой сложности объекта этому этапу может предшествовать аван-проект (предпроектное исследование), обычно содержащий теоретические исследования, предназначенные для обоснования принципиальной возможности и целесообразности создания данного объекта.

При необходимости на стадии ЭП осуществляют изготовление и испытание макетов разрабатываемого объекта.

*Технический проект (ПТ)* – принятие окончательных решений о конструктивном оформлении ЭРЭС и составляющих их узлов, разработка полного комплекта КД и ТД с присвоением литеры «Т», изготовление опытной серии ЭРЭС, проведение испытаний ЭРЭС на соответствие техническим и эксплуатационным требованиям ТЗ. Результатом ПТ является совокупность документов, которые содержат окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве проектируемого объекта, исходные данные для выполнения рабочей документации. Результатом ПТ является основой для создания полного комплекта рабочей конструкторской документации, которой присваивается литера «О».

*Рабочий проект (РП)* – разработка подробной документации для изготовления опытного образца и последующего его испытания. Испытания проводят в несколько этапов (от заводских до приёмо-сдаточных), по результатам которых корректируют проектные документы. Далее разрабатывают документацию для изготовления установочной серии, её испытания, оснащения производственного процесса основных составных частей изделия. По результатам этого этапа снова корректируют проектные документы и разрабатывают документацию для изготовления и испытания головной (контрольной) серии. На основе документов окончательно отработанных и проверенных в производстве изделий, изготовленных по зафиксированному и полностью оснащённому технологическому процессу, разрабатывают завершающую документацию установившегося производства.

Стадии составления ТЗ, технического предложения и ЭП, как правило, входят в научно-исследовательскую работу (НИР), а стадии технического проекта и технологической подготовки производства – в опытно-конструкторскую работу (ОКР).

Завершает цикл работ этап, подводящий итог проектной деятельности, — сертификация. Её назначение – определение уровня качества созданного изделия и подтверждение соответствия требованиям тех стран, где предполагается его последующая реализация. Необходимость выделения этого этапа в виде самостоятельного вызвана тем, что в настоящее время экспорт продукции или её реализация внутри страны во многих случаях недопустимы без наличия у неё сертификата качества. Сертификация может быть обязательной или добровольной. Обязательной сертификации подлежат товары, на которые законами или стандартами установлены требования, обеспечивающие безопасность жизни и здоровья потребителей, охрану окружающей среды, предотвращение причинения вреда имуществу потребителя. Добровольная сертификация проводится по инициативе предприятий. Обычно это делается с целью официального подтверждения характеристик продукции, изготавливаемой предприятием, и, как следствие, повышения доверия к ней у потребителей.

На рисунке 2.3 для стадий и процедур проектирования представлены методы решения задач и источники соответствующей информации.

В настоящее время предложен ряд структур и алгоритмов проектирования, совпадающих в основных чертах и различающихся только содержанием или названием отдельных этапов.



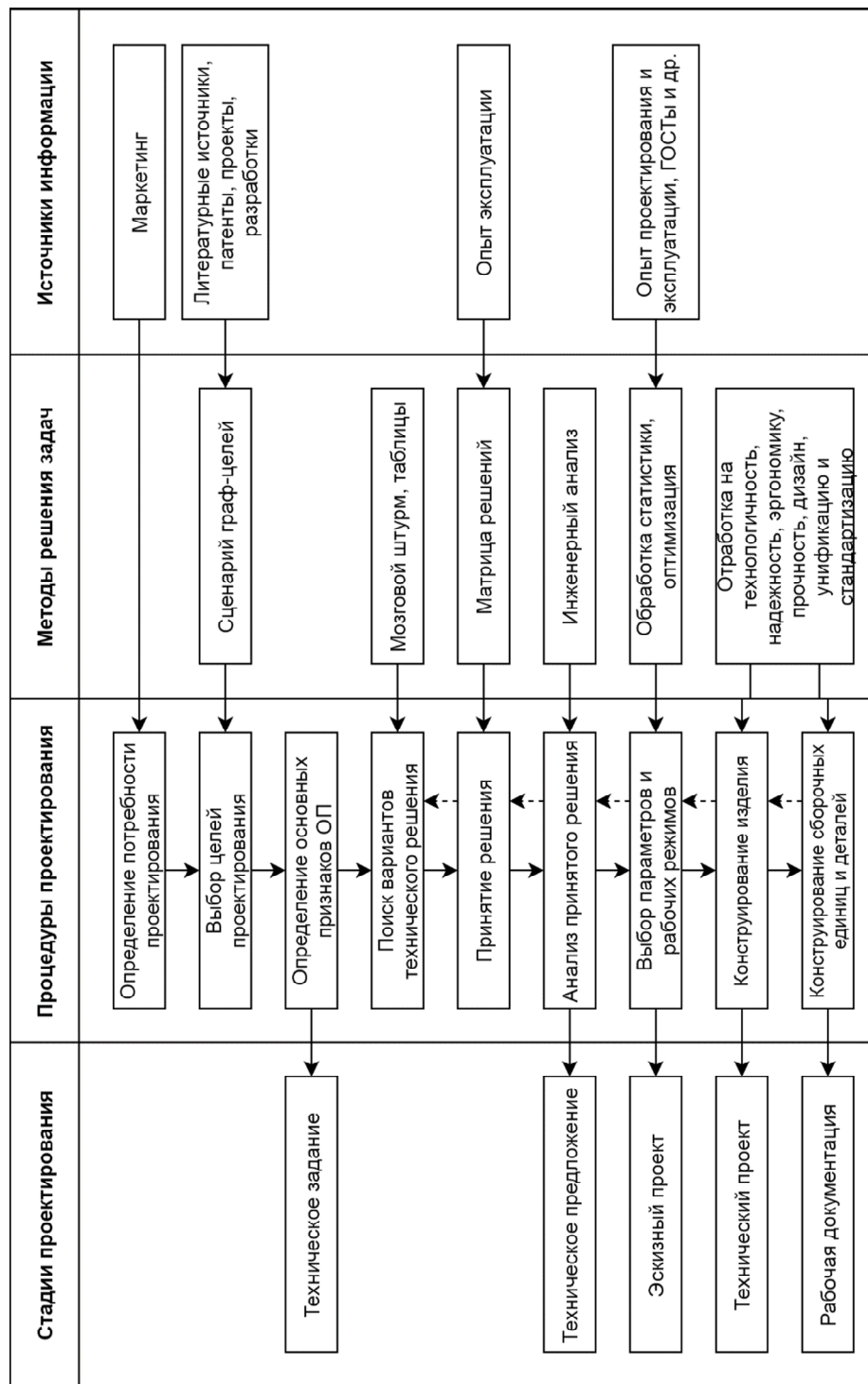


Рисунок 2.3 – Связь методов решения задач и типов источников информации со стадиями и процедурами процесса проектирования

Решение любой задачи начинается с её осмысления и уточнения исходных данных (рисунок 2.4). Технические требования (ТТ), которые выдаются заказчиком, формулируются на языке потребителя-неспециалиста и не всегда бывают технически чёткими и исчерпывающими. Перевести требования на язык предметной области, сформулировать задачу максимально полно и грамотно, обосновать необходимость её решения, то есть сформулировать техническое задание, – первый и обязательный этап работы. Исполнитель выполняет его в тесном контакте с заказчиком.

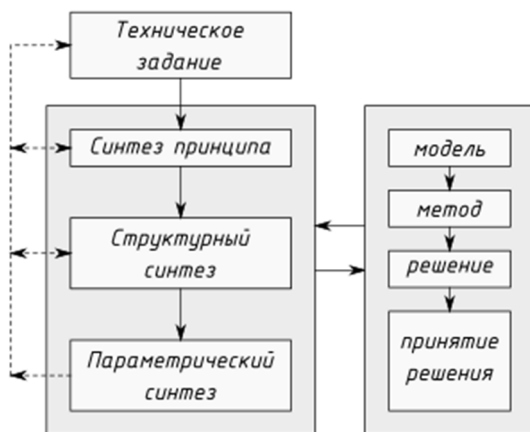


Рисунок 2.4 – Процесс решения задачи проектирования

В системотехнике этот этап иногда называют *внешним проектированием*. Этим подчеркивают, что разработка объекта начинается с постановки задачи (ТТ) и формирования ТЗ и активно ведётся совместно с заказчиком. Важным результатом этапа является согласование целей разработки и назначения проектируемого объекта (его функций), системы показателей качества.

Следующие этапы образуют *внутреннее проектирование*. Они нацелены на поиск решения задачи и выполняются разработчиком. Сюда входят этапы синтеза принципа действия, структуры и параметров проектируемого объекта.

На этапе синтеза принципа действия отыскивают принципиальные положения, физические, социальные и тому подобные эффекты, которые составят основу функционирования будущего изделия. Это могут быть основополагающие нормы, фундаментальные законы и правила, их частные случаи или следствия. Работа ведётся с принципиальными моделями и их графическим представлением – схемами. Этому этапу соответствует заключительная стадия ТЗ и стадия технического предложения структуры проектирования по ГОСТ 2.103.

На этапе структурного синтеза на основе выбранного принципа действия создаются варианты начального графического представления объекта — структуры, схемы, алгоритмы, упрощённые эскизы. В соответствии с ГОСТ 2.103 этот этап включает стадию эскизного проектирования.

На этапе параметрического синтеза отыскиваются значения параметров объекта, находится количественное, в том числе оптимальное, решение проектной задачи, создаётся подробная документация или описание объекта, чертежи изделия и его частей. Этот этап соответствует стадиям технического и рабочего проектирования.

Вследствие неполноты начальных знаний о задаче процесс проектирования *итеративен*, с каждым циклом итерации цели проектирования всё более уточняются, появляется необходимость в дополнительных функциях и, как следствие, – потребность в разработке дополнительных частей и узлов. Решение частных проектных задач, дополняющих основное решение, также проводится в соответствии с представленной последовательностью.

На каждом этапе внутреннего проектирования выполняются следующие процедуры:

- выбор модели (то есть основополагающего принципа, вида структурной схемы и расчетной схемы);
- выбор метода решения, в том числе метода оптимизации;
- решение;
- анализ полученных результатов и принятие решения.

Замечено, что эффективность проектируемого объекта определяется: в первую очередь – выбранным принципом действия, во вторую – предложенной структурой и в третью – соотношением параметров.

После того как потребность в новой ТС выявлена, подтверждена и обоснована, наступает этап формулировки требований к объекту проектирования.

Дальнейшая последовательность действий разработчика технических систем определяется вариантом конкретного решения, которое проектировщик принял в конце этапа обоснования потребности в необходимости проектирования ТС. В зависимости от того, будет ли разработчик проектировать новую ТС, решать задачи частичной или существенной модернизации имеющихся ТС или перепроектировать их с целью уменьшения себестоимости, он оказывается в различных начальных информационных условиях, определяющих объем исходных данных, необходимых для постановки соответствующей задачи.

Таким образом, имеем следующее условие задачи и описание ожидаемого результата её решения.

*Исходные данные для формулировки требований к объекту проектирования:* решение проектировщика, которое подтверждает существование потребности в разработке ЭРЭС на основании:

- 1) необходимости создания новой ТС, выполняющей новую функцию (удовлетворяющую новую потребность) и работающей на ранее неизвестных или не применявшихся физических законах и физико-технических принципах в области электроники, радиоэлектроники и радиотехники;
- 2) необходимости решения задачи частичной или существенной модернизации имеющегося изделия с технической точки зрения;
- 3) необходимости решения задачи перепроектирования ЭРЭС с целью уменьшения его себестоимости;

4) положительности ожидаемого экономического эффекта (окупаемости или масштаба потребности).

*Результаты формулировки требований к объекту проектирования:* максимально полный перечень требований / совокупность общих технических требований, выдвигаемых к объекту проектирования, представленных в форме первого/чернового варианта технического задания (приложение 5).

Для того чтобы понять, какова процедура формулирования требований к объекту проектирования, необходимо знать, что такое требования; инженерия требований; требования, предъявляемые к требованиям; источники требований; приоритетность сформулированных требований; заинтересованные стороны; классификация требований к ТС; как требования соотносятся с характеристиками и свойствами проектируемой ТС; какие существуют нормы оформления требований к объекту проектирования. Эти понятия будут рассмотрены далее.

## **2.2 Элементы инженерии требований**

### **2.2.1 Понятие «инженерия требований»**

Слово «инженерия» в понятии «инженерия требований» ставит акцент на инженерной стороне дела в силу следующих причин [3]:

– работа с требованиями является весьма важным компонентом любой инженерной деятельности. Инженерия требований – это неотъемлемая часть системной инженерии в целом (*hardware engineering and software engineering* – разработка систем и разработка программного обеспечения);

– инженерия требований подразумевает широкий спектр различных действий, относящихся к требованиям, таких как анализ требований (*requirements analysis*) или, например, управление требованиями (*requirements management*) и разработка требований (*requirements development*).

Инженерия требований (*requirements engineering*) – это подраздел системной инженерии, включающий выявление, разработку, прослеживание, анализ, проверку соответствия, установление взаимосвязей и управление требованиями, которые определяют систему на последовательных уровнях абстракции.

Понятие «выявление требований» охватывает другие аналогичные термины, такие как установление требований, извлечение требований и сбор требований.

Прослеживание требований к любому элементу, включая требования на различных уровнях материализации, предоставляет возможность валидации требований на соответствие практическим нуждам формирования логического обоснования проектных решений и их верификации на соответствие требованиям.

К проверке соответствия относятся все типы деятельности по проверке соответствия проектных и конструкторских решений, включая модульное тестирование, испытание компонентов, комплексные испытания, испытания системы в целом и приёмочные испытания.

Валидация требований (validate requirements) означает получение свидетельств, что формально описанные требования соответствуют неформально выраженным потребностям заинтересованных сторон, а верификация требований (verify requirements) означает проверку их внутренней согласованности и целостности в рамках определённых уровней и между различными уровнями абстракции.

Требования – это средства установления информационных взаимосвязей, с помощью которых потребители, поставщики, разработчики, пользователи и руководители могут прийти к общему мнению о том, чего именно они должны достичь.

Под уровнями абстракции имеется в виду принятая последовательность упорядочения требований с использованием набора уровней и прослеживание связей «удовлетворяет/удовлетворяется» между этими уровнями. Требования самого высокого уровня определяют систему в терминах проблем, которые следует решить, причём решение должно удовлетворять заинтересованные стороны и давать возможность валидации решения на соответствие их действительным потребностям. Требования на более низких уровнях определяют систему в целом или части системы в терминах осуществимого решения, которое может быть верифицировано на соответствие требованиям, предъявляемым со стороны более высокого иерархического уровня. Требования, формируемые на каждом последующем иерархическом уровне, предоставляют чётко определённые возможности для проверки решения на соответствие.

## **2.2.2 Роль инженерии требований в проектной деятельности**

Быстро изменяющиеся технологии и ужесточающаяся конкуренция между разработчиками ТС оказывают постоянно растущее негативное воздействие на процесс проектирования данных систем. Эффективная инженерия требований является важной составной частью способности системотехника или проектной организации выдерживать верное направление и не отставать от конкурентов в условиях неуклонного возрастания сложности создаваемых ТС [3].

Конкуренция заставляет сокращать цикл разработки и время на практическое внедрение технологии. Однако сокращения времени вывода продукта на рынок недостаточно. Истинная цель – минимизация времени вывода на рынок «правильной» продукции, действительно необходимой рынку в текущий момент. Установление требований позволяет получить обобщенное наглядное представление о продукции, которая будет пользоваться спросом. Инженерия требований, являясь жизненно важной частью процесса системной инженерии, сосредоточена в первую очередь на определении предметной области и описании проблем, а также на их увязке со всей последующей информацией, касающейся разработки. Только таким способом можно контролировать и направлять проектную деятельность для получения необходимого решения без лишних затрат.

Требования – это основа любого проекта. Требования определяют, что хотят получить от создаваемой ТС заинтересованные стороны – пользователи, заказчики,

поставщики, разработчики, бизнесмены и (или) коммерческие организации – и какими свойствами должна обладать система для удовлетворения их запросов. Поскольку требования должны быть ясны любой заинтересованной стороне, их следует формулировать на естественном языке, но в этом заключена определенная сложность: необходимо составить полное и недвусмысленное описание потребности или задачи, не прибегая к специальной терминологии или условиям. После обсуждения и принятия требования становятся базисом для управления всей проектной деятельностью. Следует учесть, что нужды и потребности заинтересованных сторон бывают многочисленными, различными по природе, а также противоречивыми. Эти нужды и потребности могут быть не вполне чётко определены в начале работы, могут быть ограничены плохо управляемыми факторами или находиться под влиянием интересов, которые в свою очередь подвержены изменениям во времени. Если требования в своей основе не будут относительно стабильны, то разработка будет продвигаться с большим трудом. Отчасти это похоже на решение пуститься в морское путешествие без определенной цели и навигационной карты. Требования представляют собой и «навигационную карту», и средства, позволяющие достичь намеченной цели.

Согласованные и одобренные требования обеспечивают основу для планомерной и успешной деятельности по созданию системы и её дальнейшего эффективного использования. Они имеют принципиальное значение при поиске разумных и обоснованных компромиссов и ещё более важны, когда возникает необходимость изменений, неизбежно происходящих в процессе разработки. Как можно оценить влияние какого-либо изменения без тщательно проработанной модели исходной системы? А в какое состояние возвратится эта система, если изменение необходимо будет отменить?

Как только определена проблема, подлежащая решению, и намечены способы достижения поставленной цели, следует оценить вероятность неудачи в процессе получения неудовлетворительного решения. Немногие спонсоры или заинтересованные стороны готовы поддержать разработку ТС в отсутствие конкретной стратегии управления рисками. Требования позволяют наладить управление рисками с первых моментов процесса разработки. Риски, связанные с отдельными требованиями, могут быть прослежены, влияние этих рисков оценено, а результаты реализации планов смягчения рисков и резервных планов осмыслены задолго до того, как возникает необходимость существенных затрат на опытно-конструкторские работы.

Таким образом, требования формируют основу:

- для планирования проекта;
- управления рисками;
- приёмочных испытаний;
- выбора взаимосогласованного, компромиссного решения;
- контроля изменений.

Причины неудачи проектов чаще всего лежат за пределами технической области. В таблице 2.1 приведены сведения о причинах неудачи ряда проектов. Данные получены по итогам опросов, проведенных международной организацией Standish

Group в 1995–1996 гг. Причины неудачи проектов, обозначенные в таблице 2.1 звездочкой, напрямую связаны с определением требований.

Таблица 2.1 – Причины провала проектов (Standish Group 1995 & 1996; Scientific American, 1994. Sept)

Причина	Процент
Неполнота требований*	13,1
Недостаточное вовлечение пользователей в процесс проектирования*	12,4
Недостаток ресурсов	10,6
Нереалистичные (завышенные) ожидания*	9,9
Недостаточная поддержка со стороны лиц, принимающих решения	9,3
Изменение требований/спецификаций в процессе разработки*	8,7
Недостатки планирования	8,1
Отпала необходимость в разрабатываемом продукте*	7,5

Обозначенные проблемы можно разделить на три основные категории.

*Требования* – слабо структурированы, нечетко, двусмысленно определены, слабо увязаны с потребностями заинтересованных сторон, изменчивы, избыточны, нереалистичны и завышены.

*Проблемы управления ресурсами* – ошибки при определении необходимых финансовых ресурсов и недостаток поддержки или неспособность наладить необходимую дисциплину и качественное планирование. Причиной многих проблем этой категории является слабое управление требованиями [4].

*Политики* – оказывают непосредственное воздействие на обе вышеназванные категории.

Все эти проблемы можно устранить с относительно невысокими затратами.

Факторы, определяющие успех проектов, не являются зеркальным отражением перечня причин, приводящих к неудаче проекта, но из таблицы 2.2 видно, что поддержка управленческой деятельности и надлежащее планирование имеют принципиальное значение, так как по мере укрупнения и увеличения длительности проекта вероятность его неудачного завершения растет.

Таблица 2.2 – Факторы, определяющие успех проектов (Standish Group 1995 & 1996; Scientific American, 1994. Sept)

Причина	Процент
Привлечение пользователей к процессу проектирования*	15,9
Поддержка управленческой деятельности	13,9
Понятное описание требований*	13,0
Надлежащее планирование	9,6
Реалистичные ожидания*	8,2
Достаточная плотность (во времени) точек принятия решений	7,7
Квалификация персонала	7,2
Право собственности (на разрабатываемый продукт)*	5,3

Инженерия требований в её сегодняшнем понимании представляет собой комплексный процесс, включающий как профессиональную инженерную составляющую (синтез, анализ, документирование, верификация требований), так и развитую управленческую составляющую (управление требованиями со стороны разработчика, покупателя, продавца и т.п.).

При создании сложных ТС всегда существует множество путей, которые, как кажется, могут привести к успеху, но выбор правильного пути – очень непростая задача (рисунок 2.5). Началом пути всегда является работа с требованиями как неотъемлемая процедура формулировки условия задачи проектирования ТС. Как известно, правильно сформулированное условие задачи есть половина её решения. Таким образом, без качественной, современной, осознанной, поддержанной необходимыми программно-техническими средствами инженерии требований сегодня невозможно даже подумать об организации конкурентоспособной инженерной деятельности [3, 4].

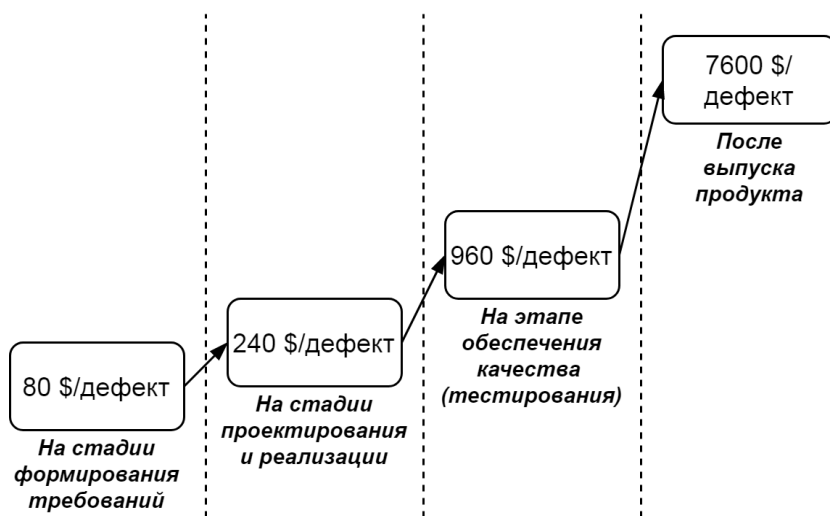


Рисунок 2.5 – Рост стоимости исправления дефектов в процессе разработки

### 2.2.3 Понятие «требование»

*Требование (Requirement)* – недвусмысленное, поддающееся проверке или измерению утверждение, определяющее показатель назначения, функциональную или расчетную характеристику или ограничивающее условие, которое необходимо для признания пригодности продукции или процесса (потребителями или внутренней службой контроля качества) [5].

Кратко охарактеризуем несколько входящих в данное определение формулировок.

**Утверждение.** Тот факт, что требование должно быть утверждением, возможно, вызывает ассоциацию с текстовым документом, но требования могут быть выражены в табличной форме (Planguage, Tom Gilb, 2005), в форме диаграмм (UML;



OMG, 2003). В любом случае главная задача заключается в получении набора прослеживаемых, управляемых элементов, определяемых как требования.

**Объект (продукция) или процесс.** Полноценные решения содержат разнообразные комбинации продукции (ТО, созданных для выполнения предъявляемых требований) и процесса (процедур для использования созданных ТО). Следовательно, требования могут определять как процесс, так и объект (продукцию). Кроме того, могут существовать требования, оговаривающие в качестве особого условия, как именно должна разрабатываться продукция. Обычно такое условие необходимо для обеспечения контроля качества.

**Показатель назначения, функциональная или расчетная характеристика или ограничивающее условие.** Существует множество разнообразных типов требований, порождающих различные типы языков, методы анализа и моделирования, процессы и решения. Следует отметить, что это определение тщательно избегает термина «нефункциональный» (non-functional), поскольку неизбежно возникают дискуссии о действительном смысле данного термина. Среди основных расчетных характеристик выделяют производительность, удобство использования, безопасность, удобство обслуживания и ремонтпригодность.

**Недвусмысленное утверждение.** Описание требования выражает желательные качества, которые в дальнейшем следует описать детально. Если говорить кратко, формулировка требования должна быть ясной, однозначно понимаемой, единой для всех вовлеченных сторон.

**Пригодность для проверки или измерения.** Требования используются для подтверждения приемлемости каждого проектного решения. Чтобы это стало возможным, требования должны быть представлены в количественной форме, обеспечивая возможность «измерения» решения, то есть получения количественной оценки его соответствия требованиям.

**Необходимое для признания пригодности продукции или процесса.** Этот аспект подчеркивает многозначность роли, которую играют требования: они служат для определения того, что должно быть спроектировано и разработано, а также определяют, каким образом полученное решение должно быть проверено и признано годным. Требования оказывают влияние как на ранние этапы процесса разработки, так и на более поздние этапы, например приемосдаточные испытания.

**Потребителями или внутренней службой контроля качества.** Существует множество источников возникновения требований. Среди них потребители, контрольные органы, пользователи, внутренние службы контроля качества. Выявление полного перечня источников требований является важной и сложной задачей этапа формулировки требований к объекту проектирования.

Синонимами термина «требования» можно считать следующие понятия: намерения, замыслы (aims), стремления (aspirations), способности, возможности (capabilities), критерии (criteria), ограничения (constraints), директивы (directives), доктрины (doctrines), обязанности (duties), условия, ожидания, предположения (expectations), особенности (feature), функции (functions), цели (goals), назначение (mission), потребности (needs), обязательства (obligations), целевые установки,

задачи (objectives), инструкции (orders), нормы, предписания (regulations), правила (rules) и т.д.

В системотехнике (системной инженерии) выделяют четыре категории требований, представляемых классической V-моделью:

- 1) требования заинтересованных сторон (функциональные, эксплуатационные, экономические);
- 2) требования к системе в целом (тактические, эксплуатационные, экономические);
- 3) требования к подсистемам (технические, эксплуатационные, экономические);
- 4) требования к компонентам (технические, эксплуатационные, экономические).

### 2.2.4 Понятие «заинтересованная сторона»

*Заинтересованная сторона (stakeholder)* – это физическое лицо, группа лиц, организация или иная структура, имеющая прямые или косвенные интересы (или права) относительно системы (или её свойств).

Заинтересованность сторон в некоторой ТС могут определять:

- необходимость использования системы;
- извлечение выгоды от применения системы (получение доходов, прибылей или какой-либо другой пользы);
- вероятность оказаться в невыгодном положении вследствие использования системы (например, угроза возникновения нежелательных издержек и затрат или потенциальная опасность нанесения ущерба);
- ответственность за работу системы;
- зависимость от работы системы.

### 2.2.5 Требования к требованиям

Согласно ISO/IEC/IEEE 29148 каждое требование заинтересованных сторон, требование к системе в целом или к её элементу должно обладать следующими характеристиками:

– *необходимостью*, т.е. требование должно определять существенную способность, характеристику, ограничение и (или) показатель качества. Если требование будет проигнорировано или устранено, то возникнут недостатки, которые не смогут быть полностью устранены за счет других возможностей системы, продукции или процесса;

– *независимостью от реализации*, т.е. требование, определяя то, что *необходимо и достаточно* в системе, позволяет избежать ненужных ограничений на архитектурные решения. Цель должна достигаться вне зависимости от способа реализации. Требование содержит сведения о том, что требуется, а не о том, как оно может или должно быть выполнено;

– *недвусмысленностью*, т.е. требование должно быть сформулировано таким образом, чтобы оно могло интерпретироваться только одним способом. Формулировка требования должна быть простой и легкой для понимания;

– *непротиворечивость*, т.е. требование не должно противоречить другим требованиям;

– *полнотой*, т.е. формулировка должна быть такой, чтобы требование не нуждалось в дальнейшем уточнении или развитии, поскольку полное требование измеримо и в достаточной степени описывает возможности и характеристики, отвечающие потребностям заинтересованных сторон;

– *единственностью*, т.е. формулировка требования должна относиться только к одному уникальному требованию, которое ни с чем не увязывается;

– *реализуемостью* – требование должно быть технически осуществимым без необходимости использования принципиально новых технологических достижений, т.е. требование с приемлемым риском может быть реализовано с учетом ограничений, накладываемых со стороны системы (стоимость, срок работ, технические возможности, правовые и нормативные ограничения и т.п.);

– *прослеживаемость*, т.е. требование должно быть прослеживаемым снизу вверх к конкретной, документально зафиксированной потребности (потребностям) заинтересованных сторон, к требованию более высокого уровня или к другому источнику (проектному решению, результатам исследования затрат и т.п.). Требование также должно быть прослеживаемым сверху вниз к конкретным требованиям, содержащимся в спецификациях требований более низкого уровня или в других документах, описывающих систему. Таким образом, все относящиеся к требованию связи «порождающий/порождённый» определяются так, чтобы требование прослеживалось и к его источнику, и к реализации;

– *проверяемостью*, т.е. требование должно позволять получать свидетельства, что система удовлетворяет установленному требованию. Проверимость улучшается, если требование измеримо.

Кроме того, согласно тому же стандарту определёнными характеристиками должен обладать и набор (совокупность) требований, а именно:

– *полнотой*, т.е. набор требований не нуждается в дальнейшем развитии, поскольку включает всё, имеющее отношение и необходимое для определения системы или её элемента, подлежащего определению;

– *согласованностью*, т.е. в составе набора должны отсутствовать индивидуальные требования, которые противоречат друг другу, а также дублируют друг друга;

– *приемлемостью*, т.е. решение, удовлетворяющее набору требований, должно быть доступно (достижимо) в пределах ограничений (стоимость, график работ, технические возможности, правовые и нормативные ограничения и т.п.), возникающих на протяжении жизненного цикла ТС;

– *разумной достаточностью*, т.е. набор требований должен иметь отношение только к определённой стороне предполагаемого решения и не включать требования, выходящие за пределы того, что необходимо для удовлетворения потребностей пользователя.

Также следует отметить требование законности, т.е. возможности реализации ТС с учетом требований законодательства, и требование профессиональной этики, когда решения, принимаемые проектировщиком, должны соответствовать нормам корпоративной деятельности и общечеловеческой морали [6].

## 2.2.6 Требования и жизненный цикл технической системы

Одна из наиболее часто допускаемых ошибок состоит в том, что инженерию требований считают обособленным этапом, который осуществляется и завершается на начальной стадии разработки продукции.

Рассмотрим одно из действий, завершающих процесс разработки: приёмочные испытания. Что является критерием приемки системы? Требования заинтересованных сторон. Таким образом, совершенно очевидно, что требования, разработанные на начальных этапах, продолжают использоваться и на завершающих этапах проектирования.

В основе классической V-модели, применяемой для наглядного описания различных стадий и этапов создания ТС, лежит представление о взаимосвязи между проверкой соответствия и требованиями. На рисунке 2.6 эта взаимосвязь показана в привязке (в виде стрелочек) к каждому этапу разработки. Над стрелочками приведено описание общих процедур для каждого из уровней разработки.

Кроме того, V-модель позволяет получить представление об уровнях разработки, каждый из которых в точности соответствует определённому этапу разработки.

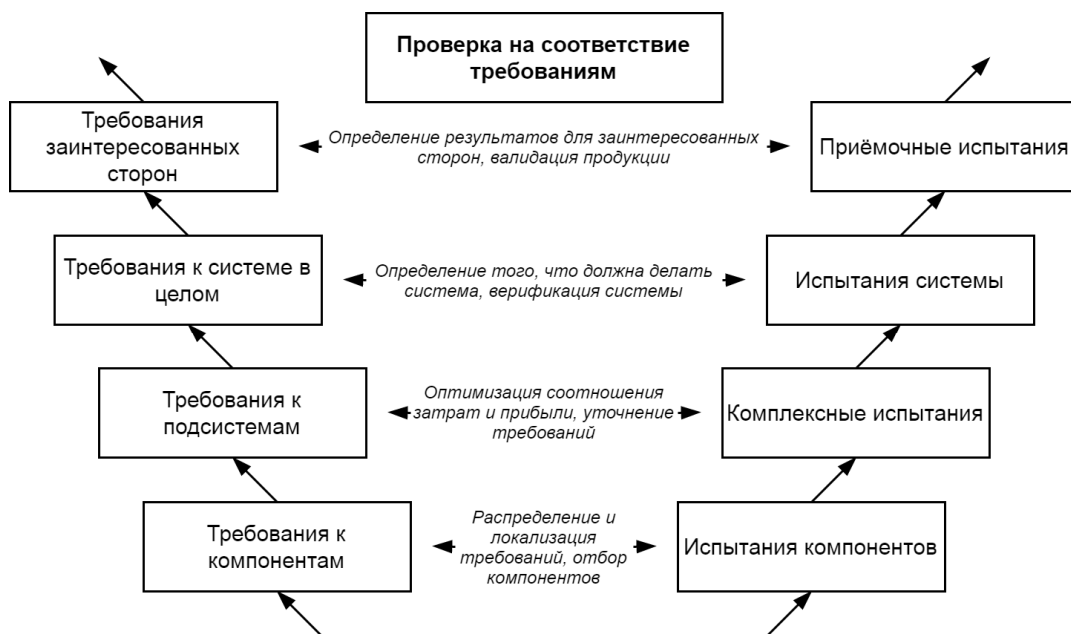


Рисунок 2.6 – Требования V-модели и уровни инженерии требований

Правильно составленный список требований заинтересованных сторон позволяет сформулировать краткое описание того, что нужно разработать, не на строгом языке инженера, а в виде, удобном для руководителей проекта. Аналогичным образом требования к системе в целом дают возможность сформировать исчерпывающее краткое описание технических результатов опытно-конструкторской работы.

## 2.2.7 Требования в области проблем и в области решений

И с управленческой, и с инженерной точки зрения необходимо четко различать область проблем (problem domain) и область решений (solution domain) [3]. Этапы разработки, которые ассоциируются с самыми абстрактными верхними уровнями описания системы – описанием потребностей, моделированием практического использования и требованиями заинтересованных сторон, должны быть неизменно увязаны с областью проблем, тогда как более низкие уровни, начиная с требований к системе в целом, относятся к области решений.

В таблице 2.3 показана воображаемая граница между областью проблем и областью решений, а также роли, которые играют в этих областях требования наивысших уровней.

Таблица 2.3 – Область проблем и область решений

Уровень требований	Область	Точка зрения	Роль
Требования заинтересованных сторон	Проблем	Заинтересованной стороны	Описание того, чего хотят достичь заинтересованные стороны в результате использования данной системы. Следует избегать использования какого-либо конкретного или известного способа решения
Требования к системе (тактические требования, требования назначения)	Решений	Аналитика	Абстрактное описание того, что именно должна делать система, чтобы требования заинтересованных сторон были удовлетворены. Следует избегать использования какого-либо конкретного или известного проектного решения
Проект архитектуры (функциональные требования)	Решений	Проектировщика	Описание того, как конкретное проектное решение будет отвечать требованиям к системе в целом

Здесь вступает в действие важный принцип абстракции. Начальное описание потенциальных возможностей должно содержать только тот минимум информации, который необходим для определения проблемы, исключая при этом любое упоминание какого-либо решения. Таким образом, системные инженеры получают полную свободу выбора наилучшего решения без всякого влияния заранее высказанных

предвзятых мнений. Моделирование помогает получить требования очередного уровня и рассматривать возможные решения даже на высоком уровне. Чтобы избежать выбора неподходящего решения, моделирование на начальном этапе должно сосредоточиться на ближайшей объемлющей системе, а не на системе, о которой идет речь в текущий момент.

---

*Например, если система радиосвязи разрабатывается для военно-морского судна, то на начальных этапах моделирование должно быть сосредоточено в большей степени на данном типе судна, чем на радиосистеме. Такой подход позволяет описать проблему, которую следует решить, в контексте объемлющего решения. Элементы решения, полученные при функциональном моделировании, остаются на верхнем уровне, а все подробности должны определяться на последующих этапах.*

---

Без четкого понимания различий между задачей и решением могут возникнуть следующие проблемы:

- недостаточное понимание действительной проблемы;
- невозможность определения границ системы и отсутствие понимания, какими функциональными возможностями должна обладать система;
- постоянные споры о системе между разработчиками и поставщиками, вызванные тем, что система описана в терминах готовых решений;
- невозможность найти оптимальное решение из-за отсутствия свободы в проектировании.

Сначала потребность может быть выражена не вполне четко, например следующим образом: «Мне нужна система, которая значительно уменьшит количество дорожно-транспортных происшествий, возникающих при обгоне габаритных грузовых фур легковыми автомобилями». Очевидно, что такая «спецификация» абсолютно не подходит в качестве основы для принятия решения о приобретении или заказе той или иной системы. Но подобная формулировка могла бы послужить в качестве основы при точном определении, что именно требуется заинтересованному лицу. Изучение ситуации позволит найти слабые моменты в процедуре обгона фур легковыми автомобилями и предположить, как возможности, предоставляемые создаваемой системой, следует использовать для уменьшения риска обгона. Действия, преобразующие нечеткое описание потребностей в набор требований, который можно использовать как основу для принятия решения о покупке (заказе) системы, образуют процесс разработки требований заинтересованных сторон. К заинтересованным сторонам относятся лица, которые будут напрямую взаимодействовать с создаваемой системой, и другие лица и организации, так или иначе заинтересованные в её существовании.

На рисунке 2.7 показаны область проблем и область решений в контексте процесса разработки ТС.

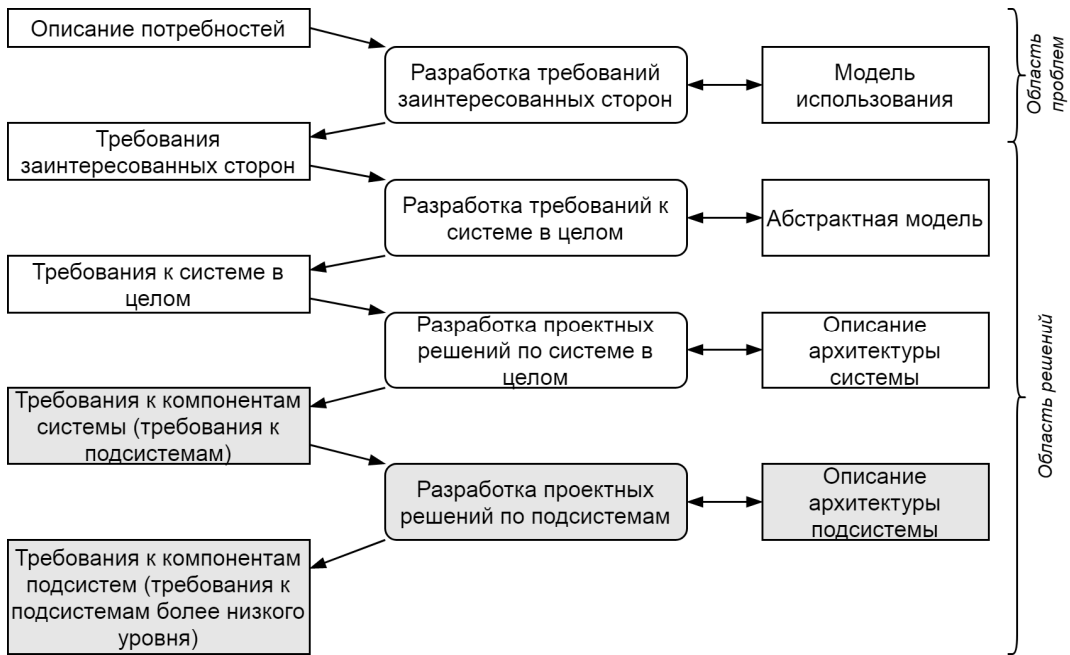


Рисунок 2.7 – Процесс разработки системы

После формирования итогового набора требований заинтересованных сторон, которые определяют, что именно они хотят получить от создаваемой системы, можно начинать поиск потенциально возможных решений. Не следует сразу же приступать к проектированию, лучше сначала определить, какие характеристики системы непременно должны оставаться независимыми от окончательного проектного решения. Этот процесс называется формированием требований к системе в целом. На данном этапе рекомендуется создать абстрактную модель целевой системы. Эта модель становится основным предметом обсуждения внутри команды разработчиков, следовательно, помогает сформировать общее понимание предлагаемого решения, пусть даже на абстрактном уровне. Модель также можно использовать для объяснения сути решения тем заинтересованным сторонам, которые хотят быть уверенными в том, что разработчики двигаются в верном направлении. Наконец, абстрактная модель задает структуру для представления требований к системе в целом в документальной форме. Каждый элемент модели можно сопоставить с отдельным разделом документа. Такой подход позволяет определить каждое требование в соответствующем контексте и становится незаменимым инструментом для оценки окончательного набора требований с точки зрения целостности, согласованности и полноты.

От требований к системе в целом можно переходить к рассмотрению возможных вариантов построения архитектуры системы. Архитектура системы описывается в виде набора взаимодействующих элементов, которые в совокупности обладают необходимыми свойствами. Подобные свойства известны в теории систем как

эмерджентные свойства системы и должны в точности соответствовать ее желательным характеристикам, выраженным посредством требований к системе в целом. Описание архитектуры системы определяет, что должен делать каждый ее элемент и как элементы взаимодействуют друг с другом для получения общих результатов, определённых требованиями к системе в целом. Другими словами, архитектура системы определяет требования к каждому ее элементу (см. рисунок 2.7) в терминах функциональных возможностей элемента и порядка взаимодействия между ними. Кроме того, архитектура системы и, следовательно, требования к элементам системы непременно должны обуславливать любые другие необходимые свойства, такие как физический размер, производительность, надежность, удобство сопровождения и обслуживания и т.д.

Для всех систем, кроме самых простых, элементы их архитектуры оказываются слишком сложны, чтобы быть пригодными к непосредственной реализации. На этом уровне детализации элементы часто называют подсистемами, поскольку они являются достаточно сложными, но при этом продолжают считаться составными частями системы более высокого уровня, для которой они проектируются.

Процесс определения архитектуры каждой подсистемы и последующее его использование для выявления требований к элементам схож с процессом, который был описан для системы в целом. В конечном итоге архитектура подсистемы и требования к ее элементам будут определены для каждой подсистемы, как показано на рисунке 2.7.

Приведённое описание процесса разработки показывает, что он происходит на нескольких уровнях и на каждом уровне выполняются различные действия. Каждое действие поддерживается определённой моделью (например, моделью использования, абстрактной моделью, моделью архитектуры системы), хотя природа этих моделей различна. Это пример обобщённого подхода: на каждом уровне разработки используется модель.

Таким образом, требования существуют на каждом из иерархических уровней: перечень потребностей, требования заинтересованных сторон, требования к системе в целом, требования к подсистемам, требования к элементам подсистем.

Следовательно, инженерия требований – это не процесс, о котором можно забыть, после того как он был однажды реализован. Процесс инженерии требований используется на каждом иерархическом уровне, более того, работа зачастую проводится одновременно на нескольких уровнях. На всех уровнях, начиная от элементов системы и ниже, одновременно выполняется множество работ с требованиями каждого уровня.



## 2.2.8 Исходные требования и производные требования

Часто бывает удобно представлять процесс разработки системы как иерархию уровней инженерии требований, когда все процессы обособлены. В центре внимания находится тот факт, что требования, порожденные одним процессом, становятся исходными требованиями для другого процесса. Требования, которые поступают на вход процесса разработки требований, называются исходными, а которые формируются на выходе этого процесса, называются производными (рисунок 2.8).

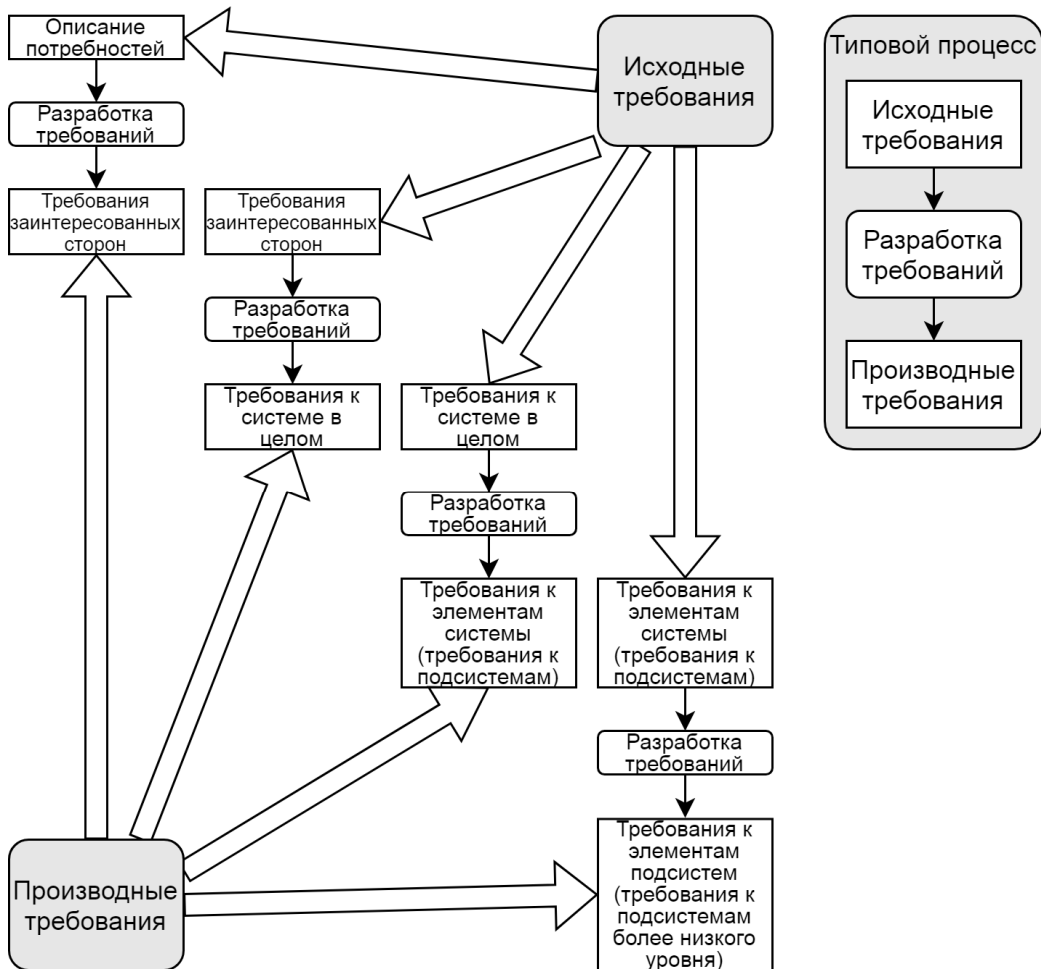


Рисунок 2.8 – Определение исходных и производных требований в типовом процессе разработки системы

## 2.3 Источники требований к объекту проектирования и формулировка требований

### 2.3.1 Формулировка требований с позиции эволюции потребностей и законов развития технических систем

Законы развития техники, а также более частные и локальные закономерности могут иметь многоплановое приложение в инженерном творчестве. Во-первых, на основе законов и закономерностей техники могут быть разработаны наиболее эффективные методологии и методы проектирования. Во-вторых, привязка законов и закономерностей к конкретному классу ТО позволяет определить наиболее рациональные структурные свойства, облик и характеристики ТО в следующих поколениях.

Как говорилось в первом разделе, строение и развитие каждого ТО и техники в целом подчиняются определенным законам и закономерностям, которые указывают на устойчивые качественные и количественные причинно-следственные связи и отношения, имеющие место у класса ТО и техники в целом, а также на изменение во времени этих связей и отношений. Законы и закономерности по характеру и определенности описания объектов и явлений техники должны быть близки к законам и закономерностям, известным в биологии, физике и химии, т.е. законы техники должны формулироваться на уровне законов природы.

Закономерности строения и развития техники имеют отношение к ТО с одинаковыми или близкими функциями. Законы техники имеют отношение к любому ТО или ко многим классам ТО с различными (сильно отличающимися) функциями.

*К законам и закономерностям строения* ТО относятся устойчивые признаки в конструктивной и потоковой функциональной структуре, в физической структуре (ФПД) и технических решениях, которые существуют и остаются неизменными на протяжении многих поколений в историческом развитии ТО.

К законам и закономерностям развития техники будем относить определённые устойчивые изменения какого-либо критерия развития (показателя качества) или какого-либо количественно выражаемого конструктивного признака на протяжении многих поколений ТО [1].

Кроме того, должны иметь место законы развития, которые для многих классов ТО с различными функциями отражают одинаковые (аналогичные) изменения в конструктивной и потоковой функциональной структуре, в физической структуре и техническом решении.

Технические характеристики проектируемого изделия должны в общей своей массе, как минимум, быть лучше, чем у прототипа. Требования должны быть измеримы. Недостаточно сказать, что устройство должно хорошо функционировать.

## 2.3.2 Формулировка требований с позиций участников стадий жизненного цикла технических систем

**Идентификация заинтересованных сторон.** Как отмечалось ранее, заинтересованной стороной может быть любое лицо или организация, которые имеют какое-либо отношение к предполагаемой системе, или несут ответственность за нее, или могут находиться под влиянием или воздействием создаваемой системы [3]. Типы заинтересованных сторон меняются в зависимости от природы системы, в частности от того, является ли система потребительской продукцией или государственной службой, такой как служба управления полетами или железная дорога. Однако можно выделить несколько типовых категорий заинтересованных сторон согласно участникам стадий жизненного цикла ТС (см. рисунок 1.6): исследователи, системотехники, проектировщики, конструкторы, технологи, работники службы логистики (сбыта и доставки), пользователи и эксплуатанты системы, специалисты по ее утилизации.

В группу людей, имеющих какое-либо отношение к создаваемой системе, включаются и те, кто будет непосредственно пользоваться этой системой. Следует отметить, что в нее может быть включено большое количество людей, например экипаж и пассажиры самолетов и поездов или лица, которым может быть причинён моральный или материальный ущерб в результате аварии, хотя они не являлись пассажирами. Лица, несущие ответственность за систему, могут быть руководителями, отвечающими за эксплуатацию системы или за безопасность.

Рассмотрим возможные категории заинтересованных сторон в качестве основы для определения их полного списка.

*Руководители (управляющие)* – люди, которые несут ответственность за расходование средств на разработку или эксплуатацию создаваемой системы. Кроме того, могут быть полезны лица, определяющие стратегию, высказывающие собственную точку зрения по поводу соответствия предлагаемой разработки целям и философии компании или организации.

*Инвесторы (вкладчики)* – лица, которые уже сделали вклад или приглашены сделать вклад в создание системы, или организации, отвечающие за разработку или эксплуатацию системы.

*Пользователи системы* – это наиболее важная группа заинтересованных сторон. Пользователей в первую очередь интересуют возможности, предоставляемые новой системой или сервисом. Следует отметить, что могут также существовать пользователи, которые не взаимодействуют непосредственно с системой. Например, пользователями телескопа Хаббл являются астрономы и астрофизики. Они заказывают фотосъемку в заданных направлениях и получают информацию по мере её готовности, но не управляют телескопом напрямую. Кроме того, пользователи любой существующей системы – источники важной информации о проблемах, связанных с этой системой. Их точка зрения на возможные улучшения системы может оказаться весьма полезной [7].

*Обслуживающий персонал.* Несмотря на то что основная обязанность обслуживающего персонала заключается в поддержании системы в работоспособном состоянии после её развертывания, у этих лиц есть важные требования, которым должна соответствовать система, чтобы работу по обслуживанию можно было выполнять.

*Лица, отвечающие за утилизацию продукции.* Роль этой категории заинтересованных сторон заметно возрастает по мере совершенствования законодательства по охране окружающей среды. С точки зрения процесса утилизации выработавших свой ресурс технических систем существуют две основные задачи: уменьшение негативного влияния на экологию материалов, из которых построена ТС, и увеличение эффективности повторного использования драгоценных и редкоземельных металлов. Требования из этого источника могут оказывать существенное влияние на проектные решения, особенно при выборе используемых материалов.

Требования утилизации должны предусматривать, где и как будут собраны, а затем переработаны, захоронены или уничтожены части или всё изделие при целенаправленных, а также при неорганизованных, но удобных для потребителя действиях. Наиболее целесообразно выведение изделия из эксплуатации с использованием его в качестве вторичных ресурсов, т.е. чтобы жизненный цикл был замкнутым. В ином случае изделие должно самоуничтожаться естественным образом, не нарушая экологию [7].

*Инструкторский персонал.* Наряду с обслуживающим персоналом инструкторы заинтересованы в простоте и удобстве эксплуатации системы. Если ТС отличается простотой и удобством использования, то и обучать работе с ней будет легче. Кроме того, инструкторский персонал может потребовать, чтобы система давала возможность одновременной работы как с реальными, так и с учебными данными, причем в безопасном режиме.

*Покупатели системы.* Покупатели общедоступных услуг и крупных систем могут не быть непосредственно вовлечены в их разработку или функционирование. Их роль важна при рассмотрении системы с точки зрения соотношения затрат и планируемой прибыли (или какой-либо другой выгоды). При разработке продукции покупателем может являться её пользователь, например пользователь мобильного телефона, водитель автомобиля и т.д.

*Специалисты по продаже и маркетингу.* Роль этих лиц весьма важна для четкого определения возможностей новых систем, особенно для разработки конкретной продукции, поскольку при массовом производстве потребительской продукции невозможно узнать мнение всех потенциальных пользователей.

*Эксперты по удобству (эргономике) и эффективности (технической психологии) применения* – у этих лиц своя точка зрения на то, каким образом система может быть оптимизирована с целью повышения эффективности её использования. Среди факторов, которые принимаются во внимание, – эргономика, простота обучения и способность надёжно работать в сложных условиях там, где это необходимо (например, система управления воздушным движением).

*Эксперты по окружающей среде.* Как правило, новая ТС создаётся не для работы в полной изоляции, она будет взаимодействовать с существующими системами.

Кроме этого, возможно, потребуется учёт других внешних факторов. Например, если система не должна загрязнять окружающую среду, то предусматривается утилизация отходов, и наоборот, некоторые ТС должны быть устойчивыми к воздействиям со стороны окружающей среды (к сложным погодным условиям, космической радиации и т.п.).

*Органы государственного и местного управления.* Правила, нормы и законы оказывают прямое влияние при определении того, что система может делать и чего она не должна делать.

*Пакеты стандартов:* существующие и принимаемые стандарты могут влиять на цели, для достижения которых создается система. Стандарты могут быть международными, как, например, стандарты мобильной связи GSM, национальными или внутренними стандартами компании или организации.

*Общественное мнение и лица, его формирующие.* Общественное мнение неодинаково в различных регионах мира. Если продукция выводится на рынок во многих странах, необходимо точно определить все особенности общественного мнения каждой из них.

*Полномочные органы власти* – эти организации могут потребовать предоставления определённых свидетельств и подтверждающих документов в процессе сертификации или аттестации. В качестве примера можно привести Федеральную службу по надзору в сфере природопользования (Росприроднадзор) в РФ или Управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов (FDA) в США.

Составив список предполагаемых типов заинтересованных сторон, необходимо определить, какие из них следует принимать во внимание, а также каким образом наладить взаимодействие с каждым из этих типов.

В некоторых случаях возможно прямое взаимодействие, например с пользователями системы. Для таких типов, как население региона или страны, подобное взаимодействие невозможно. Следует решить, какие из всех доступных напрямую типов будут классифицированы как заинтересованные стороны, кроме того, должен быть определен кто-то в роли недоступных заинтересованных сторон и выступать от их лица.

**Источники требований заинтересованных сторон.** В качестве источников требований заинтересованных сторон могут выступать:

- опросы заинтересованных сторон;
- подробное изучение сценария (в общем случае во время опросов заинтересованных сторон);
- описательная документация (возможно, как результат изучения проблемы или маркетинговых исследований);
- существующие системы, требующие обновления;
- проблемы существующих систем и предлагаемые изменения;

- аналогичные системы;
- прототипы частично реализованных систем, макеты или даже простые черновые эскизы продукции или требований к ней;
- возможности, предоставляемые новыми технологиями (одобренные заинтересованными сторонами);
- исследования;
- анкетирование;
- антропоморфические исследования или анализ видеоматериалов.

**Сценарии использования системы.** Большинство диалогов выстраивается на основе набора исходных положений, с которыми согласны участвующие стороны. Эти исходные положения можно интерпретировать как модель взаимопонимания. Попытка обсуждения требований при отсутствии согласованных основных принципов и критериев завершается неудачей.

Одним из базовых механизмов структурирования при обсуждении требований к возможностям системы является сценарий ее функционирования или использования. Сценарий порождает структуру, которая иерархически упорядочена во времени. При определении требований заинтересованных сторон идею сценария полезно использовать в качестве инструмента для формирования общих принципов, в рамках которых может иметь место содержательный диалог.

Сценарий побуждает заинтересованные стороны мыслить в терминах выполняемой ими работы и желаемых способов её выполнения. В действительности они перечисляют способы, которыми хотели бы выполнять свою работу. После согласования сценария можно приступить к формированию отдельных требований для точного определения возможных действий заинтересованных сторон в каждом пункте сценария.

Сценарии предоставляют превосходную возможность для изучения требований совместно с заинтересованными сторонами. В сущности, сценарии определяют то, чего хотят достичь заинтересованные стороны. Сценарий – это последовательность результатов (или достигнутых состояний), полученных заинтересованными сторонами в течение некоторого интервала времени. Как показано на рисунке 2.9, сценарий использования системы может быть представлен в виде иерархии целей, демонстрирующей возможности, предоставляемые системой заинтересованным сторонам, без упоминания о способах достижения этих целей. Другими словами, сценарий использования системы представляет собой иерархию ее возможностей.

Хронология действий позволяет многократно имитировать возможности, предоставляемые будущей системой, и заинтересованные стороны могут пошагово продвигаться по иерархии, обнаруживая пропущенные и дублирующиеся полностью или частично элементы. Таким образом, подобная структура позволяет устранить предрасположенность к каким-либо конкретным решениям при описании проблемы на данном этапе.

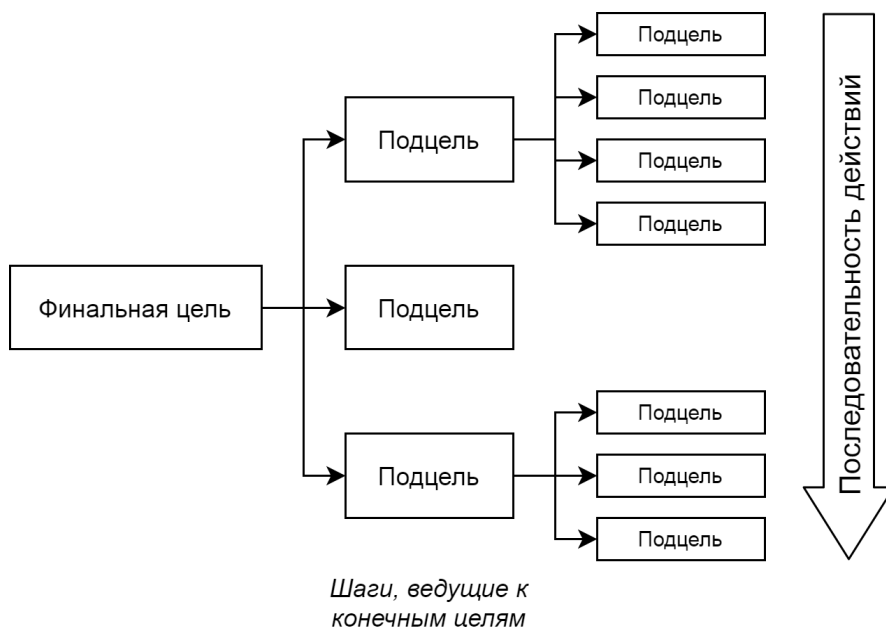


Рисунок 2.9 – Сценарии использования системы как иерархия целей

Существует хорошо определённая методика создания сценариев использования. Главный вопрос, задаваемый заинтересованным сторонам: «Чего вы хотите достичь?» или «В какое состояние вам нужно перейти?». То есть всё начинается с конечного состояния, которое постепенно раскрывается посредством выяснения состояний или промежуточных шагов (действий), необходимых по ходу дела. Затем все выделенные состояния организуются в форме дерева или иерархии и исследуются. В конечном итоге выполняется следующая последовательность процедур:

- сформулировать конечную цель;
- определить необходимые возможности для ее достижения;
- разделить крупные шаги (действия) на более мелкие;
- сохранять иерархическую структуру;
- выполнять неформальную проверку на каждой стадии;
- избегать конкретно определенных решений.

Если заинтересованным сторонам трудно определить промежуточные стадии, то можно попросить их описать типичную ситуацию, поскольку важно знать, какие действия предприняли бы заинтересованные стороны в такой ситуации. Если система совершенно новая, то заинтересованные стороны должны подключить своё воображение и определить желаемое событие или состояние как результат каждого шага. В этот момент важно точно решить, являются какие-либо стадии опциональными или допускаются повторения каких-либо стадий; должны ли различные исходные условия приводить к разным последовательностям.

Кроме того, заинтересованные стороны должны определить порядок предоставления возможностей, постоянство или вариативность этих возможностей, если возможность вариативна, то при каких условиях она изменяется. Например, чтобы

написать картину, прежде всего необходимы бумага (холст и т.п.), краски и кисти, но не имеет значения, в каком порядке они будут подготовлены.

Это даёт возможность изменять последовательность или выполнять некоторые действия параллельно.

Вне зависимости от того, в каком виде выделяются требования, важно услышать и усвоить всё, что говорят заинтересованные стороны. В дальнейшем всегда будет существовать возможность доработки их высказываний. Часто возникает необходимость попросить заинтересованные стороны уточнить или более подробно рассказать о том, что они имеют в виду.

Сценарии описывают возможности, предоставляемые будущей системой (в терминах области проблем), в виде иерархической структуры без упоминания о способе предоставления. Можно выделить следующие преимущества сценариев:

- пошаговое прохождение сценария использования;
- обнаружение пропущенных шагов;
- существования для разных заинтересованных сторон различных сценариев;
- возможность описания хронологии событий.

**Характеристики сценариев использования системы.** На рисунке 2.10 показан пример сценария, описывающего использование беспилотного летательного аппарата (БПЛА) среднего класса, который можно перевозить на автомобиле к месту взлета и посадки. Сценарий охватывает все подробности: погрузку БПЛА на автомобиль, подготовку, полет и возвращение домой.

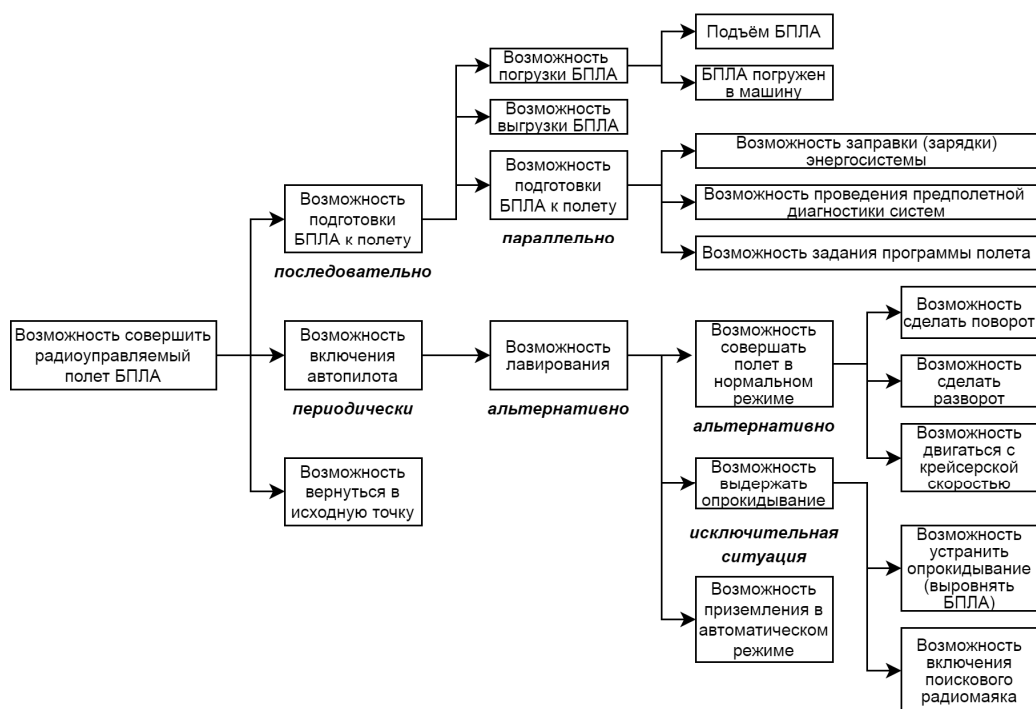


Рисунок 2.10 – Пример сценария использования беспилотного летательного аппарата



Кроме того, сценарий демонстрирует некоторые другие аспекты:

- хронологию событий в целом;
- узловые точки, в которых предоставляются ключевые возможности;
- возможные альтернативные варианты;
- периодически повторяющееся поведение;
- последовательности, которые не имеют существенного значения (параллельные ветви);
- исключительные ситуации.

Важное значение имеет хронологический порядок выполнения сценария. Это не только создаёт удобную основу для понимания заинтересованными сторонами, но и помогает поместить их требования в контекст процесса.

Важно, чтобы все узловые точки были обозначены как возможности на соответствующем уровне. Использование фразы «возможность...» помогает не думать о возможностях как о функциях (следовательно, избежать углубления в подробности реализации).

Сценарии дают изучать исключительные ситуации. Во многих системах функциональная часть обработки исключительных ситуаций более сложна, чем требуется для представления основных возможностей заинтересованным сторонам. Заинтересованным сторонам можно задать следующие вопросы об исключительных ситуациях: «Что может пойти не так, как нужно в этом состоянии или что может пойти не так, как нужно при достижении этого состояния?». Восстановительные действия могут быть исследованы и описаны при ответах на вопросы о том, что следует предпринять (или что должно происходить), если всё пошло по неверному пути.

Цель создания сценария – обеспечение взаимопонимания и обмена информацией. Сам по себе сценарий не является требованием, скорее, это структура для получения требований. Сценарий помогает собрать полный комплект требований, охватывая каждый аспект использования в процессе эксплуатации. Ни одна методика моделирования не претендует на отражение всех возможных концепций и идей. В моделировании любого действия нет единственно правильного пути. Разные люди разрабатывают и используют различные модели.

### **2.3.3 Формулировка требований с позиции уровней иерархии описания технической системы**

Здесь речь идёт о *необходимом и достаточном* наборе требований, при выполнении которых изделие будет иметь допустимую (ожидаемую) работоспособность, эффективность, ремонтпригодность и т.п. Если в таком наборе не будет учтено и выполнено хотя бы одно требование, то в созданном ТО проявится хотя бы один существенный недостаток или данный ТО будет неработоспособен. Отсюда следует важность необходимого и достаточного списка требований, который в инженерных разработках составляет ядро технического задания [8].

Как отмечено выше, в процессе проектирования ТО задают и уточняют несколько иерархически взаимосвязанных списков требований, которые соответствуют определённым этапам разработки. При этом каждый последующий список больше предыдущего и включает его в себя.

На этапе разработки технических требований к объекту проектирования удобно ориентироваться на иерархию описаний ТО, каждому уровню которой соответствует свой список требований (СТ) (рисунок 2.11). Дадим краткую характеристику содержания списков требований для каждого типа задач (этапа разработки).

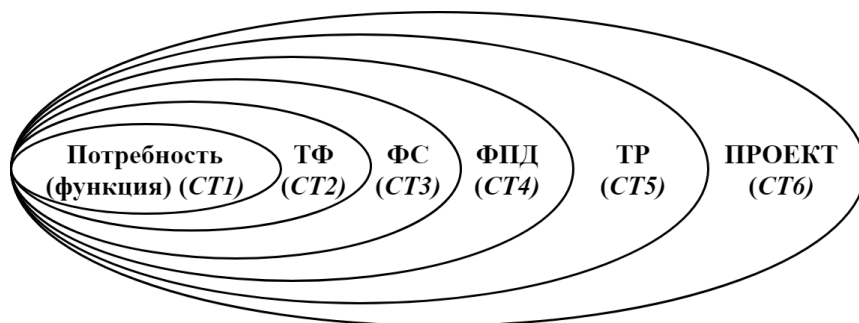


Рисунок 2.11 – Списки требований к уровням описания технической системы

Список требований 1 (СТ 1) включает функциональные требования, т.е. перечень количественных показателей производимого действия, количественных показателей объекта, на который направлено действие ТО, количественных показателей особых условий и ограничений, при которых выполняется действие. К ним в первую очередь относятся вид и показатели используемого преобразования объектов и процессов, особые воздействия окружающей среды и т.п.

СТ 2 может включать дополнительно перечень потоков веществ, энергии, сигналов на входе и выходе ТО или перечень требований и условий к выбору таких потоков; значения физических величин, характеризующих потоки; условия и ограничения на потоки, вызванные взаимодействием ТО с надсистемой и окружающей средой; условия и ограничения на потоки, связанные с их преобразованием внутри ТО. Уточнённый список требований в основном зависит от выбранных потоков на входе ТО.

СТ 3 дополнительно включает наборы требований, аналогичные СТ 1 и СТ 2, но относящиеся к функциональным элементам, из которых состоит ТО. Уточнённый СТ 3 зависит от принятой функциональной структуры.

СТ 4 в дополнение к СТ 1 – СТ 3 составляют для каждого выбранного физического принципа действия отдельно. В СТ 4 входят условия и ограничения, накладываемые на выбор основных материалов, используемых при реализации физико-технических эффектов, а также условия и ограничения, вызванные сопутствующими (дополнительными) воздействиями реализуемых эффектов как на элементы ТО, так и на окружающую среду. Кроме того, СТ 4 может ещё включать ограничения по энергопотреблению, типам преобразований процессов или информации и т.д.

СТ 5 дополнительно содержит наборы требований и соответствующих количественных показателей по массе, форме, габаритным размерам и компоновке; выбору используемых элементов, материалов и комплектующих изделий; способам и средствам соединения и связи элементов между собой; управлению и регулированию; безопасности эксплуатации; патентоспособности; лимитной цене и т.д. СТ 5 в большой мере зависит от технического решения.

СТ 6 включает набор требований по выбору оптимальных параметров ТО, запасам прочности, устойчивости, надежности, серийности, технологическому оборудованию, взаимозаменяемости, стандартизации и унификации, условиям эксплуатации, транспортирования и хранения, сроку окупаемости на разработку и освоение и т.д.

Попытку составления общетехнического списка требований в 1950 г. предпринимал Ф. Кессельринг, который составил список, включающий более 700 требований [8]. Даже для того времени это был неполный список, а за прошедшее время число требований в полном списке увеличилось как минимум на порядок. Составление полного списка требований для техники в целом является важной задачей. Однако прежде чем приступить к такой работе, необходимо создать:

- грамматику и синтаксис описания требований для выделения их основных типов по форме описания;
- систематику и классификацию требований по их содержанию.

От решения этих задач в большой мере зависит создание эффективного искусственного интеллекта для автоматизации начальных стадий проектирования.

## **2.4 Классификация требований и их характеристика**

### **2.4.1 Свойства технических систем**

Требования к объекту проектирования – это описание желаемых свойств будущей ТС. Очевидно, что полнота знания свойств ТС системотехником и умение их формулировать являются главными условиями успеха его проектной деятельности на этапе разработки требований к объекту. Поэтому важно четко разбираться во всем многообразии свойств ТС.

При обсуждении ТС часто приходится задавать вопросы, начинающиеся со слов типа «каков» («какой»), например: «Каков смартфон? Каково разрешение его дисплея? Каков объем встроенной памяти? Какова его надежность? Какой он внешне? Какого он цвета?» [9].

Ответ на некоторые из этих вопросов гласит: смартфон имеет разрешение дисплея 1600×900, объем встроенной памяти 256 Гбайт. Все, кто привык к количественным оценкам, согласятся с этим. Однако тот же ответ мог бы прозвучать и так: у смартфона маленькое разрешение экрана; у него большой объем памяти. Такая характеристика уже неоднозначна, она относительна, поскольку неизвестно, какое разрешение экрана понимается под словом «маленькое»: то ли 800×600, то ли

2532×1170. Чтобы избежать неопределённости, мы можем вопрос уточнить: «Сколько пикселей имеет экран смартфона?». Вопрос, начинающийся со слова «сколько», очень важен, так как, зная ответ, мы можем дать количественную оценку рассматриваемому свойству, т.е. определить его величину.

Труднее ответить на вопрос, какова надёжность этого смартфона? Ответ может быть следующим: он надёжен или ненадёжен. Это, естественно, относительная характеристика, зависящая от того, какими соображениями руководствуется оценивающий. Человек, у которого смартфон в течение 6 месяцев отказал всего раз, будет считать его более надёжным, чем смартфон, который он прежде отдавал в ремонт каждую неделю. Ясно, что можно сформулировать определение надёжности и тем самым получить количественную оценку этого свойства, т.е. ответить на вопрос «сколько?».

Ещё труднее ответить на вопрос, каков смартфон внешне? В ответ мы услышим, что он красивый, некрасивый, элегантный и т.п. Это очень неопределённая оценка. Надо признать, что не так-то просто определить количественно этот параметр, изменяющийся во времени и обычно определяемый субъективно. Можно такую оценку сделать более определённой, если сравнивать с другим смартфоном. При этом оценка внешнего облика другого смартфона будет иметь значение объективного критерия.



Рисунок 2.12 –  
Смартфон Apple  
iPhone 12 Pro

Определённую трудность представляет выбор свойства для характеристики той или иной ТС. О том же самом объекте – смартфоне – можно, например, спросить: «Какова его операционная система? Каково разрешение фронтальной камеры? Каков его процессор?». По-видимому, подобные вопросы могут возникнуть в разговоре специалистов, так как упомянутые параметры определены для них. Им известно, хорошо это или плохо, если, например, операционная система iOS 14, разрешение фронтальной камеры 6 Мп, процессор Apple A14 Bionic (рисунок 2.12).

Эти примеры лишь в общих чертах обрисовывают проблему свойств ТС и их оценки.

По сути, *свойство* есть *признак объекта* (в нашем случае технической системы). Признаком может служить, к примеру, способность вести себя определённым образом или удовлетворять какому-либо требованию. Через те или иные свойства даётся характеристика ТС. Для объективного анализа важно, чтобы оцениваемые свойства и критерии оценки можно было определить количественно.

Вероятно широкое толкование понятия «свойство», включающее функцию, производительность, размеры, удобство обслуживания, транспортабельность, технологичность и т.п., вначале будет представлять известные трудности для инженера, однако в процессе более глубокого изучения и использования такое толкование этого понятия становится естественным и привычным.

Далее следует твердо уяснить, что самое важное, чем можно охарактеризовать ТС, – это наличие у неё желаемых свойств, поскольку ТС является лишь исполнителем необходимой рабочей функции и соответственно предполагаемого поведения.

Во взаимосвязи с функцией находится ряд других свойств: удобство эксплуатации и обслуживания, ремонтпригодность и т.д. Наряду с этим имеется множество свойств, которыми должна обладать ТС, чтобы обеспечивалось желаемое функционирование (например, определённые прочность, габариты, форма).

Заказывая ТС, мы определяем не только то, что она должна делать, но одновременно устанавливаем её желаемые свойства. Как говорилось ранее, на этапе постановки задачи желаемые свойства технической системы называются требованиями.

Таким образом, чтобы отвечать предъявляемым требованиям, ТС должна выполнять желаемую рабочую функцию и обладать определёнными свойствами. ТС всегда является носителем самых различных свойств, но только мера этих свойств (ценность) имеет решающее значение. Совокупная ценность системы, обладающей многочисленными и разнообразными свойствами, определяется сочетанием оценок все этих свойств.

Для облегчения работы по составлению перечня требований при постановке задачи или проведении сравнительного, оценочного или контрольного анализа мы постараемся классифицировать все свойства по наиболее важным аспектам. Уже здесь необходимо подчеркнуть важность корректной постановки задачи по конструированию ТС. Далее конструктору необходимо понять отношения между свойствами, так как сущность процесса конструирования заключается в выяснении и формировании желаемых свойств системы и отношений между ними [9].

## 2.4.2 Категории свойств технических систем

Все многочисленные и разнообразные свойства ТС можно классифицировать по различным категориям: по способу установления свойств, по причинной связи, по функциональной зависимости, по возможности количественного определения свойств, по значимости свойств, по физической сущности свойств, по потребности в конструкторской работе. Рассмотрим их подробнее.

*Классификация свойств по способу их установления.* Различают внешние и внутренние свойства ТС.

Внешние свойства ТС легко установить либо посредством органов чувств, либо с помощью различных вспомогательных средств. К внешним свойствам относятся, например, форма, размеры, цвет. Внутренние свойства внешне никак не проявляются и для их установления приходится прибегать к специальным мерам.

Однако различение свойств ТС только с таких позиций приводит к неточным и относительным результатам. Для более точного определения указанных свойств необходимо исходить из системного принципа, тогда внешние свойства превратятся в отношения системы к её окружению. Внутренние свойства предстанут в качестве отношений между элементами системы и свойствами элементов. Отношения на более низких уровнях принимать во внимание не будем; это свойства отдельных

элементов, например свойства материала или электрические свойства, которые определяются структурой элемента. Пользователя ТС интересуют главным образом внешние свойства.

*Классификация свойств по причинной связи.* В соответствии с этой классификацией различают входные воздействия (причина) и функции (следствие).

Между входными воздействиями и функциями существуют причинные отношения. Способность разработчика тонко чувствовать различие между причиной и ее следствием относится к числу главных творческих способностей. Ему приходится «конструировать» причины для получения требуемых следствий.

---

*Примеры причинных отношений в ТС: наличие помех на входе радиотракта приемника является причиной малой чувствительности приемного устройства; наличие боковых лепестков диаграммы направленности антенной системы является причиной приема помеховых сигналов с второстепенных направлений; нелинейность амплитудной характеристики усилителя является причиной возникновения нелинейных искажений сигнала и т.д.*

---

Временная последовательность причины и действия проявляется в виде процесса.

*Классификация свойств по функциональной зависимости.* По функциональной зависимости свойства подразделяются на зависимо изменяющиеся и независимо изменяющиеся.

В областях естествознания и техники существует много формул, выражающих взаимозависимости свойств. Так, например, существует зависимость между давлением и уровнем жидкости; прочностью и температурой материала; скоростью движения объекта и его кинетической энергией; плотностью тока и поперечным сечением проводника. Все эти свойства находятся между собой в функциональной зависимости, которая может быть выражена аналитически. Свойства, на которые оказывается влияние, называются зависимыми переменными (например, прочность). Свойства, которые оказывают влияние на другие свойства, называются независимыми переменными (материал, форма, габариты). Одни и те же свойства в различных ТС могут выступать как зависимые или независимые.

*Классификация свойств по возможности их количественного определения.* По возможности количественного определения свойства ТС могут быть подразделены на определяемые легко; определяемые с трудом; не определяемые количественно.

В тех случаях, когда невозможно оценить свойства количественно, применяется балльная система оценки, т.е. с использованием определенных критериев проводится оценка свойств по возрастающим уровням (классам). Такой метод, бесспорно, дает более точные результаты, чем некая субъективная, большей частью продиктованная эмоциями «оценка», заканчивающаяся обычно выводом «хорошо» или «плохо». Однако и здесь возникает множество неопределённостей, обусловленных, с одной стороны, трудностью определения «цены» балла, а с другой – субъективностью эксперта, дающего оценку.

*Классификация свойств по их значимости.* В этом отношении свойства подразделяются на очень важные (незаменимые), например, функция, безопасность; важные, например надежность, срок службы, цена; менее важные, например отсутствие необходимости в упаковке, возможность длительного хранения; не существенные для функционирования ТС, например внешний вид, цвет.

Не все свойства ТС легко определить с точки зрения их значимости. Кроме того, необходимо учитывать относительность значимости, поскольку значимость тех или иных свойств зависит от обстоятельств. Порой важнейшим свойством оказывается быстрота поставки системы или легкость её демонтажа.

Масса, не имеющая существенного значения, например, для радиолокатора обзора летного поля, является важнейшим параметром для бортового радиолокатора системы предупреждения столкновений. Поэтому значимость различных свойств нужно тщательно анализировать в каждом конкретном случае.

*Классификация свойств по их физической сущности.* Свойства можно классифицировать по их физической сущности следующим образом:

- а) геометрические (ширина, высота, длина, симметрия, форма, межосевое расстояние, угол и т.д.);
- б) кинематические (скорость, ускорение и т.д.);
- в) механические (прочность, упругость, прогиб, герметичность и т.д.);
- г) тепловые (нагрев, теплопроводность, тепловые потери, теплоизоляция и т.д.);
- д) электрические и магнитные (ёмкость, напряжение, сопротивление, электрическая проводимость и т.д.);
- е) оптические (фокусное расстояние, преломление, отражение, поляризация и т.д.);
- ж) акустические (поглощающая способность, эхо, шум, звуковая частота);
- з) химические (химическая активность, концентрация, коррозия, химическое сродство и т.п.).

Классификация свойств по их физической сущности соответствует структуре технических наук. Приведенный перечень категорий свойств наглядно иллюстрирует пестроту и многообразие свойств ТС.

Прежде чем перейти к следующим способам классификации, посмотрим, помог ли описанный подход достичь поставленной цели – облегчить деятельность разработчика. Наиболее существенное, что можно выделить в приведённой до сих пор классификации свойств, – раскрытие отношений между свойствами. Прежде всего это касается первых трёх способов классификации. Классификация свойств по их физической сущности демонстрирует многообразие свойств ТС.

Разумеется, ни одного из приведённых способов классификации недостаточно для полной характеристики свойств, что необходимо для методической работы проектировщика. Нельзя забывать, что такая характеристика должна не только быть применимой к свойствам любых ТС (от детали до системы систем (предприятия)), но и учитывать технический, экономический, эргономический, манипуляционный, социальный, психологический, физиологический, юридический и другие аспекты. В [9] приводится следующий перечень групп возможных свойств:

- 1) количественные (параметры);
- 2) геометрические;
- 3) механические;
- 4) тепловые;
- 5) электрические и магнитные;
- 6) оптические;
- 7) акустические;
- 8) химические;
- 9) производственные и монтажные;
- 10) эксплуатационные.

Группы 2–8 соответствуют областям знаний, а группы 1, 9 и 10 сформированы по другим принципам. Хотя этот перечень охватывает далеко не все свойства, он свидетельствует о широком спектре свойств технических систем.

*Классификация свойств по потребности в конструкторской работе.* Примерный перечень свойств соответствующих категорий дан в таблице 2.4, где вопросы призваны помочь выявлению содержания категории, а примеры – облегчить понимание.

Таблица 2.4 – Классификация свойств технических систем по потребности в конструкторской работе

Категория свойств	Вопросы	Примеры свойств
Функция	Каковы функции системы?	Рабочая (целевая) функция
Действие	Что делает система?	Вспомогательная функция Подготовительная функция Функция управления и регулирования Функция согласования
Функционально обусловленные свойства	Какие условия характерны для данной функции?	Производительность Скорость Размеры Масса Функциональные параметры
Производственные свойства	Насколько пригодна система для производственного процесса?	Безопасность эксплуатации Надёжность Срок службы Расход энергии Занимаемая площадь Ремонтопригодность
Эргономические свойства	Как обслуживается система и какое влияние оказывает на человека?	Удобство обслуживания Способы обслуживания Виды помех Требования к оператору
Эстетические свойства	Как система воспринимается эстетически?	Форма Цвет Удобство Привлекательность



## Окончание таблицы 2.4

Категория свойств	Вопросы	Примеры свойств
Манипуляционные свойства	Насколько пригодна система для целей транспортировки, хранения, упаковки?	Соответствует условиям транспортировки Соответствует условиям хранения Соответствует условиям упаковки Пригодна для непосредственного пуска в ход
Характеристики поставок и планирования	Когда система может быть поставлена? В каком количестве изготавливается?	Доступность Продукция серийного производства Продукция единичного производства
Правовые нормы	Соответствует ли система правовым юридическим нормам и положениям?	Соответствует юридическим нормам Нарушение патентного права Соответствует требованиям коллективного договора
Технологические свойства	Насколько соответствует система принятой технологии?	Соответствует технологии Соответствует условиям монтажа
Экономические свойства	Насколько экономичен процесс производства?	Эксплуатационные расходы Издержки производства Экономическая эффективность Цена
Конструктивные свойства	Как реализуются внешние свойства?	Структура Форма Габариты Материал Качество поверхности Поле допуска Тип производства
Качество изготовления	Кто и как изготовил систему?	Изготовитель Достоинства и недостатки изготовления

### 2.4.3 Ключевые требования

Многие проектные организации применяют концепцию главных (ключевых) требований, в особенности на уровне заинтересованных сторон [3, 10]. Эти требования, известные как ключевые требования пользователей (KUR – Key User Requirements) или ключевые показатели эффективности (KPI – Key Performance Indicators) [11], представляют собой небольшое подмножество требований, выделенных из общей совокупности требований, предъявляемых к системе в целом.

Смысл принципиальной основы выбора ключевых требований заключается в том, что, проектируя систему, нужно думать не о том, что может быть реализовано или пригодится, а о том, без чего пользователь не сможет обойтись.

Для каждого ключевого требования должен быть получен уверенный отрицательный ответ пользователя или заказчика системы на вопрос: «Если предлагаемое решение не предоставляет мне эту возможность, сохраняется ли моё намерение

заплатить за него?» или на вопрос: «Если система не выполняет эту функцию, сохраняется ли для меня необходимость в её приобретении?».

При таком подходе ключевыми становятся только совершенно необходимые, обязательные требования.

Насколько это возможно, каждое ключевое требование должно быть выражено в количественной форме с помощью показателей, связанных с функциональными характеристиками системы. В таком случае ключевые требования могут быть использованы в качестве КРІ для предварительной оценки альтернативных предложений по требованиям или в качестве сводки важнейших статистических показателей, характеризующих развитие проекта.

#### 2.4.4 Критерии развития, показатели качества и недостатки технических объектов

**Критерии развития.** В настоящее время разработаны многие показатели оценки ТО [1, 8]. Показатели – это данные, по которым можно судить о развитии, ходе, состоянии чего-нибудь.

---

*Примерами могут служить производительность, затухание во времени переходного процесса, силовой режим, характеристики напряженного состояния и виброустойчивость, мощность, долговечность, стабильность, надежность, быстрдействие, частотный спектр, масса, коэффициент полезного действия, герметичность и т.д.*

---

Среди параметров и показателей, характеризующих любой ТО, всегда есть один или несколько таких, которые на протяжении длительного времени (иногда всей истории существования рассматриваемого класса ТО) имеют тенденцию монотонного изменения (улучшения) до достижения предельного значения. Эти показатели всеми осознаются как мера совершенства вследствие прогрессивности, и они оказывают очень сильное влияние на развитие некоторых классов ТО и техники в целом. Такие параметры и показатели называются *критериями развития ТО*.

Поскольку любой ТО, как правило, имеет несколько критериев развития, то принцип прогрессивного развития для каждого нового поколения ТО заключается в улучшении одних и неухудшении других критериев.

Наряду с критериями развития существуют ещё *показатели качества* (критерии качества) ТО, к ним в первую очередь относятся критерии развития и параметры, определенное изменение которых может приводить к улучшению качества и эффективности этого ТО. Кроме того, показатель качества позволяет выбрать из двух альтернативных вариантов ТО или их описаний лучший вариант при равенстве или эквивалентности других показателей.

Наборы критериев развития для различных классов ТО в значительной степени совпадают, поэтому в целом развитие техники в большой мере подчинено, можно сказать, единому набору критериев, определяющих его [8, 12]. На рисунке 2.13

показана систематика основных критериев развития ТО, реализующих различные функции [1].

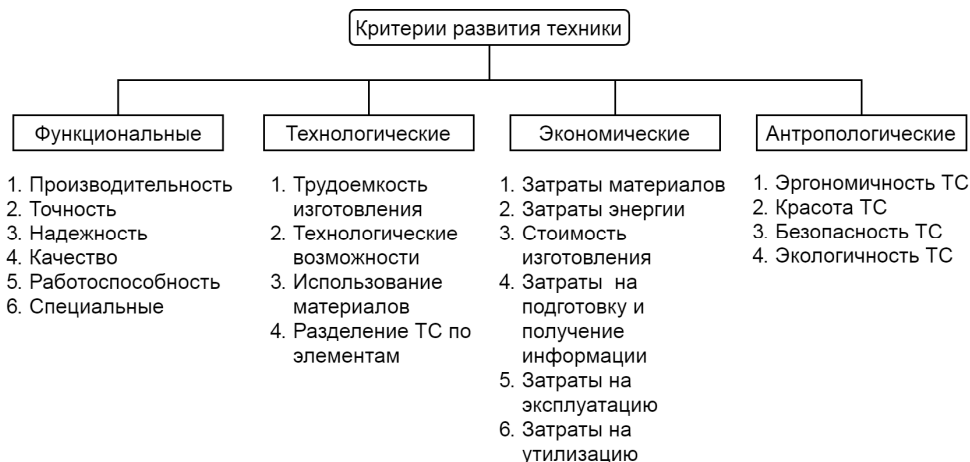


Рисунок 2.13 – Систематика критериев развития технических систем

Этот единый набор, как следует из рисунка 2.13, делится на четыре группы критериев:

- 1) функциональные критерии, характеризующие важнейшие показатели реализации функции ТО;
- 2) технологические критерии, связанные только с возможностью и простотой изготовления ТО;
- 3) экономические критерии, определяющие только экономическую целесообразность реализации функции с помощью рассматриваемого ТО;
- 4) антропологические критерии, связанные с оценкой степени соответствия и приспособления ТО к человеку (дискомфорт, эмоциональность, степень исключения вредных и опасных воздействий или, наоборот, воздействия положительных факторов ТО на человека).

В таблице 2.5 приведены примеры показателей производительности ТО [13].

Таблица 2.5 – Примеры показателей производительности технического объекта

Наименование ТО	Структура формулы	Единица измерения
Процессор ЭВМ	$N/t$	Операций/с
Принтер	$Pg/t$	Страниц/мин
Модем	$V/t$	кбит/с
Автоматическая паяльная станция	$Ms/t$	Микросхем/с
Записывающий привод для компакт-дисков CD-ROM	$V/t$	Мбайт/с
Сверлильный станок для изготовления сквозных отверстий печатных плат	$Ot/t$	Отверстий/мин
Установка магнетронного напыления тонких плёнок гибридных интегральных микросхем	$Pd/t$	Подложек/ч

В таблице 2.6 приведены примеры показателей эффективности ТО [13].

Таблица 2.6 – Примеры показателей эффективности технического объекта

Наименование ТО	Наименование показателя	Единица измерения
Процессоры ЭВМ, копировально-множительная техника	Производительность	Операций/с, страниц/мин
Трансформатор	Мощность	кВ·А
Электронный усилитель	Коэффициент усиления	дБ
Сканер	Разрешающая способность	Точек/дюйм
Электродвигатель	Крутящий момент	Н·м/с
Динамическое оперативное запоминающее устройство	Время доступа	мс
Аккумуляторная батарея	Отношение времени работы ко времени заряда	отн. ед

Каждый ТО, особенно несколько объектов, составляющих сложную систему, оценивается комплексом показателей, которые в целом характеризуют процесс её жизнедеятельности [1].

Для определения показателей сложной системы выясняется связь ее свойств с факторами, их вызывающими. Результатом измерения воздействий факторов являются значения параметров. Например, для определения показателя массы следует выяснить связь между объёмом и габаритами элементов системы. Параметрами здесь будут линейные размеры и конфигурация элементов.

Перечень параметров элементов сложных систем огромен, что связано с разнообразием элементов и самих систем. Вследствие этого они трудно поддаются классификации. Однако можно выделить наиболее часто встречающиеся типы параметров. Параметры делят на размерные и безразмерные (относительные), абсолютные и удельные, традиционные и нетрадиционные.

К относительным или удельным показателям можно отнести коэффициент полезного действия, коэффициент усиления, фактор обратной связи, коэффициент технологичности, удельную материалоемкость или энергоёмкость ЭРЭС.

К самым распространенным относятся следующие параметры ЭРЭС:

- напряжение питания, В;
- ток питания, А;
- потребляемая мощность, Вт;
- масса, кг;
- габариты, м<sup>3</sup>;
- несущая частота, Гц;
- ширина частотного спектра сигнала, Гц;
- период импульсной последовательности, с;
- длительность импульса, с;
- начальная фаза сигнала, град;
- скорость передачи данных, бит/с.

Часть нетрадиционных параметров становится известна разработчикам в ходе испытаний ЭРЭС в экстремальных режимах или при измерении средствами повышенной точности.

Другая часть нетрадиционных параметров разработчикам неизвестна. Возможно, что они даже не подозревают об их существовании.

Сформулируем условия и требования, которым должны удовлетворять параметры, относящиеся к критериям развития ТО, т.е. определим условия и требования, с помощью которых для любого класса ТО можно выделить критерии развития.

*Условие измеримости.* За критерии развития могут быть приняты только такие параметры ТО, которые допускают возможность количественной оценки по одной из шкал измерений: шкале отношений, интервалов или порядка. Предпочтение отдается шкале отношений, но если она неприемлема, то шкале интервалов и в последнюю очередь шкале порядка.

*Условие сопоставимости.* Критерий должен иметь такие единицы измерения, которые позволяют сопоставлять ТО для разных времен и стран. Лучше всего подходят безразмерные и удельные величины, с помощью которых можно сопоставлять ТО соответственно с различными функциями и с одинаковой функцией или близкими функциями.

*Условие исключения.* За критерии могут быть приняты такие параметры ТО, которые в первую очередь характеризуют его эффективность и оказывают определяющее влияние на его развитие. Если эти параметры не принимать во внимание при создании новых поколений ТО, то может произойти:

- нежелательное направление развития рассматриваемого класса ТО;
- полное отсутствие развития;
- недостаточное удовлетворение потребностей человека (пользователя) или полное неудовлетворение.

*Условие постоянства.* За критерии могут быть приняты такие параметры ТО, для которых всегда имеет место условие исключения.

*Условие минимальности и независимости.* Вся совокупность критериев развития должна содержать только такие, которые не могут быть логически выведены из других критериев или не могут быть их прямым следствием.

После выделения набора критериев развития для интересующего класса ТО необходимо дать описание каждого критерия. Такое описание включает следующие сведения.

1. Сущность критерия, время и причины его возникновения.
2. Формулу или способ измерения критерия, включая указание шкалы или единицы измерения.
3. Диапазон и характер изменения значений критерия во времени.
4. Оценку степени общности критерия по трехбалльной шкале:
  - а) если критерий имеет отношение к рассматриваемому классу, то с одинаковыми или близкими функциями;
  - б) если критерий имеет отношение к нескольким классам, то с различными функциями, но объединёнными общими свойствами;

в) критерий имеет отношение к ТО с любой функцией.

Оценка степени общности критерия указывает на возможности заимствования улучшенных технических решений из других областей техники.

5. Оценку изменения относительной значимости (актуальности) критерия в прошлом и обозримом будущем по трёхбалльной шкале:

- а) актуальность возрастает;
- б) актуальность остается неизменной;
- в) актуальность снижается;

6. Основные способы и средства улучшения критерия.

**Выбор критерия.** Одним из центральных этапов проектирования является количественная оценка альтернатив, поэтому важно выбрать соответствующий критерий, выраженный в терминах цели системы. Назначение критерия состоит в том, чтобы установить предпочтительный вариант технического решения при решении многовариантных задач в процессе проектирования.

При решении несложных задач обычно стремятся использовать один критерий (надежность, стоимость, КПД, ресурс и т.п.). Однако многие реальные задачи, возникающие при проектировании, являются многокритериальными. В этих случаях состояние одних и тех же структурных составляющих одной и той же системы оценивают несколькими критериями.

---

*Например, РЭС оценивают по критериям надежности, массы и стоимости. В этом случае, стремясь к обеспечению требуемой надежности, делают многократное резервирование отдельных компонентов и подсистем, что приводит к возрастанию массы и стоимости всего РЭС. В то же время, стремясь к снижению массы и стоимости, делают выбор соответствующей электронной компонентной базы, что может привести к уменьшению надежности РЭС.*

---

Многокритериальную задачу можно привести к однокритериальной путем выделения главного критерия. При этом возникают два основных затруднения: во-первых, необходимо выделить главный критерий, по которому будут определять оптимальные значения параметров; во-вторых, перевести остальные критерии в класс ограничений. Такой путь приводит к снижению точности решения задачи, поэтому выбор главного критерия необходимо провести с минимально возможным ущербом для точности решения исходной задачи.

Известны и другие методы решения многокритериальных задач, которые базируются на оценке значимости каждого критерия для оценки состояния структурных составляющих и всей системы в целом. Значимость каждого критерия можно оценивать на основе балльного метода, который не отличается высокой точностью, но даёт возможность получить обобщённую оценку состояния системы. На рисунке 2.14 приведена схема оценки состояния системы разными характеристиками.

Выбрать одну из них для оценки состояния системы не представляется возможным, так как все являются важными. По этой причине используют метод приведенного обобщённого критерия. Основой этого метода является принцип взвешенных

характеристик, который предусматривает введение коэффициентов, отражающих значимость каждой характеристики. Сложность метода заключается в установлении значений этих коэффициентов.

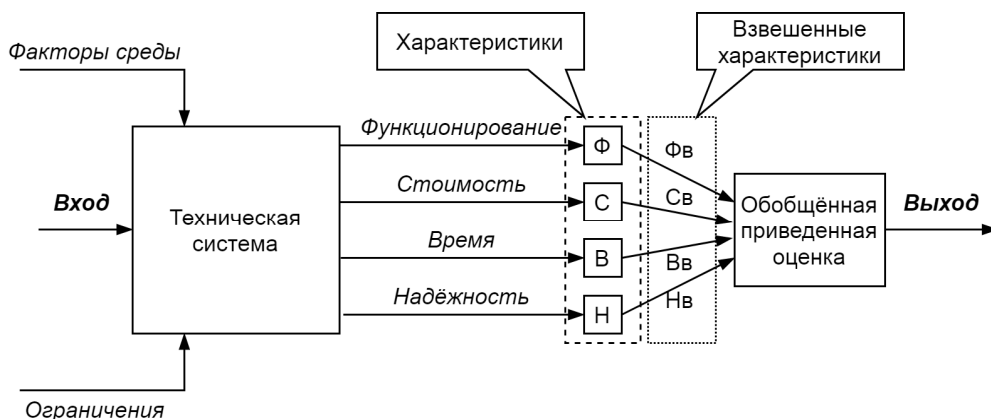


Рисунок 2.14 – Оценка состояния технической системы

В практике проектирования одну из главных характеристик объекта выбирают в качестве критерия оптимальности. Затем выбирают варьируемые параметры, в наибольшей степени влияющие на характеристики оптимизируемого объекта, после чего устанавливают пределы значений остальных характеристик ТО.

При проектировании обычно стремятся найти такие параметры, которые обеспечат желаемые значения сразу нескольких характеристик. В первую очередь интересуются не поиском экстремума одной целевой функции, а достижением решения, удовлетворяющего сразу нескольким требованиям. Поэтому при проектировании целесообразно вести работу в два этапа. На первом этапе определяют параметры, обеспечивающие заданные характеристики объекта. На втором этапе улучшают конструкцию по отдельным характеристикам или по одной характеристике, принятой за критерий оптимальности.

---

*Например, при проектировании системы GPS, устанавливаемой на космических спутниках связи и навигации, прежде всего решают вопросы обеспечения точности определения местоположения наземных приемников GPS-сигнала. После обеспечения этой характеристики переходят к оптимизации конструкции по массогабаритным показателям бортовой системы GPS, которые стремятся привести к минимуму, или по энергетическому КПД системы, который стремятся максимизировать.*

---

**Показатели качества.** Согласно ГОСТ 15467-79 «Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения» под качеством продукции понимается совокупность её свойств, обуславливающих степень пригодности удовлетворять определённые потребности применительно к назначению. Техническая эффективность (качество) характеризуется рядом показателей, которые выступают

как мера совершенства и прогрессивности и в обобщённом виде называются критериями развития.

К показателям качества, кроме критериев развития, относятся параметры, изменение которых может приводить к улучшению качества и эффективности ТО. Показатель качества позволяет выбрать из двух альтернативных вариантов ТО или их описаний лучший вариант при равенстве или эквивалентности других показателей. Показатели технической эффективности – это реализованные критерии развития. Показатели качества представлены на рисунке 2.15. Сравнение критериев развития и показателей качества свидетельствует, что они во многом накладываются друг на друга.

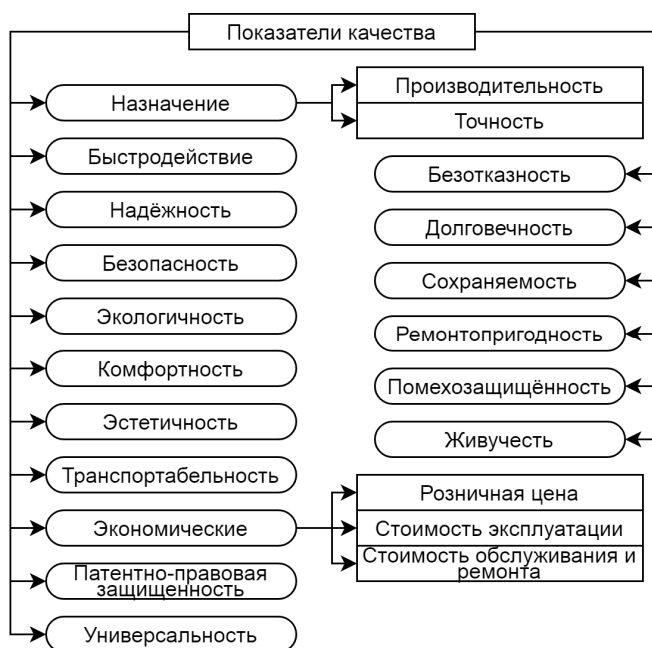


Рисунок 2.15 – Показатели качества технического объекта

Назовем основные группы показателей, которые учитываются при проектировании ТО или ТС.

*Геометрические:* длина, ширина, высота, площади, занимаемые конструкцией в плане, и площади сечений, объем, форма.

*Физико-механические:* масса конструкции и отдельных её элементов, материалоемкость, прочностные и иные качества используемых материалов (в том числе новых), коррозионная стойкость и т.д.

*Энергетические:* вид энергии и мощность, КПД и т.д.

*Конструкторско-технологические:* технологичность изготовления ТО, его транспортабельность, жесткость, а также соотношение к техническому решению таких факторов, как защищенность от вредных воздействий среды, сложность или простота изготовления и др.



*Надёжность и долговечность:* данные чисто технического характера – техническая надёжность, долговечность, нечувствительность к вредным воздействиям среды (все, что связано с участием человека в работе, вынесено в группу показателей).

*Эксплуатационные:* производительность, точность и качество работы ТО, стабильность его параметров, степень специализации (универсальности), степень готовности к работе, эргономичность, степень комфорта и т.д.

*Экономические:* себестоимость ТО и отдельных его элементов, трудозатраты на производство и эксплуатацию, расходы, потери и т.д.

*Степень стандартизации и унификации.*

*Удобство обслуживания и безопасность:* все, что связано с охраной труда и техникой безопасности, эргономикой и инженерной технической психологией, удобством работы, контролем и ремонтом, требованиями комфорта (шум, вибрации, влажность, температура, запыленность, освещенность); сюда же входит все, что связано с участием человека в обслуживании ТО.

*Художественно-конструкторские:* все показатели, которые, с одной стороны, придают ТО высокие художественно-конструкторские достоинства (тектоничность, масштабность, цельность, гармоничность, пропорциональность и др.), а с другой – позволяют рассматривать ТО как промышленный образец.

Последняя группа показателей дополнительно разворачивается для ЭРЭС в классификационную карту оценки их художественно-конструкторских качеств. В карте с целью облегчения и систематизации процесса анализа критерии оценки можно объединить в три группы: композиционное совершенство, показатели товарного вида и эргодизайнерские показатели (таблица 2.7) [2].

Таблица 2.7 – Критерии оценки художественно-конструкторских качеств ЭРЭС

Группа критериев	Название критериев
Композиционное и тектоническое совершенство ЭРЭС	Соответствие ЭРЭС общественным потребностям
	Соответствие формы ЭРЭС их назначению
	Соответствие формы ЭРЭС материалу и технологии
	Композиционное единство, целостность формы, пропорциональность, масштабность и выразительность частей
	Соответствие общего стиля формы и отделки окружающей среде и современным вкусам
	Соответствие декоративных элементов форме и функциональному назначению ЭРЭС
Показатели товарного вида	Качество поверхности (покрытие и обработка)
	Выразительность фирменных и указательных знаков
	Сопроводительная документация, её рекламные и информационные качества
	Качество упаковки
Эргодизайнерские показатели	Удобство пользования органами управления
	Целесообразность решения органов визуальной информации
	Удобство в обслуживании и эксплуатации
	Степень учета физиологических и психологических требований при выборе формы и цвета изделия

На каждом этапе проектирования и производства ЭРЭС проводится оценка художественно-конструкторских показателей. При этом используются четыре вида оценки:

- правовая защита оригинальности конструкции ЭРЭС;
- количественная оценка эстетических и эргономических показателей;
- качественная оценка;
- приёмка опытных образцов и установочных партий на этапе авторского надзора.

Оригинальность художественно-конструкторского решения ЭРЭС дает право на авторскую защиту его в качестве промышленного образца, что учитывается при аттестации и сертификации изделия. Патентованию подлежит аппаратура, которая обладает новым конструкторско-художественным решением, определяющим ее вид, соответствующий требованиям технической эстетики, пригодный к изготовлению промышленным способом и дающий положительный эффект.

Художественно-конструкторское решение признается новым, если по совокупности своих определяющих признаков оно отличается от известных решений. Художественно-конструкторское решение признается соответствующим требованиям технической эстетики, если оно обладает художественной и информационной выразительностью, целостностью композиции, рациональностью формы.

Качество композиции ЭРЭС характеризуется соотношением красоты и пользы (формы и содержания), т.е. гармоничностью. Эстетические показатели качества оцениваются уровнем стиливого решения формы, её фундаментальностью и композиционной законченностью, качеством отделки поверхности.

Эргономические показатели качества ЭРЭС оцениваются по удобству обслуживания, его оперативности и безопасности. При качественной оценке художественно-конструкторского уровня ЭРЭС в случае сертификации принимают во внимание карты технического уровня, в которых, кроме эстетических и эргономических показателей, учитываются и технико-экономические (функциональные) показатели. Считается, что весомость эстетических и эргономических показателей в комплексном показателе качества составляет около 10%.

Следует отметить, что показатели и их изменения реальны, объективны, а приёмы улучшения субъективны и по своей сути отражают работу человеческого мозга, мышление проектировщика. Конечно, одинаковое решение может быть принято и объяснено различными приёмами. Об этом говорит то, что часто независимо друг от друга появляются одинаковые изобретения.

**Недостатки ТО.** У любого ТО в процессе изготовления и эксплуатации сразу или со временем появляются определенные недостатки (дефекты). Из закона прогрессивной конструктивной эволюции ТО следует, что каждый используемый объект обычно имеет недостатки, устранение которых обеспечивает получение новой улучшенной модификации ТО. Недостатки могут изменяться или появляться вновь с учетом технического прогресса.

Наиболее частые причины появления недостатков заключаются в следующем:

– при проектировании ТО некоторые требования были занижены (например, оказалась недостаточной выходная мощность передатчика) или завышены (чрезмерный запас надежности отдельных элементов);

– в список требований не включены какие-либо существенные требования (например, защита блока питания от короткого замыкания);

– список имел лишние требования (введена дополнительная возможность энергозапитки системы от нестандартного источника вторичного электропитания);

– значения некоторых параметров, и в первую очередь критериев развития, имели показатели ниже мирового уровня, т.е. изделие оказалось неконкурентоспособным.

В итоге для каждого используемого ТО формируется список недостатков, который служит основой для составления списка требований при разработке и проектировании нового поколения ТО.

## **2.4.5 Классификация общих технических требований к электронным и радиоэлектронным средствам**

Одной из главных задач в решении проблемы обеспечения комплексного качества радиоэлектронных средств является правильное формирование полной системы требований к процессу конструирования и их реализация на всех стадиях создания и эксплуатации техники [14].

При конструировании ЭРЭС особенно важно найти место тех или иных требований (подчас противоречащих друг другу) в системе общих технических требований к ЭРЭС и правильно расставить приоритеты в их достижении. Сложность решения этой задачи заключается в противоречивости взглядов на комплекс требований к сложным радиоэлектронным средствам. Так, широко распространено мнение, что, например, требования технической эстетики относятся только к внешнему виду ЭРЭС. Внешний вид ЭРЭС – композиционное и компоновочное решение формы (ее пропорции, пластика, силуэт и т.п.), ее отделка и т.п. – безусловно, играет важную роль в обеспечении их качества, но это далеко не главный показатель оптимальности конструкции ЭРЭС с точки зрения дизайна и им, конечно, не исчерпываются огромные возможности технологического дизайна и эргономики в совершенствовании конструкций изделий.

Основой технических требований является прежде всего сумма потребительских параметров изделий, которая разрабатывается посредством всестороннего анализа системы сложнейших связей комплекса «человек – изделие – производственная среда».

Условия эксплуатации ЭРЭС с каждым годом ужесточаются, что приводит к соответствующему ужесточению требований к ЭРЭС. В качестве примера в таблице 2.8 представлены данные по росту степени механических воздействий за период с 1965 по 2000 г.

Таблица 2.8 – Эволюция требований к радиоэлектронным средствам по механическим воздействиям

Механические воздействия	Уровень требований			
	1965 г.	1970 г.	1995 г.	2000 г.
Вибрации: частота, Гц / ускорение, g	1000 / 4	2500 / 4	5000 / 5	10000 / 5
Линейное ускорение, g	75	150	500	800
Однократные удары, g	150	500	1000	2000
Многократные удары, g	75	150	150	200
Акустические шумы, дБ	–	–	165	180

Говоря о качественном совершенстве конструкций ЭРЭС, нельзя рассматривать их с чисто инженерных позиций. Необходим более обширный и глубокий, чем в инженерном конструировании, подход с привлечением эргономических и социальных аспектов, а также следует учитывать современную маркетинговую ситуацию на потребительском рынке. Отсюда возникает комплекс специфических требований, определяющих всесторонние потребительские свойства изделий: их компоновочное и структурное решение, современное функциональное решение, рациональную расчлененность на сборочные единицы, стиль, эргономические параметры и т.п. С другой стороны, безусловно, важнейшим требованием остается комплекс конструктивно-технологических параметров, тактико-технические характеристики изделия, требования к надежности и т.д.

Таким образом, наиболее правильно понимать под общими техническими требованиями комплекс функциональных, технических, технологических, экономических, эргономических и эстетических требований. Все эти требования выступают как различные стороны (признаки) комплексного качества изделия.

В сфере разработки ЭРЭС общие технические требования условно разделяют на общие эксплуатационные требования, общие конструктивные требования, требования технической эстетики и специальные требования. Частные требования к ЭРЭС можно разделить на четыре группы: эксплуатационные; компоновочные; требования эстетики и эргономики; конструктивно-технологические.

Рассмотрим схему общих технических требований и покажем их существование и взаимосвязь в общей структуре качественных характеристик изделия (рисунок 2.16).

*Эксплуатационные требования.* Одним из важнейших эксплуатационных требований к ЭРЭС является обеспечение комплексной надежности. В понятие комплексной надежности в случае конструирования можно, с одной стороны, включить долговечность работы конструкции в условиях механических и климатических воздействий, а с другой – эргономическую оптимальность для оператора (эргономичность конструкции оборудования).

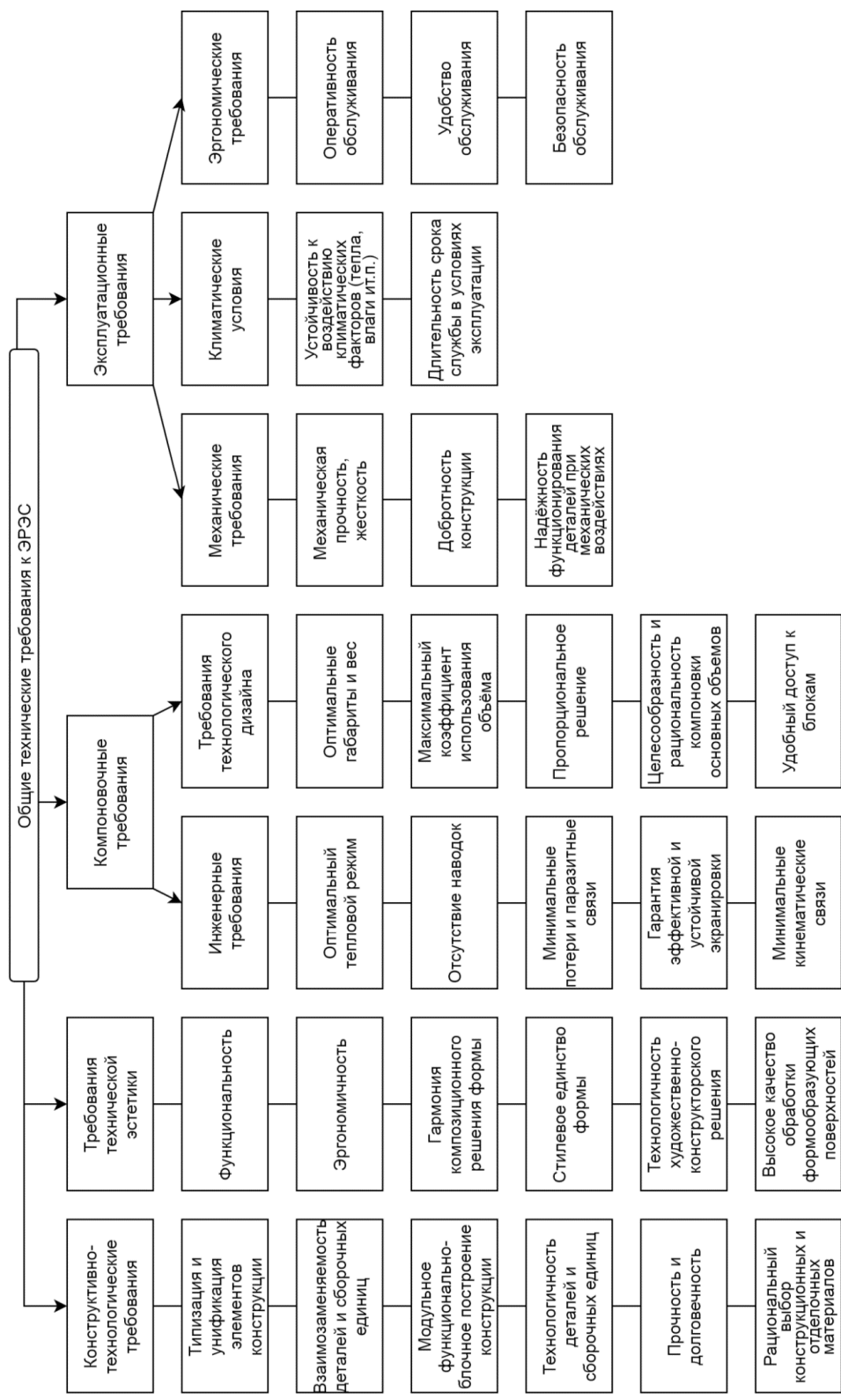


Рисунок 2.16 – Схема общих технических требований к радиоэлектронным средствам

Эксплуатационная надежность ЭРЭС прямо связана с совершенством всей системы «человек – ЭРЭС – среда». Так, при эксплуатации ЭРЭС специального назначения предъявляются исключительно высокие требования к работе оператора в системе «оператор – ЭРЭС». Он должен обеспечивать надежное и качественное исполнение всех операций на каждом из участков «большой системы ЭРЭС», часто содержащей десятки и сотни единиц изделий. Конструкции изделий по своим эргономическим параметрам должны быть спроектированы с учетом биомеханических особенностей и психофизиологических возможностей оператора и позволять оператору эффективно и надежно выполнять его функции.

Можно сказать, что взаимосвязь всех других общих технических требований с эксплуатационными требованиями наиболее жесткая и глубокая, так как все методы конструктивно-технологической отработки ЭРЭС, направленные на обеспечение высоких потребительских качеств изделия, находят отражение прежде всего во всестороннем улучшении эксплуатационных параметров (показателей).

Эксплуатационные требования к ЭРЭС проявляются, как показано на рисунке 2.16, в климатических, механических и эргономических характеристиках.

*Климатические и механические характеристики* определяют:

– механическую прочность, жесткость и добротность конструкции, надежность функционирования деталей, сборочных единиц ЭРЭС при воздействии внешних механических факторов; устойчивость изделия при воздействии на него вибрации и ударов, линейных и угловых ускорений;

– устойчивость конструкции к воздействию климатических факторов (тепла, влаги, соляного тумана, радиации, биологических факторов и т.п.);

– длительность срока службы в условиях эксплуатации.

*Эргономические характеристики* (в аспекте их влияния на эксплуатационные показатели) определяют оперативность обслуживания – минимальные затраты времени на подготовку ЭРЭС к работе, быстрое выполнение рабочих манипуляций и т.п.; удобство обслуживания – легкий доступ к основным сборочным единицам и блокам в условиях эксплуатации, возможность быстрого осмотра, комплексный биомеханический и психофизиологический комфорт на рабочем месте, рациональную компоновку и конструктивное исполнение устройств управления (штурвалов, ручек, рычагов, тумблеров, кнопок, переключателей и т.п.) и устройств отображения информации (шкал, экранов, табло, мнемосхем и т.п.), рациональные режимы труда и отдыха и т.д.; безопасность обслуживания, наличие устройств заземления, экранировки, блокировки, аварийной сигнализации и т.п.

*Компоновочные требования.* Компоновочные требования являются едва ли не самыми важными в процессе формообразования и общего структурного построения изделия, так как их выполнение позволяет создать стройную компоновочную структуру изделия – основу рациональной, гармоничной композиции его формы, и по возможности применить функционально-блочную (модульную) систему его построения. Эти требования также комплексны по своему содержанию.

Очевидно, часть компоновочных требований может быть обеспечена в процессе инженерного конструирования. К этим требованиям можно отнести:

- обеспечение рациональных массогабаритных характеристик;
- максимальное сокращение кинематических связей в изделии;
- рациональную расчлененность на сборочные единицы;
- снижение (или полное исключение) взаимных наводок между блоками и электрическими цепями междублочного и внутриблочного монтажа, между вводами и выводами; оптимальный тепловой режим и т.п.

Другие компоновочные требования не могут быть рационально применены во время монтажа и обеспечены в процессе чисто инженерного конструирования – они получают наиболее полное, глубокое и всестороннее выражение лишь в процессе технологического дизайна ЭРЭС. Их целесообразно отнести к дизайнерским компоновочным требованиям.

Таковыми требованиями являются рациональные габариты и вес, максимальный коэффициент использования объема, пропорциональное решение приборных корпусов ЭРЭС, удобный доступ к комплектующим сборочным единицам и блокам в процессе сборки и эксплуатации и т.п.

*Требования технической эстетики* в целом направлены на выявление и обеспечение потребительских (в частности, художественно-конструкторских и эргономических) качеств изделий, которые предопределяют совершенство конструкции в комплексе «человек – ЭРЭС – среда».

Требования технической эстетики представляют собой комплекс социально-экономических, функционально-конструктивных, эргономических и эстетических требований, выполнение которых обеспечивает создание экономически и технологически целесообразного, технически совершенного, экономичного, красивого и удобного в эксплуатации изделия.

В методическом плане можно выделить в отдельную группу и собственно требования технической эстетики к ЭРЭС, которые определяют научные и практические критерии его дизайнерского и эргономического решения.

*Социально-экономические требования* устанавливают оптимальную потребность в изделиях ЭРЭС, их оптимальную номенклатуру и т.п. и в целом направлены на создание таких социально-экономических условий, которые будут развивать эстетическое отношение к процессу и результатам труда способствовать росту его производительности при одновременном гармоничном развитии личности.

Некоторые авторы, говоря о социально-экономических требованиях, считают, что дизайнер может активно влиять на номенклатурный состав изделий, определять его и т.п. Однако такое утверждение слишком категорично.

Процесс влияния технологического дизайна на формирование социально-экономического развития в сфере проектирования ЭРЭС чрезвычайно сложен и выражается в том, что под влиянием проектирования происходит постоянная, в том числе и эстетическая, модернизация ЭРЭС, отмирание в номенклатуре тех видов изделий, которые уже не удовлетворяют эстетическим и эргономическим запросам работающих, не способствуют формированию определенного эстетического отношения к процессу и результатам труда, а следовательно, не способствуют повышению его производительности. Именно так следует понимать социально-экономические

требования технической эстетики и оценивать степень влияния технологического дизайна на потребность в ЭРЭС.

*Функционально-конструктивные требования* представляют собой комплекс конструктивно-технологических и функциональных требований к конкретному решению ЭРЭС (включая формообразование приборных корпусов). Эти требования определяют связь формы корпусов ЭРЭС с конструкцией, соответствие формы приборных корпусов их функциональному назначению, технологичности и т.п.

*Эргономические требования* – это в соответствии с ГОСТ 20.39.108-85 «требования, определяемые свойствами человека, характеристиками производственной среды и предъявляемые к изделию для повышения эффективности взаимодействия человека с данным изделием». Реализация эргономических требований предполагает проектирование ЭРЭС с учетом психологических и физиологических особенностей, биомеханических возможностей и антропометрических данных человека-оператора.

Общие эргономические требования, характерные для групп (классов) изделий и классифицируемые по предметно-функциональному признаку, являются основой для разработки частных эргономических требований, обусловленных назначением и особенностями эксплуатации конкретных видов ЭРЭС.

*Эстетические требования* – требования, направленные на обеспечение композиционной целостности формы приборных корпусов ЭРЭС, ее гармоничности, соответствие общего формообразования ЭРЭС требованиям современного стиля. Обще-теоретические требования технической эстетики позволяют сформулировать ряд частных требований, которые можно назвать прикладными требованиями технической эстетики. Форма изделий может считаться эстетически совершенной, если обеспечена функциональность формы приборного корпуса, ее эргономичность, высокий уровень композиционного решения, стилевое единство, технологичность; высокое качество обработки и отделки формообразующих поверхностей.

Требования технической эстетики по своей сущности комплексны для всего процесса проектирования (непосредственно связаны с компоновочными, конструктивно-технологическими и другими требованиями). Важно отметить, что требования технической эстетики не существуют сами по себе, самостоятельно и не могут рассматриваться изолированно от общих технических требований. Они как бы синтезируют в себе наиболее прогрессивные взгляды на данное изделие, являются их логическим выражением. Требования технической эстетики тесно связаны с конструктивно-технологическими требованиями.

*Конструктивно-технологические требования.* Среди множества этих требований необходимо выделить взаимозаменяемость отдельных элементов конструкции; максимальную унификацию и стандартизацию изделия (в том числе и его формообразующих элементов); функционально-блочное (модульное) построение конструкции; технологичность деталей и сборочных единиц (в том числе формообразующих элементов); рациональный выбор конструкционных и отделочных материалов и т.п.

Конструктивно-технологические требования должны рассматриваться весьма подробно и иметь характерные особенности для каждого конкретного вида изделий.



## 2.5 Обеспечение выполнения требований

### 2.5.1 Установление свойств и отношений между ними

*Отношением  $R$*  называется взаимозависимость или взаимодействие двух и более объектов либо явлений абстрактного или конкретного типа. При конструировании существенны объективные определенные отношения, которые поддаются описанию в соответствии с физическими или логическими законами [9]. Отношения связывают отдельные элементы в различные системы. Выражение «объект  $X$  находится в отношении  $R$  к объекту  $Y$ » символически обозначается  $R(X, Y)$ . Отношение может быть рефлексивным, симметричным или транзитивным. Эти типы отношений характеризуются следующим образом:

- а) рефлексивность – каждый объект эквивалентен самому себе;
- б) симметричность – если один объект эквивалентен второму, то второй объект эквивалентен первому;
- в) транзитивность – два объекта эквивалентны между собой, если они по отдельности эквивалентны третьему.

Если выполняются все три условия, то имеет место *отношение эквивалентности*. Отношение между двумя объектами также называется корреляцией. *Корреляция* – это математическая модель отношения в обобщённой форме.

Рассмотрим виды отношений.

*Подобие* – это отношение сходства между двумя или более системами (объектами, процессами, высказываниями), определяемое некоторыми общими свойствами. Вообще говоря, возможен диапазон степеней подобия от полного равенства (*идентичности*) до частного *сходства*. Можно говорить о функциональном, структурном и других видах подобия. Обычно подобие объектов понимается как одинаковость формы (но, как правило, не равенство по величине). Отношение подобия имеет большое значение при математическом и физическом моделировании. Законы подобия позволяют определить условия, при выполнении которых результаты модельных экспериментов справедливы для реальных условий. Область подобия может быть определена как пересечение множеств свойств, участвующих в данном отношении.

*Аналогия*. Соответствие существенных признаков, свойств, структур или функций объектов или явлений будем называть аналогией. Этот термин часто употребляется в том же смысле, что и подобие.

*Гомоморфизм*. Отношение между двумя системами, когда каждую составную часть и каждое отношение одной системы можно отобразить на некоторую составную часть и некоторое отношение второй системы (но не обратно), называется гомоморфизмом. В этом случае выполнение соответствующих условий подобия позволяет перенести результаты модельных экспериментов на натуру. Область подобия может быть определена как пересечение множеств свойств.

*Изоморфизм*. Изоморфизмом называется отношение между двумя системами, когда каждой составной части одной системы может быть поставлена в соответствие

определенная составная часть другой системы и наоборот (симметричность), а также когда для каждого отношения между двумя соответствующими составными частями имеется такое же отношение в другой системе и наоборот.

*Идентичность.* Это отношение между объектами или процессами, характеризующимися одинаковыми свойствами (признаками). При *абсолютной идентичности* должны быть одинаковыми все свойства, при *относительной* – только некоторые (в этом случае имеет место подобие).

*Эквивалентность.* Объекты или процессы называются эквивалентными, если между ними имеется отношение эквивалентности, т.е. равноценности. Эквивалентность полнее идентичности, так как для последней характерна только рефлексивность. Применительно к технике оба понятия используются как синонимы, т.е. под эквивалентностью подразумевается абсолютная идентичность.

*Математические функции.* Важный класс отношений выражают математические функции как закономерные зависимости от переменной:  $y = f(x)$ . Такого рода математические функции выражают точно установленное отношение между переменными  $x$  и  $y$ , т.е. детерминированную связь.

*Причинность.* Между причиной и вызванным ею действием существует асимметричное отношение. Причина вызывает действие. Существует строгая (детерминированная типа «если..., то...») или ослабленная форма причинного отношения. Причинная цепь имеет место, если действие выступает в качестве причины дальнейших действий.

*Связь.* Если определенные выходы элемента (системы) одновременно являются входами какого-либо элемента (системы), то такого рода отношения называются связью. Связь может быть прямой (последовательной либо параллельной), обратной или комбинированной (рисунок 2.17); она может быть материальной, энергетической или информационной.

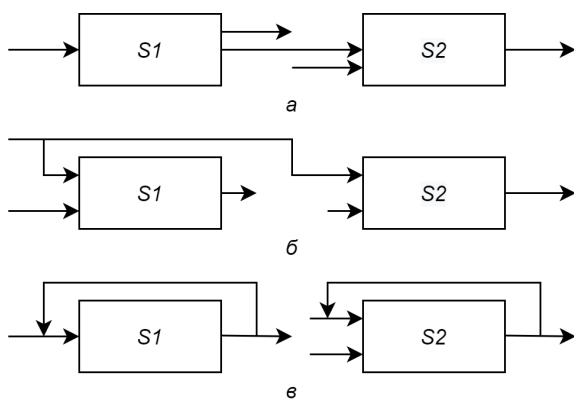


Рисунок 2.17 – Виды связей между системами:

*a* – последовательная; *б* – параллельная; *в* – обратная и комбинированная

*Отношение цель – средство.* Это двухместное асимметричное отношение между системой целей (назначением, задачей) и средством их реализации.

*Пространственное отношение.* Отношение такого рода характеризует взаимное положение элементов отношения в пространстве. Пространственные отношения изучаются в топологии.

*Логическое отношение.* Логическим отношением (двух- или многоместным предикатом) называется отношение между объектами типа « $l_1$  меньше, чем  $l_2$ » или « $l_3$  находится около  $l_4$ ». Известными константами (функторами) являются: И; ИЛИ; И-ИЛИ; НЕ-ИЛИ; ТАК, ЧТО; ИЛИ, ИЛИ; ЕСЛИ-ТО; ТОЛЬКО ЕСЛИ-ТО; ТОЛЬКО ТОГДА-КОГДА; РАВНО. Из этого перечня ясно, что многие описанные выше отношения являются также логическими отношениями. В ЭВМ реализация отношений такого рода осуществляется логическими элементами.

*Временное отношение.* Отношение такого рода описывает упорядочение процессов и событий во времени.

**Отношения между свойствами.** Рисунок 2.18 иллюстрирует отношения между свойствами в наглядной форме. Свойства и их общие отношения изучаются в естествознании и технике, где они выражаются либо формулами, либо словами. Для осуществления требуемого действия конкретной ТС общие отношения часто недостаточны. В случае сложных процессов общие отношения на практике всякий раз конкретизируют применительно к имеющимся условиям. Так, например, для распространения тепла имеются формулы его переноса теплопроводностью, излучением и конвекцией. Какие отношения имеют место, когда мы помещаем предмет в печь, и каков их относительный вклад? Для ответа на эти вопросы разработчик должен обладать опытом в данной области, чтобы верно оценить конкретные условия в рассматриваемой ситуации. Особенности производства можно затем учесть поправочными коэффициентами в общих формулах. Очень сложные отношения между свойствами выражают посредством матриц и математических символов.



Рисунок 2.18 – Определение отношений между свойствами

Важно оценить также отношения между категориями свойств. Известно, что у готового изделия внутренние элементарные свойства (конструктивные и технологические) являются определяющими для внешних свойств, которые в свою очередь обуславливают экономические свойства.

Связи между категориями свойств представляют чрезвычайную сложность отношений, которая ещё больше возрастает с учётом отношений в ТС на более низких уровнях.

**Установление свойств и их отношений.** Чтобы сравнить свойства ТС с требованиями, предъявляемыми к ним, или сравнить между собой различные системы и охарактеризовать их, следует определить свойства. Методы определения свойств ТС меняются в зависимости от стадии её существования, будь это концепция, изготовление или эксплуатация ТС.

Для определения свойств используются в основном следующие методы и приёмы:

- 1) измерения;
- 2) экспертные оценки;
- 3) моделирование;
- 4) вычисления или считывание;
- 5) сравнение;
- 6) определение оптимального уровня свойств.

## 2.5.2 Прослеживание требований

В контексте инженерии требований прослеживание (tracing) означает понимание того, как требования высокого уровня – целевые установки, задачи, цели, намерения, замыслы, стремления, ожидания, предположения, потребности – преобразуются в требования более низкого уровня. Следовательно, главное внимание необходимо уделять взаимосвязям между уровнями информации [3].

С точки зрения бизнеса в центре внимания могут оказаться следующие вопросы:

- как интерпретируется деловое представление;
- как достигаются деловые цели;
- как организованы бизнес и процессы.

С инженерной точки зрения наиболее важными представляются следующие вопросы:

- как удовлетворяются требования заинтересованных сторон;
- как структурируются требования к системе;
- как реализуются подсистемы;
- какие компоненты будут использоваться.

Прослеживание требований может дать ряд выгод и преимуществ:

*Рост уверенности в соответствии заданным целям.* Установление и формализация взаимосвязей дают возможность лучше осмыслить способы достижения установленных целей.

*Возможность оценки влияния изменений.* Если требования прослеживаются, то становятся возможными различные способы анализа влияния.

*Улучшение подотчетности со стороны подчинённых организаций.* Растет ясность в понимании того, каким образом поставщики вносят вклад в достижение общих целей.

*Возможность контролировать ход выполнения работ.* Известны трудности, возникающие при попытках количественно оценить прогресс, когда вся деятельность заключается в создании и переработке документов. Прослеживание процессов в их окружении позволяет получить объективную оценку развития работ, особенно на начальных стадиях.

*Возможность сохранять баланс между затратами и достигнутым эффектом.* Сопоставление компонентов продукции с установленными требованиями позволяет оценить соотношение между достигнутым эффектом и понесенными затратами.

Отношения прослеживаемости обычно выступают в форме «многие ко многим», то есть одно требование низкого уровня может быть связано с несколькими требованиями более высокого уровня, и наоборот. Простейший способ реализации прослеживания – установить связи между формулировкой требований на одном уровне с формулировками на другом уровне. Инструментальные средства инженерии требований обычно поддерживают такую операцию установки связи способом «перетаскивания» (drag-and-drop) между пунктами документов. Эти связи в некоторой степени похожи на гиперссылки на вебстраницах, но в идеале должны обеспечивать перемещение в обоих направлениях. На рисунке 2.19 показано прослеживание по вертикали по уровням требований и по горизонтали между требованиями и информацией, полученной в результате испытаний.

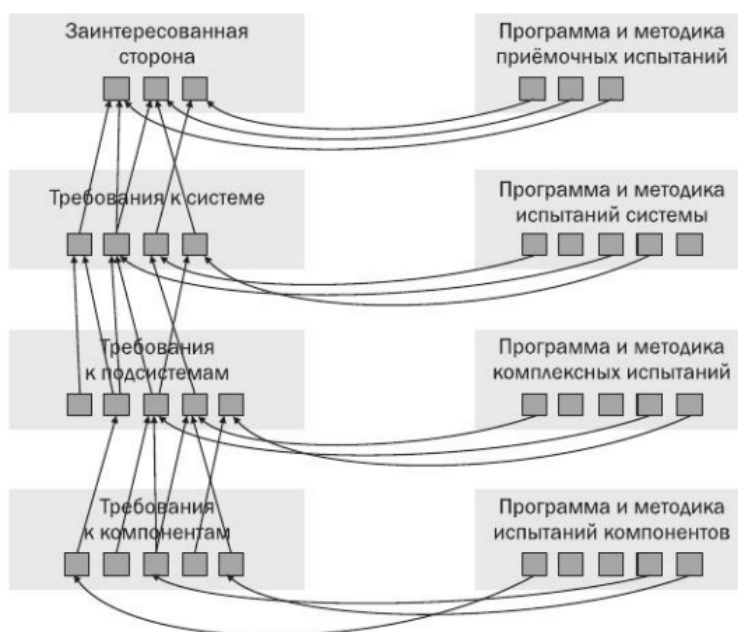


Рисунок 2.19 – Прослеживание требований

Направление стрелок определяется следующим правилом: стрелка всегда указывает на источник информации. Это правило принято по ряду причин:

- учет хронологии возникновения информации, так как связь всегда указывает на более старую информацию;

- учёт прав доступа, обусловленных тем, что одна сторона обычно является владельцем связей, исходящих из документа, а другая является владельцем только входящих связей.

Типы анализа прослеживаемости, которые могут использоваться для поддержки процессов инженерии требований, представлены в таблице 2.19.

Таблица 2.19 – Типы анализа прослеживаемости

Тип анализа	Описание	Поддерживаемые процессы
Анализ влияния	Исследование входящих связей с целью ответа на вопрос: «Что произойдет, если внести данное изменение?»	Управление изменениями
Анализ происхождения	Исследование исходящих связей с целью ответа на вопрос: «Зачем это нужно?»	Анализ соотношения затраты/достигнутый эффект
Анализ покрытия	Учет утверждений, которые имеют связи, с целью ответа на вопрос: «Все ли требования охвачены?». (Может использоваться как приблизительная мера развития работ, но одной этой характеристики недостаточно)	Общая инженерия. Управленческая отчетность

При выполнении анализа покрытия важно понимать, что учитываемые связи дают лишь малую часть общей картины. Наличие одной или нескольких связей еще не свидетельствует о том, что покрытие является надлежащим и полностью удовлетворительным, подобное свидетельство должно оставаться в компетенции технического анализа и инженерных расчетов.

При оценке качества прослеживания необходимо учитывать два показателя: достаточность и необходимость.

Анализ влияния используется для определения проектных решений, которые могут быть затронуты изменениями выделенного объекта (рисунок 2.20). Воздействие считается потенциально возможным; при необходимости точного определения природы и результатов воздействия необходим творческий анализ со стороны инженера.

Анализ происхождения выполняется в направлении, противоположном анализу влияния. Выбирается проектное решение низкого уровня – требование, элемент конструкции или тест, и выполняется операция прослеживания для определения требований более высокого уровня, которые породили данное проектное решение. Конструктивные элементы, для которых невозможно выполнить обратное прослеживание, являются потенциальными источниками дополнительных затрат без получения какой-либо пользы.

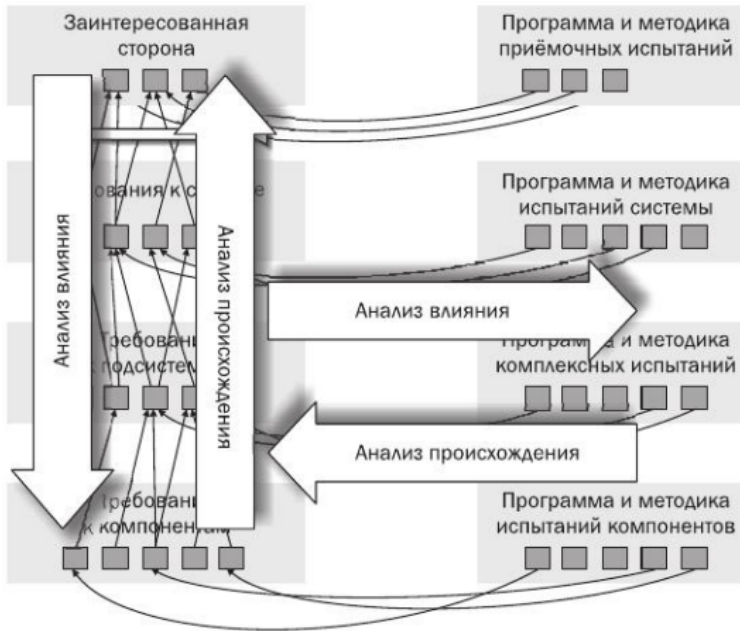


Рисунок 2.20 – Анализ влияния и анализ происхождения

Наконец, анализ покрытия используется для получения свидетельств, что все требования могут быть отслезены от верхнего уровня к более низким уровням и в результате испытаний возможно получение исчерпывающей информации о соответствии этим требованиям. Отсутствие какого-либо маршрута прослеживания явно свидетельствует о том, что рассматриваемое требование не будет выполнено или проверено. Разумеется, наличие связи не гарантирует, что рассматриваемое требование непременно будет выполнено. Для решения этой задачи вновь необходим творческий инженерный анализ.

Покрытие также может использоваться для количественной оценки развития работ: насколько далеко продвинулись системные инженеры в удовлетворении требований заинтересованных сторон. Предположим, что задача описания требований к системе, увязанных с требованиями заинтересованных сторон, возложена на некоторого инженера. По мере формализации требований к системе инженер в обратном направлении увязывает эти требования с соответствующими требованиями заинтересованных сторон. В процессе формализации требований прослеживание требует весьма незначительных дополнительных расходов, но гораздо труднее обеспечить прослеживание после того, как оба документа уже написаны.

На любом этапе решения задачи результаты работы инженеров могут быть измерены и выражены как доля требований заинтересованных сторон (в процентах), покрытие которых в настоящий момент обеспечено. Это очень полезное средство управления на начальных этапах разработки.

Похожий принцип может использоваться для оценки результатов при планировании испытаний. Для какой части требований на текущий момент полностью

определены процедуры проверки соответствия? Эти два измерения покрытия (охвата) отображены на рисунке 2.21.

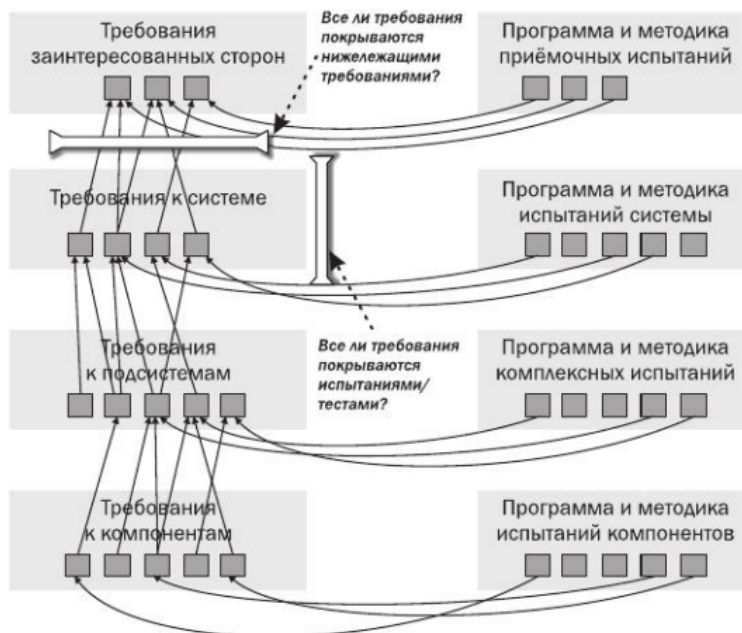


Рисунок 2.21 – Анализ покрытия (охвата)

Поскольку рассмотренные разновидности анализа могут быть выполнены всегда, прослеживание является базисной концепцией, лежащей в основе процесса инженерии требований.

**Простая прослеживаемость требований.** На рисунке 2.22 показан пример простой прослеживаемости. Требование пользователя прослеживается до трех соответствующих требований к системе в целом. Здесь текст требования пользователя можно видеть вместе с полным набором требований к системе, которые ему соответствуют. Наличие такой объединённой информации позволяет без затруднений контролировать прослеживаемость. На рисунке 2.23 показан второй пример.

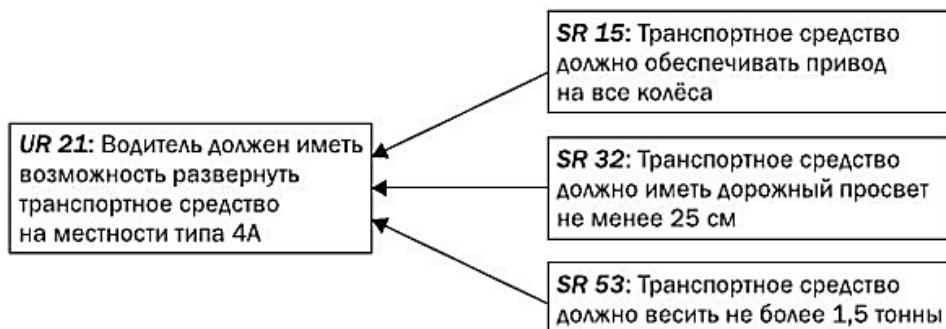


Рисунок 2.22 – Пример простой прослеживаемости: военное транспортное средство (UR – user requirements, SR – system requirements)



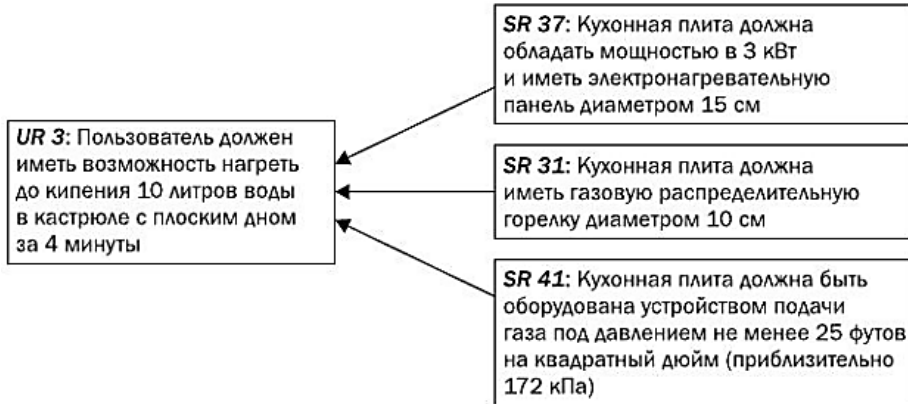


Рисунок 2.23 – Пример простой прослеживаемости: кухонная плита

**Доказательство выполнения требований.** Смысл примера на рисунке 2.22 заключается в том, что три требования к системе в той или иной степени достаточны для выполнения требований пользователя. Но тому, кто не является специалистом в данной области, трудно оценить правильность этого утверждения. Причина в том, что здесь не представлено его обоснование.

Для улучшения ситуации полезно представить доказательство выполнения (удовлетворения) для каждого требования пользователя. Простая прослеживаемость, демонстрируемая на рисунке 2.22, дает информацию только о том, что три требования к системе играют какую-то роль при доказательстве выполнения требований, но не содержит никаких сведений о том, в чем состоит это доказательство.

Расширенная прослеживаемость представляет собой способ получения доказательства выполнения требования. Обоснование выглядит как отдельный пункт, размещенный между требованием пользователя и соответствующими требованиями к системе (рисунок 2.24).

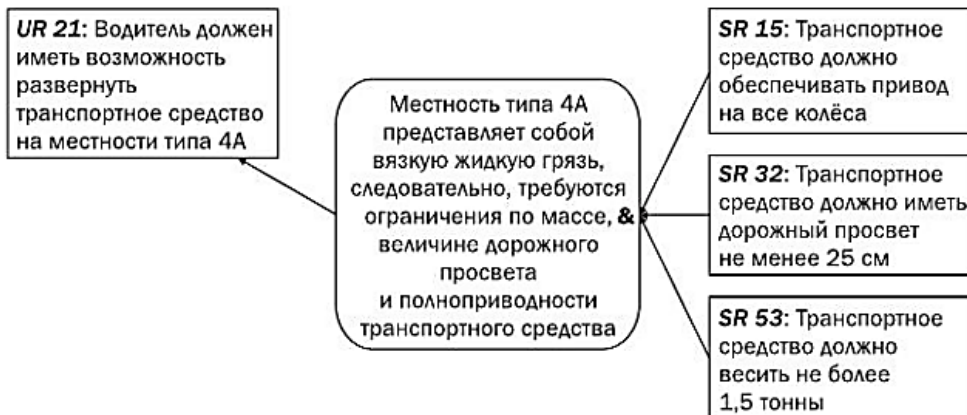


Рисунок 2.24 – Пример расширенной прослеживаемости: военное транспортное средство

Доказательство выполнения требования приводится не только в текстовом виде, существует также система специальных обозначений, определяющая способ взаимосвязи требований к системе и обоснования с использованием логических операторов:

- конъюнкция (&) означает, что все перечисленные требования к системе обязательно должны участвовать в доказательстве выполнения требования пользователя;
- дизъюнкция (or) означает, что любое требование к системе (одно из перечисленных) обязательно должно участвовать в доказательстве выполнения требования пользователя.

В примере с использованием дизъюнкции на рисунке 2.25 обоснование выполняется при наличии либо электронагревательной панели, либо газовой распределительной горелки, либо обоих устройств. Следует обратить внимание на два уровня в логической структуре обоснования.

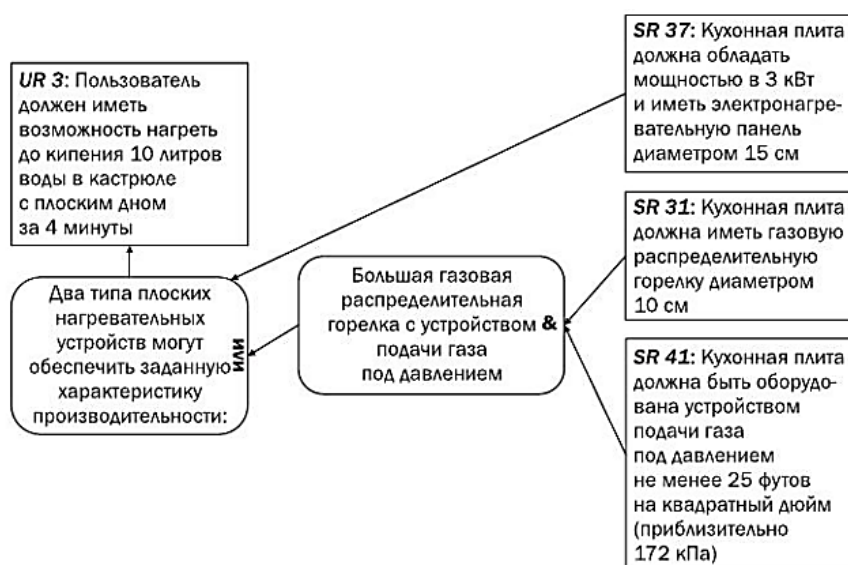


Рисунок 2.25 – Пример расширенной прослеживаемости: кухонная плита

Теперь предоставлено намного больше информации о том, как должны выполняться требования пользователя. Даже тот, кто не является специалистом в данной предметной области, получает возможность более или менее верной оценки важных аспектов обоснования требований. Текст позволяет оценить валидность и полноту логической составляющей обоснования. Оператор делает структуру обоснования более точной.

Особое внимание следует обратить на то, что на рисунке 2.23 невозможно понять, что набор требований к системе представляет альтернативные варианты решений, в то время как на рисунке 2.25 этот факт четко обозначен. При невозможности обеспечения плиты электронагревательным устройством сохраняется возможность выполнения требования с помощью газовой горелки.

Валидность доказательств выполнения требований может зависеть не только от требований более низкого уровня. На рисунке 2.26 показан пример использования

«знания предметной области» для поддержки обоснования. Знание предметной области – это факт или утверждение о реальном мире, при этом отсутствуют какие-либо внутренние или внешние факторы, ограничивающие возможное решение. Изображенное внутри параллелограмма описание, отражающее знание предметной области, является важной частью доказательства выполнения требования.

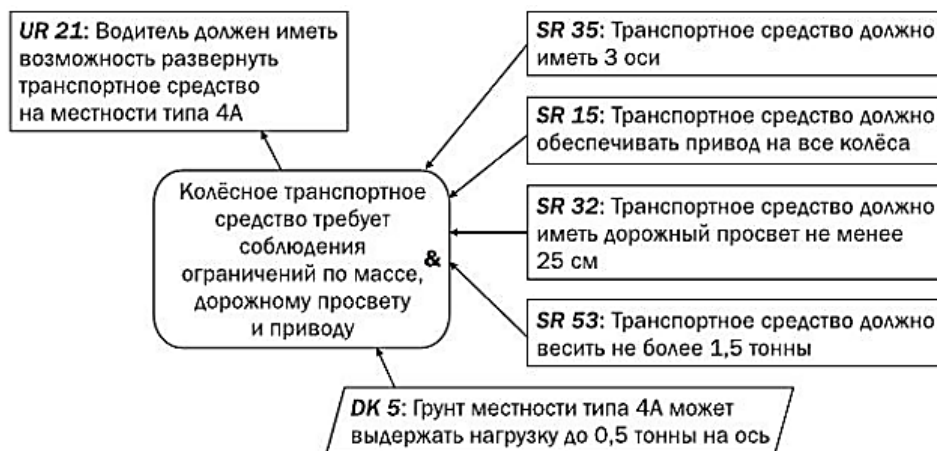


Рисунок 2.26 – Роль области знаний в обосновании требований

Сбор подобных утверждений является важной задачей хотя бы потому, что реальный мир и все возможные утверждения и представления о нем постоянно изменяются. Собрав факты и представления, можно выполнить анализ происхождения, чтобы понять воздействие изменяющихся представлений на способность системы соответствовать заданным требованиям.

---

*В качестве **примера** можно рассмотреть эпизод из жизни нью-йоркской подземки. Ряд аварий в 1970-е гг. произошёл из-за неверного представления о длине тормозного пути состава. Первоначально эта характеристика была определена правильно, но с годами поезда становились всё более тяжелыми, тормозной путь увеличивался, таким образом, утверждение стало ошибочным. Несмотря на то что программная система, управляющая сигнализацией, изначально работала правильно, она не совершенствовалась в дальнейшем, поэтому изменение исходных утверждений через некоторое время привело к нарушению соответствия требованиям.*

---

Документирование и контроль утверждений подобного рода становятся возможными благодаря эффективно организованной прослеживаемости.

Другой пример информации, не относящейся к требованиям, но играющей определённую роль в доказательствах их выполнения, можно получить при рассмотрении процессов моделирования. Доказательства выполнения требований часто выводятся на основе сложных операций моделирования, полное описание которых слишком

громоздко, чтобы фиксироваться в рамках анализа и обеспечения расширенной прослеживаемости.

На рисунке 2.27 показан пример, взятый из проекта железной дороги. В этом примере доказательство выполнения требования зависит от результатов, получаемых из сложной математической модели расписания с использованием специализированного программного обеспечения. Набор исходных предпосылок и требования к подсистемам выделяются с помощью инструментов моделирования, а полученные таким образом результаты документируются в структуре расширенной прослеживаемости. Ссылка на операцию моделирования показана в прямоугольнике с закругленными сторонами справа вверху.

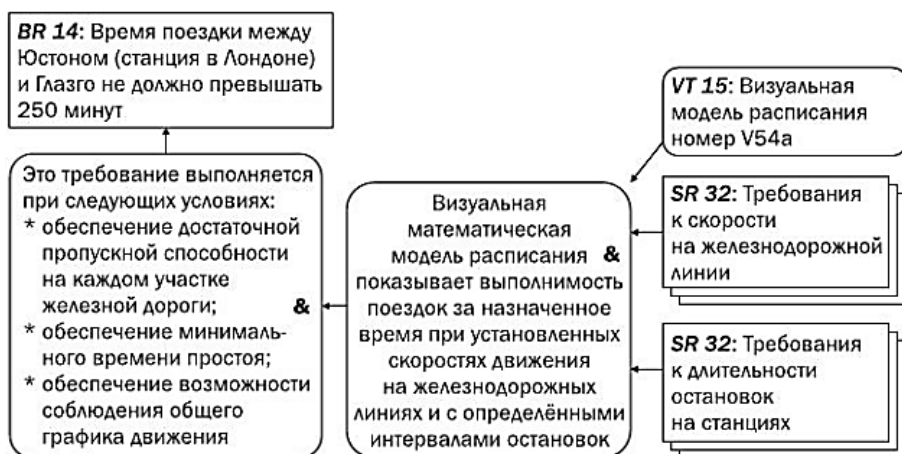


Рисунок 2.27 – Роль моделирования в обосновании требований

В рассматриваемом примере операции моделирования, требующие многократного повторения, выделяются в результате анализа влияния.

Разумеется, расширенная прослеживаемость может использоваться и в том случае, когда имеет место многоуровневая структура требований или целей. На рисунке 2.28 показаны три уровня требований и прослеживаемость между ними.

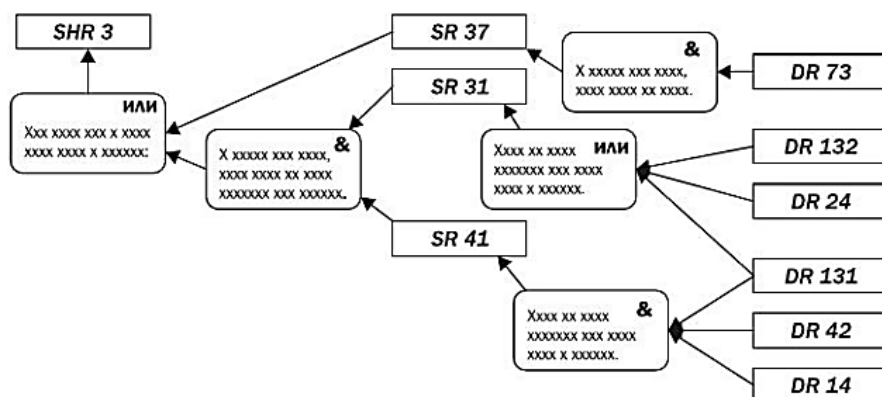


Рисунок 2.28 – Многоуровневая структура расширенной прослеживаемости

**Привязка требований.** Часто доказательство выполнения требования является простым только в привязке к одной или нескольким подсистемам или элементам. В этом случае говорят о привязке требований или о нисходящем потоке требований.

При использовании нисходящего потока требований процесс внесения изменений можно упростить. Изменения в требованиях верхнего уровня могут автоматически «спускаться» на более низкие уровни.

Простое развитие расширенной прослеживаемости позволяет охватить и подобные случаи. К операторам and и or, используемым для характеристики обоснований, добавляется ещё один, обозначающий идентичность. На рисунке 2.29 показан пример использования всех трех операторов. Символ « $\Leftrightarrow$ » означает идентичность.

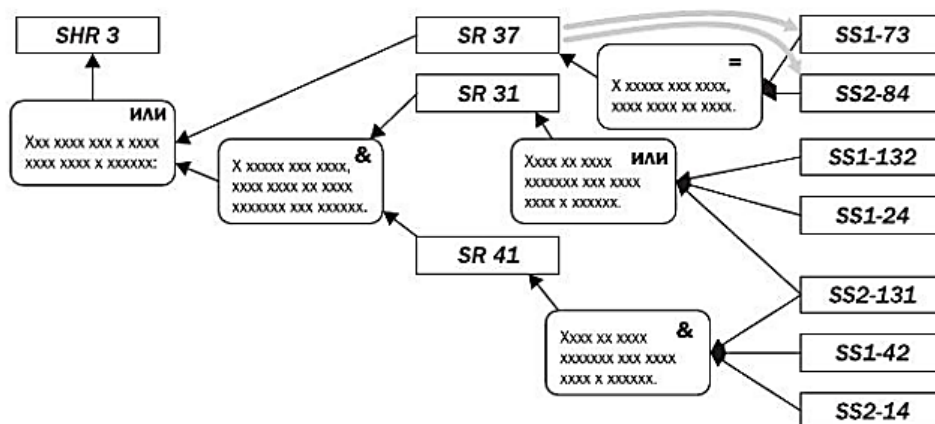


Рисунок 2.29 – Нисходящий поток требований с использованием оператора идентичности

**Метрики прослеживаемости.** Поскольку концепция прослеживаемости так важна в инженерии требований, нужно знать, какие метрики могут быть использованы применительно к нисходящему потоку требований.

Если сосредоточиться на связях «удовлетворяет/удовлетворяется» и продвигаться вниз по уровням требований, то можно обнаружить три заслуживающих внимания измерения прослеживаемости:

- широту (breadth) – насколько полно данная связь охватывает текущий уровень, а также вышележащие и нижележащие уровни;
- глубину (depth) – на скольких уровнях по направлению вниз (или вверх) действует данная связь;
- развитость (growth) – на сколько уровней по направлению вниз распространяется данная связь.

Чтобы правильно определить, какие именно аспекты этих характеристик являются значимыми для оценки процесса инженерии требований, необходимо различать два типа метрик:

- метрики этапа – измерения, относящиеся к отдельному этапу разработки, например только к уровню требований к системе в целом;

– глобальные метрики – измерения, охватывающие несколько этапов разработки.

*Широта* непосредственно связана с охватом или покрытием, поэтому она является метрикой этапа. Покрытие или охват может использоваться для измерения прогресса процессов, формирующих прослеживаемость на одном этапе. Здесь внимание сосредоточено на единственном уровне и измеряется степень покрытия, то есть количество требований, охваченных требованиями смежного уровня, лежащего выше или ниже (или соседнего уровня, если рассматривается процесс проверки соответствия).

*Глубина* определяет количество уровней, на которые распространяется прослеживаемость вверх или вниз, начиная с рассматриваемого уровня, то есть это глобальная метрика. Отдельное приложение может иметь отношение к определению источников требований самого нижнего уровня. Сколько всего требований к компоненту было фактически выведено из требований заинтересованных сторон и для какого количества этих требований источники определены где-то в проектном решении?

*Развитость* связана с потенциальным воздействием изменений. Для скольких требований на нижних уровнях установлены связи с одним требованием самого верхнего уровня?

Рассмотрим рисунок 2.30, на котором изображены четыре различные ситуации.

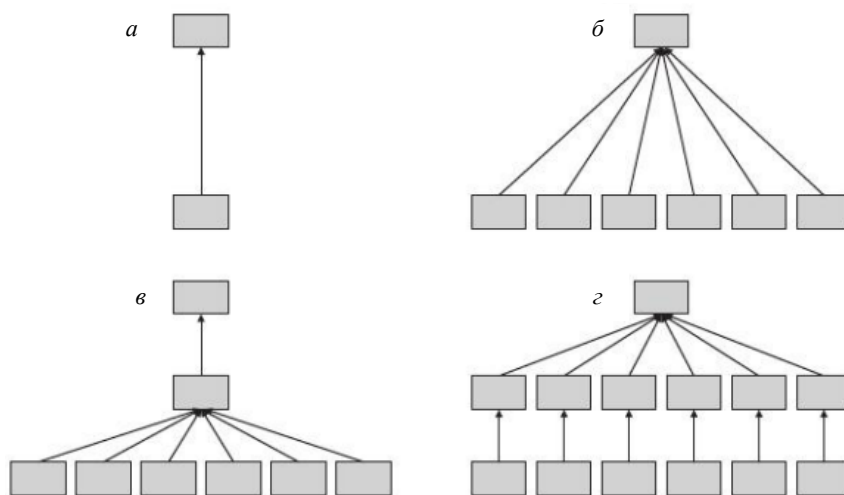


Рисунок 2.30 – Развитость прослеживаемости

На рисунке 2.30,*а* одно требование удовлетворяется единственным требованием более низкого уровня. Здесь фактор развитости равен 1. На рисунке 2.30,*б* одному требованию соответствует 6. Таким образом, фактор развития равен 6. Что можно сказать о различиях между этими двумя требованиями? Возможны следующие ответы:

– во втором случае требование может быть неудачно сформулировано, требуется декомпозиция на несколько требований;

– это требование по своей сущности более сложно, чем первое, следовательно, ему нужно уделить особое внимание;

– изменение требования во втором случае будет иметь большее воздействие, чем изменение требования в первом случае, поэтому второму требованию следует уделить особое внимание.

Разумеется, явный дисбаланс на одном уровне может непосредственно влиять на следующий более низкий уровень. Это показано на рисунках 2.30, *в* и *г*, где двумя уровнями ниже фактор развитости один и тот же. Какой вывод можно сделать на этом основании? Возможны следующие ответы:

– самое верхнее требование на рисунке 2.30, *в* размещено на слишком высоком уровне;

– средние требования на рисунке 2.30, *г* размещены на слишком низком уровне.

Ожидаемый фактор развитости требований между уровнями можно научиться оценивать только с приобретением значительного опыта в практической организации разработки систем конкретного типа. Но не менее полезным является умение проверять баланс развитости между требованиями как средство выявления ненужных требований или дисбаланса в применении процесса.

**Баланс.** Одно из назначений любой метрики состоит в наблюдении за распределением факторов развитости отдельных требований между двумя заданными уровнями и исследовании значений, лежащих во внешних областях, определяемых квантилями распределения. Цель – определить требования, обладающие чрезмерно высоким или чрезмерно низким фактором развитости, и провести их тщательное исследование.

На рисунке 2.31 показано, как может выглядеть типичное распределение значений фактора развитости. На рисунке значения фактора представлены в зависимости от количества требований, которым присуще это значение. Наибольшее количество требований расположено в интервале значений фактора от 2 до 6, лишь для некоторых фактор равен 1 или превышает 6. Это те самые вышеупомянутые требования, которые следует точно определить и уделить им особое внимание.

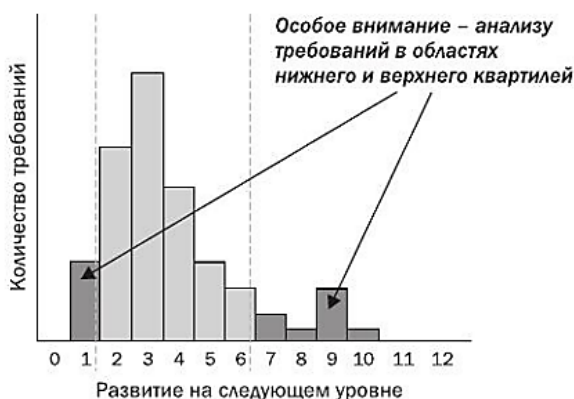


Рисунок 2.31 – Частотное распределение значений фактора развития требований

Обсудив проверку количества требований, вытекающих из требований более высокого уровня, рассмотрим противоположное направление: количество требований, входящих в требования более высокого уровня.

Помня о том, что прослеживаемость является связью типа «многие ко многим», рассмотрим рисунок 2.32. Два требования самого нижнего уровня связаны более чем с одним требованием вышележащего уровня. Что можно сказать об этих требованиях? Возможно, они более критичны, чем остальные, поскольку удовлетворяют нескольким требованиям, поэтому им следует уделить особое внимание.

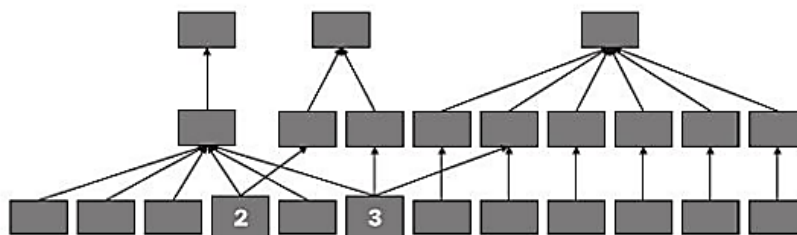


Рисунок 2.32 – Критичность требований

Распределение восходящей прослеживаемости можно использовать для обособления этих требований. На рисунке 2.33 показана типичная форма такого распределения.

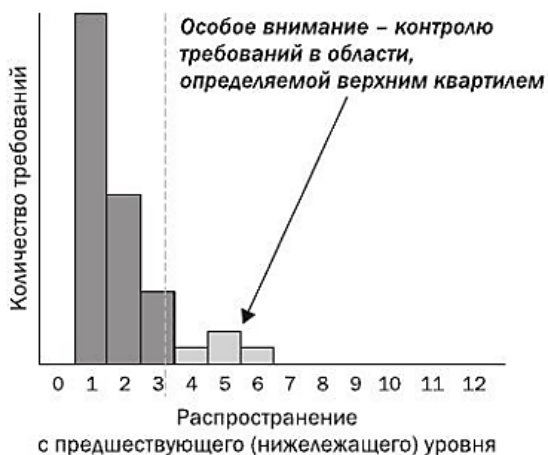


Рисунок 2.33 – Частотное распределение критичности требований

**Неявные изменения.** Возможно, управление изменениями является самым сложным процессом инженерии требований, позволяющим оценить потенциальное влияние изменений. При получении запроса на изменение одного требования все связанные с ним процессы прослеживания требования переходят в состояние «неопределенное» до тех пор, пока инженеры не определяют реального воздействия предложенного изменения.



Таким образом, единственный запрос на изменение может привести к целому каскаду потенциальных неявных (скрытых) изменений в системе в целом. При таких обстоятельствах крайне желательно проследить продвижение и выполнять тщательную оценку последующей работы.

На рисунке 2.34 показано, какое сложное воздействие может оказывать одно изменение. Запрос на изменение ориентирован на одно из требований самого верхнего уровня. На рисунке 2.34,а отображено потенциальное воздействие, исследуемое с помощью нисходящей прослеживаемости. Прямоугольники, помеченные белым кружком, подвержены воздействию изменения.

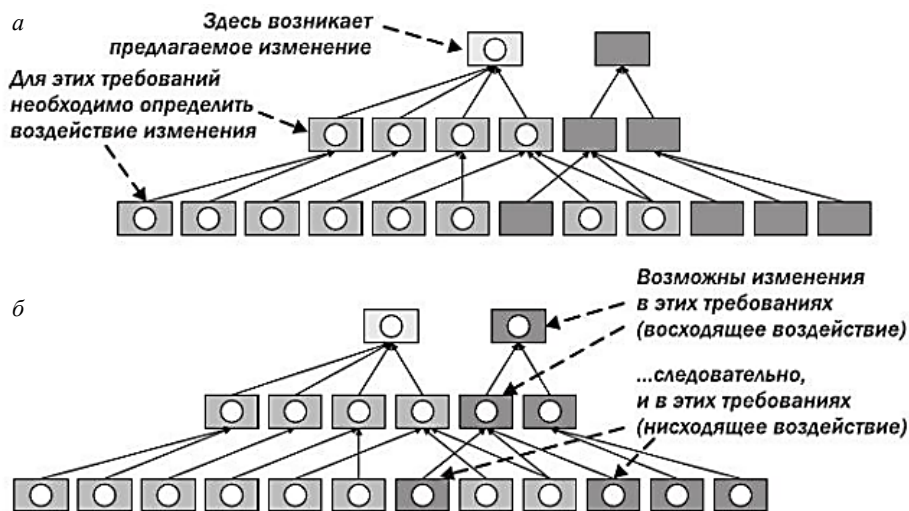


Рисунок 2.34 – Потенциальные изменения, возникающие вследствие запроса на изменение

На рисунке 2,34,б рассматривается восходящее воздействие потенциального изменения. Такая ситуация возникает, когда некоторое требование низкого уровня соответствует двум требованиям более высокого уровня. Здесь необходимо проследить восходящее воздействие запрашиваемых изменений, потому что изменения требований более низкого уровня могут привести к пересмотру согласования требований на более высоком уровне. В результате запрошенное изменение воздействует на все требования любых уровней.

Разумеется, поскольку инженеры определяют действительное воздействие, они могут обнаружить, что некоторые требования фактически не подвержены какому-либо воздействию со стороны запрашиваемого изменения, и вышеописанный каскад потенциальных изменений может быть сокращен, иногда весьма существенно.

Воздействие изменения может быть приблизительно оценено в количестве требований, остающихся в неопределенном состоянии. При запросе на изменение все прочие требования, прослеживаемые по восходящей и нисходящей, помечаются как неопределенные. В дальнейшем количество неопределенных требований будет постоянно уменьшаться по мере оценки каждого из них, состояние их восстанов-

ливаться, возможно даже каскадное восстановление состояния группы взаимосвязанных требований. Таким образом, величина остаточного воздействия изменения в системе в целом будет возрастать до максимума при внесении каждого нового изменения и постепенно снижаться (рисунок 2.35).



Рисунок 2.35 – Обработка запросов на изменения

При обсуждении процесса внесения изменений предполагалось, что изменение распространяется от требования к требованию только по существующему набору связей. Но изменение требования может привести к необходимости добавления или удаления прослеживаемой связи. За изменениями в связях должны непременно следовать изменения соответствующих требований на обоих концах связей.

### 2.5.3 Анализ функционирования и проектирование

В результате быстрого развития современных технологий требования к показателям функционирования новой системы, разрабатываемой для замены устаревшей, неизбежно будут превышать прежние. Более того, чтобы новая система могла долго и полезно служить в условиях, когда возможности конкурирующих или противостоящих систем неуклонно растут, при формировании требований следует задавать показатели, которые превышают текущие потребности. И хотя на этапе выбора концепции излишне рискованные подходы надо бы отклонять, такие требования вынуждают применять передовые разработки, а значит, включать в систему некоторые передовые элементы [15].

Для повышения показателей функционирования системы часто требуется заметно увеличивать сложность компонентов, как это имеет место во многих современных автоматизированных системах на базе компьютеров. Последствия расширения возможностей зачастую нельзя надёжно рассчитать с помощью аналитических методов или имитационного моделирования, поэтому их приходится определять

экспериментально. Элементы системы, характеризуемые динамическим поведением с обратной связью, можно проанализировать на имитационной модели, но обычно для надежной инженерно-технической разработки требуется сконструировать и испытать экспериментальную модель.

Типичный пример, когда для описания функционирования системы может понадобиться соответствующая разработка, – неполное понимание потребностей пользователя и окружения, как это часто бывает в системах поддержки принятия решений и других сложных автоматизированных системах. В таких случаях единственный выход (особенно если речь идет о пользовательских интерфейсах) состоит в создании прототипов, соответствующих критическим элементам системы, и проверке их пригодности опытным путем.

Наиболее часто специальная разработка требуется для компонентов трех типов:

- 1) компонентов, показатели функционирования которых должны значительно превышать ранее продемонстрированные пределы;
- 2) компонентов, которые должны выполнять особо сложные функции;
- 3) компонентов, взаимодействие которых со средой недостаточно хорошо изучено.

Выявление элементов системы (компонентов и подсистем), для которых показатели функционирования должны превышать ранее достигнутые пределы, можно проиллюстрировать на примере функциональных составных частей системы (таблица 2.10).

Таблица 2.10 – Функциональные элементы системы

Функция класса	Функция элемента	Применение
<i>Обращение с сигналом</i> – генерация, передача, распределение и прием сигналов для использования при активном или пассивном приеме и в средствах связи	Ввод сигнала Передача сигнала Преобразование сигнала Прием сигнала Обработка сигнала Формирование выходного сигнала	Телевизионная камера Радиопередатчик с ЧМ Радиолокационная антенна Радиоприемник Устройство обработки изображений
<i>Обращение с данными</i> – анализ, интерпретация, структурирование, запрос и/или преобразование данных и информации к видам, необходимым другим системам или пользователю	Ввод данных Обработка данных Управление данными Обработка данных Хранение данных Вывод данных Отображение данных	Клавиатура Процессор компьютера Операционная система Текстовый процессор Принтер
<i>Обращение с веществом</i> – формирование структурной основы или корпуса системы, а также изменение формы, состава или положения материальной субстанции	Конструкционный материал Хранение материалов Вступление материалов в реакцию Придание материалу формы Соединение материалов Контроль позиционирования	Планер самолета Грузовой контейнер Автоклав Фрезерный станок Сварочный аппарат Сервопривод

## Окончание таблицы 2.10

Функция класса	Функция элемента	Применение
<i>Обращение с энергией</i> – обеспечение системы энергией или движущей силой, преобразование энергии из одного вида в другой	Генерация тяги Генерация крутящего момента Генерация электричества Поддержание температуры Контроль движения	Турбореактивный двигатель Поршневой двигатель Солнечная батарея Холодильник Автоматическая коробка передач

В таблице перечислены основные функциональные элементы, разбитые на четыре класса: сигналы, данные, материалы и энергия. У каждого функционального элемента есть ряд ключевых характеристик, определяющих его функциональные возможности. У большинства характеристик имеются пределы, обусловленные физическими свойствами лежащих в их основе технологий и зачастую фундаментальными зависимостями между функциями (например, скоростью и точностью) [15]. Если для выполнения какого-то функционального требования к новой системе характеристики элемента системы должны быть выше, чем ранее достигнутые, значит, может возникнуть необходимость либо в разработке компонента, либо в изменении требования.

Для иллюстрации такого рода сравнений в таблице 2.11 перечислены функциональные элементы и характеристики, которые чаще всего оказываются критичными в новых системах. В таблице показано применение подхода системной инженерии к анализу функциональных требований к системе и определению целей разработки.

Таблица 2.11 – Избранные критические характеристики функциональных элементов системы

Функциональные элементы	Критические характеристики
Подать сигнал	Точность и скорость
Передать сигнал	Высокая мощность, сложная форма сигнала
Преобразовать сигнал	Коэффициент усиления, диаграмма направленности, многоэлементность
Получить сигнал	Чувствительность и динамический диапазон
Обработать сигнал	Пропуская способность, точность и скорость
Выдать сигнал	Разрешающая способность и гибкость
Ввести данные	Точность и скорость
Обработать данные	Гибкость и скорость
Управлять данными	Способность адаптации к пользователю и гибкость
Управлять обработкой	Архитектура, логика и сложность
Сохранить данные	Пропускная способность и скорость доступа
Вывести данные	Гибкость
Отобразить данные	Разрешающая способность
Служить опорой материалу	Прочность и гибкость
Хранить материал	Емкость и возможность загрузки и выгрузки
Реагировать с материалом	Емкость и управление
Придать форму материалу	Емкость, точность и скорость

## Окончание таблицы 2.11

Функциональные элементы	Критические характеристики
Соединить материалы	Емкость, точность и скорость
Управлять положением	Разрешающая способность, точность и скорость
Генерировать тягу	Мощность, эффективность и безопасность
Генерировать крутящий момент	Мощность, эффективность и управление
Генерировать электроэнергию	Мощность, эффективность и управление
Управлять температурой	Разрешающая способность и диапазон
Управлять движением	Разрешающая способность, точность и время реакции

При использовании составных частей системы для выявления функциональных элементов, требующих разработки, первым делом нужно соотнести каждый элемент системы с функционально эквивалентным ему обобщенным элементом, а затем сравнить требуемый уровень показателя функционирования с уровнем того же показателя для соответствующего физического компонента, возможности которого были продемонстрированы в существующих системах.

Установив приблизительное соответствие, нужно проверить, какие различия между требуемыми и существующими элементами можно оценить количественно, пользуясь известными формулами, и тем самым привести убедительные аргументы в пользу того, что новый элемент удастся успешно разработать, применив известные технические приемы к элементу с продемонстрированными на практике характеристиками. Если такие аргументы получить не удастся, то необходимо понизить требование к показателю.

## 2.6 Оформление и представление требований к объекту проектирования

Формулировка требований – это один из самых важных этапов проектной деятельности, а требования – это условие проектной задачи. Следовательно, чем точнее, полнее и понятнее для всех участников проекта изначально они сформулированы, тем легче, быстрее, эффективнее и надежнее будет получено решение проектной задачи.

Не менее важным условием является представление совокупности требований к объекту проектирования в определенном виде. Стандартной формой представления требований, выдвигаемых к объекту проектирования, является техническое задание.

Техническое задание – это первый и весьма важный документ для проектирования ТС с разработкой соответствующей документации, предназначенный для определения цели проектирования и обоснования направления поиска. Он разрабатывается всегда независимо от стадии разработки. Содержание, общий порядок разработки, согласования и утверждения ТЗ устанавливает ГОСТ 15.016-2016.

Исходное задание выдаётся заказчиком и оформляется в виде технических требований. Как было сказано выше, в качестве заказчика может выступать частное

лицо или организация. Основной причиной, заставляющей заказчика обратиться к разработчику, является отсутствие у заказчика соответствующих специальных знаний либо ограниченность его ресурсов (нехватка времени на решение задачи, необходимого количества людей, оборудования) [7].

ТТ может быть четко определено, например, когда всю работу ведет один человек, либо оно выдано авторитетным специалистом, либо не может быть подвергнуто сомнению (госзаказ). Но чаще оно формулируется в общих чертах на языке потребителя-неспециалиста, далёком от языка разработчика и терминов предметной области, и не всегда бывает технически четким и исчерпывающим. Неопределенные или, как их называют, туманные требования вызывают неуверенность у всех участников работ (разработчика, изготовителя, продавца, эксперта и потребителя), так как допускают различную интерпретацию требований и не позволяют объективно оценить качество разработанного изделия. Также разработчик должен понимать, что заказчик может не знать (или знать частично) специальных требований, однако это не снимает с разработчика ответственности и обязательности выполнения требований надзорных органов независимо от их наличия в ТТ.

Перевести технические требования на язык предметной области, сформулировать задачу максимально полно и грамотно, обосновать необходимость её решения, т.е. сформулировать ТЗ, – первый и обязательный этап работы. Поэтому естественно, что решение задачи начинается с её осмысления и уточнения исходных данных. Разработчик выполняет это в тесном контакте с заказчиком.

Статистика проектной деятельности показывает, что если стоимость исправления проектной ошибки, допущенной на этапе технического проектирования, принять за 1 у.е., то стоимость её исправления возрастает в 10, 100 и 1000 раз, если ошибка была допущена соответственно на этапах эскизного проектирования, технического предложения и формулировки ТЗ.

В общем виде ТЗ на разрабатываемый объект должно содержать перечень выполняемых этим объектом функций и список предъявляемых к нему требований. В ТЗ включают перечень и значения прогнозируемых параметров с отражением уровня стандартизации и унификации; параметров, характеризующих научно-технический уровень (патентную чистоту) и качество изделия с учётом полного удовлетворения целевого назначения; стоимость его разработки. В ТЗ входят следующие основные разделы:

- наименование и область применения;
- основание для разработки;
- цель, назначение и источник разработки;
- технические требования;
- условия эксплуатации,
- экономические показатели,
- стадии и этапы разработки,
- порядок контроля и приёмки,
- приложения.

Составляется ТЗ на основе результатов научно-исследовательских и экспериментальных работ, научного прогнозирования, анализа передовых достижений отечественной и зарубежной промышленности.

Составление ТЗ – сложная и ответственная задача: многие данные ещё не известны, но то, как задание будет составлено, способно облегчить или затруднить последующее проектирование. Специалисты считают, что грамотно сформулированное ТЗ – это более 50% успеха в решении задачи, а время, затраченное на подготовку ТЗ, – одно из лучших вложений, которые фирма может сделать в период проектирования. Неслучайно составление ТЗ поручается ведущим специалистам – главным конструкторам, руководителям проектов и т.п.

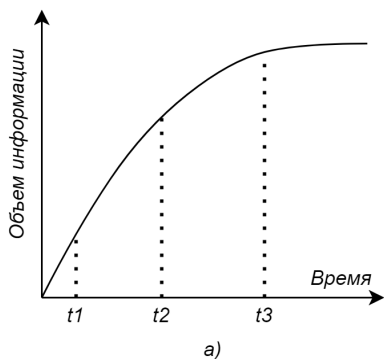
С другой стороны, стоит в обобщенном смысле принимать во внимание слова Ли Якокки [16]: «...Беда в том, что ты учился в Гарварде, где тебе вбили в голову, что нельзя предпринимать никаких действий, пока не соберешь все факты. У тебя 95% информации, а для того, чтобы собрать недостающие 5%, тебе понадобится еще шесть месяцев. За это время все факты устареют, потому что рынок развивается гораздо быстрее. Самое главное в жизни – всё сделать вовремя.

...Главная задача состоит в том, чтобы собрать все важные факты и точки зрения, которые вам доступны. Но в какой-то момент надо начинать действовать решительно. Во-первых, потому что даже самое правильное решение оказывается

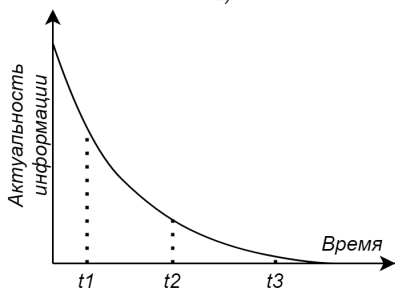
неверным, если оно принято слишком поздно. Во-вторых, потому что в большинстве случаев не существует такой вещи, как полная уверенность. Вам никогда не удастся собрать все 100% информации. К сожалению, жизнь не будет ждать, пока вы оцените все возможные просчеты и потери. Иногда надо просто двинуться вперед наудачу и исправлять ошибки по ходу движения».

Слова Ли Якокки наглядно демонстрируют графики зависимостей объема и актуальности информации от времени, приведенные на рисунке 2.36.

В ТЗ заказчик должен перечислить все основные данные, определяющие разработку ТС и обеспечивающие достижение поставленной цели. Важно иметь в виду, что формулировка задания должна представлять собой не свод правил для разработчика, а скорее памятку, помогающую направить усилия на достижение поставленной цели. Поскольку на этом этапе проектант должен уметь творчески мыслить, охватывая все этапы работы над объектом, то он может подвергнуть сомнению поставленную цель, пересмотреть её или даже отказаться от проекта.



а)



б)

Рисунок 2.36 – Зависимость от времени объема информации, необходимой для решения задачи (а), и актуальности информации (б)

ТЗ включает выполнение ряда этапов. Неопределённость, свойственная этой работе, вызывает прохождение их по несколько раз, итерационно, от более общей постановки задачи к детальной её проработке.

Таким образом, начинающему проектировщику необходимо научиться осуществлять постановку задачи в виде сформулированных требований к объекту проектирования и представлять эти требования в виде стандартного документа – технического задания.

Перечень шагов по выявлению и формулировке требований может быть представлен следующим образом [17].

1. Определить ожидания заинтересованных сторон.
2. Определить ограничения проекта и предприятия.
3. Определить внешние ограничения.
4. Определить эксплуатационные сценарии.
5. Определить меры (количественные критерии) эффективности.
6. Определить границы системы.
7. Определить внешние интерфейсы.
8. Определить окружение среды эксплуатации.
9. Определить концепции процесса жизненного цикла.
10. Определить функциональные требования.
11. Определить требования к характеристикам.
12. Определить режимы работы.
13. Определить технические показатели эффективности.
14. Определить конструктивные характеристики.
15. Определить человеческие факторы.
16. Установить базовый уровень требований.
17. Оформить требования по стандарту.

## Выводы

1. Требования к объекту проектирования – это желаемые характеристики (свойства) будущего изделия и их значения и/или диапазоны значений.

2. Работа с требованиями является основополагающим компонентом любой инженерной деятельности.

3. Инженерия требований (requirements engineering) – это подраздел системной инженерии, занимающийся выявлением, разработкой, прослеживанием, анализом, проверкой соответствия, установлением взаимосвязей и управлением требованиями, которые определяют систему на последовательных уровнях абстракции.

4. Инженерия требований, являясь жизненно важной частью процесса системной инженерии, сосредоточена в первую очередь на определении предметной области и описании проблем, а также на их увязке со всей последующей информацией, касающейся разработки.

5. Причины неудачи проектов чаще всего объясняются неполнотой требований.



6. Одна из наиболее часто допускаемых ошибок состоит в том, что инженерии требований считают обособленным этапом, который осуществляется и завершается на начальной стадии разработки продукции.

7. Требования существуют на каждом из иерархических уровней: перечень потребностей, требования заинтересованных сторон, требования к системе в целом, требования к подсистемам, требования к элементам подсистем.

8. Требования, порожденные одним процессом, становятся исходными требованиями для другого процесса.

9. При формулировании требований к объекту проектирования необходимо принимать во внимание особенности эволюции потребностей заинтересованных сторон, законы и закономерности развития технических систем на всех уровнях иерархии ЭРЭС, специфику стадий жизненного цикла технических систем и уровней иерархии их описаний.

10. Одним из базовых механизмов структурирования при обсуждении требований к возможностям ТС является сценарий её функционирования или использования. Этот сценарий порождает структуру, которая иерархически упорядочена во времени.

11. Смысл принципиальной основы выбора ключевых требований заключается в том, что, проектируя систему, нужно думать не о том, что может быть реализовано или пригодиться, а о том, без чего пользователь не сможет обойтись. При таком подходе ключевыми становятся только совершенно необходимые, обязательные требования.

12. Насколько это возможно, каждое ключевое требование должно быть выражено в количественной форме с помощью показателей, связанных с функциональными характеристиками системы.

13. Целесообразно вести проектирование в два этапа. На первом этапе определяют параметры, обеспечивающие заданные характеристики объекта. На втором этапе улучшают конструкцию по отдельным характеристикам или по одной характеристике, принятой за критерий оптимальности.

14. Для каждого сформулированного требования должен существовать способ подтверждения его выполнимости в результате проектирования ТО.

15. Расширенная прослеживаемость позволяет повысить уверенность в том, что требования удовлетворены. В основе этой уверенности лежит установленный порядок сбора и определения обоснований, связанных с прослеживаемостью.

16. Прослеживаемость является богатым источником метрик для численных оценок процесса. Фактически, это формализация связей в процессе прослеживаемости и связанных с ней процессов, которая делает возможными подобные измерения.

17. Техническое задание – это первый и весьма важный технический документ для проектирования ТС с разработкой соответствующей документации, предназначенный для определения цели проектирования и обоснования направления поиска.

18. ТЗ составляется на основе результатов научно-исследовательских и экспериментальных работ, научного прогнозирования, анализа передовых достижений отечественной и зарубежной промышленности.

## Контрольные вопросы

1. Как осуществляется постановка задачи формулирования требований к объекту проектирования?
2. Что такое инженерия требований?
3. Каковы требования, формулируемые к требованиям?
4. Как соотносятся требования и жизненный цикл технической системы?
5. В чем специфика формулировки требований с позиции эволюции потребностей стейкхолдеров?
6. В чем специфика формулировки требований с позиции законов развития технических систем?
7. В чем специфика формулировки требований с позиций участников стадий жизненного цикла технических систем?
8. В чем специфика формулировки требований с позиции уровней иерархии описания технической системы?
9. По каким основаниям осуществляется классификация требований?
10. Что такое свойство технической системы?
11. Как связаны понятия «свойство» и «признак» объекта?
12. Как соотносятся понятия «свойства», «характеристики» и «требования» для объекта?
13. Что такое категории свойств технической системы?
14. Как расшифровывается аббревиатура KPI?
15. Как расшифровывается аббревиатура KUR?
16. Как соотносятся недостатки технического объекта с требованиями к его модернизированной версии?
17. Что такое прослеживаемость требований?
18. В какой форме представляются требования к объекту проектирования?
19. Каковы критерии обоснования достижимости технических требований?
20. Как связаны понятия «технические характеристики» изделия и «технические требования» к объекту проектирования?

## Упражнения

1. Сформулируйте общие требования к объекту проектирования с позиций участников разных этапов и стадий жизненного цикла технической системы (не менее 10 требований по каждой позиции): исследователя, системотехника, схемотехника, программиста, конструктора, технолога, специалиста по эксплуатации, специалиста по утилизации технического объекта.
2. Выберите из приложения 4 ЭРЭС и разработайте ТЗ на его проектирование. Докажите выполнимость каждого технического требования для конкретного ЭРЭС.
3. Выберите одно из требований на рисунке 2.16, проведите исследование и выясните, как обосновать выполнимость этого требования.

4. Опишите свойства интересующего вас объекта искусственного или естественного происхождения и проведите их классификацию.

5. Используя метод интервью, проведите опрос своих близких, друзей и сокурсников, насколько их требования к бытовой технике удовлетворяются конкретными моделями используемых ими технических средств.

6. Учитывая специфику эволюции потребностей стейкхолдеров, спрогнозируйте эволюцию требований к ноутбуку, мобильному телефону, телевизору, mp3-плееру, беспроводным наушникам, домашней стереосистеме.

7. Учитывая законы развития технических систем, спрогнозируйте эволюцию свойств и технических характеристик радиотелефона, банкомата, игровой приставки, гитарной приставки «Overdrive», «умных» электронных часов, роботыпылесоса, автомобильного парковочного радара, системы GPS.

8. Проведите классификацию свойств технических систем.

9. Придумайте и сформулируйте несколько новых или несуществующих, но полезных для пользователя свойств технических систем.

10. Выявите несколько вредных свойств технических объектов, которыми вы регулярно пользуетесь, и предложите способы их устранения.

11. Приведите к категориям свойств основные вопросы и примеры.

12. Сформулируйте не менее 10 общих вопросов о проектируемой технической системе с точки зрения разных заинтересованных сторон.

13. Приведите примеры каждого ЗРТС к разным РЭС. Проследите исторический путь развития конкретных классов РЭС.

14. Постройте генеалогическое дерево развития радиоприемников, начиная с первой разработки и заканчивая настоящим временем, и сопроводите краткой справкой по истории развития данного типа устройств. Проследите за эволюцией используемых физических принципов действия, технических решений и параметров (технических характеристик). Для этого используйте схему на рисунке 1.16. Подберите фотографии представителей каждого поколения радиоприемных устройств и оформите по аналогии с рисунком 1.10. Результаты зафиксируйте в дос-файле и выступите с докладом на семинаре.

15. Постройте генеалогическое дерево развития радиопередатчиков, начиная с первой разработки и заканчивая настоящим временем, и сопроводите краткой справкой по истории развития данного типа устройств. Проследите за эволюцией используемых физических принципов действия, технических решений и параметров (технических характеристик). Для этого используйте схему на рисунке 1.16. Подберите фотографии представителей каждого поколения радиопередающих устройств и оформите по аналогии с рисунком 1.10. Результаты зафиксируйте в дос-файле и выступите с докладом на семинаре.

16. Постройте генеалогическую линию развития электронных вычислительных машин (ЭВМ), начиная с первой разработки и заканчивая современными компьютерами и вычислительными системами, и сопроводите краткой справкой по истории развития данного типа устройств. Проследите за эволюцией используемых физических принципов действия, технических решений и параметров (технических харак-

теристик). Для этого используйте схему на рисунке 1.16. Подберите фотографии представителей каждого поколения ЭВМ и оформите по аналогии с рисунком 1.10. Результаты зафиксируйте в doc-файле и выступите с докладом на семинаре.

17. Постройте генеалогическую линию развития телефонов, начиная с первой разработки и заканчивая настоящим временем, и сопроводите краткой справкой по истории развития данного типа устройств. Проследите за эволюцией используемых физических принципов действия, технических решений и параметров (технических характеристик). Для этого используйте схему на рисунке 1.16. Подберите фотографии представителей каждого поколения телефонных аппаратов и оформите по аналогии с рисунком 1.10. Результаты зафиксируйте в doc-файле и выступите с докладом на семинаре.

18. Выберите ЭРЭС. Задайте условия его эксплуатации. Назовите 2–3 главных параметра, определяемых этими условиями. Свой выбор обоснуйте (например, в условиях длительного и автономного существования РЭС, устанавливаемых на автономных глубоководных аппаратах, главным параметром будет энергопотребление и КПД).

19. Выявите недостатки своих гаджетов и сформулируйте требования к превосходящим их по этим параметрам прототипам.

20. Проанализируйте сценарии использования технических средств из следующего списка:

- мобильный телефон;
- телевизор;
- радиоприемник;
- фотоаппарат;
- видеокамера;
- радиолокатор;
- приемник GPS;
- дозиметр;
- радиомаяк;
- робопылесос;
- аудиоплеер;
- акустическая система;
- электронные весы;
- рация;
- автомобильная сигнализация;
- монитор компьютера;
- ноутбук;
- стиральная машина.

Как можно усовершенствовать сценарий использования в каждом случае?

## Рекомендуемая литература

1. Мизгулин В. Системный инженер. Как начать карьеру в новом технологическом укладе / В. Мизгулин. – ЛитРес: Издательские решения, 2017. – 109 с.
2. Акоф Р. Основы исследования операций / Р. Акоф, М. Сасиени ; пер. с англ. В.Я. Алтаева ; под ред. И.А. Ушакова. – М. : Мир, 1971. – 532 с.
3. Быков В.В. Исследовательское проектирование в машиностроении / В.В. Быков, В.П. Быков. – М. : Машиностроение, 2011. – 256 с.
4. Новиков А.М. Методология / А.М. Новиков, Д.А. Новиков. – М. : Синтег, 2007. – 668 с.
5. Меерович М.И. Теории решения изобретательских задач / М.И. Меерович, Л.И. Шрагина. – Минск : Харвест, 2003. – 428 с. (Библиотека практической психологии.)
6. Шпаковский Н.А. ОТСМ-ТРИЗ: подходы и практика применения : учеб. пособие / Н.А. Шпаковский. – М. : ИНФРА-М, 2020. – 504 с.
7. Зангер Г. Электронные системы: теория и применение / Г. Зангер ; пер. с англ. Е.А. Афанасьевой, В.Л. Саввина, О.А. Соболевой ; под ред. М.Д. Карасева. – М. : Мир, 1980. – 392 с.
8. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры : учеб. для вузов / К.И. Билибин, А.И. Власов, Л.В. Журавлева [и др.] ; под общ. ред. В.А. Шахнова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 568 с.
9. Справочник по прикладной эргономике / пер. с англ. Т.П. Бурмистровой ; под ред. В.М. Мунипова. – М. : Машиностроение, 1980. – 216 с.
10. Бобнева М.И. Техническая психология / М.И. Бобнева. – М. : Наука, 1966. – 127 с.
11. Тьялве Э. Краткий курс промышленного дизайна / Э. Тьялве. – М. : Машиностроение, 1984.
12. Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование / О.П. Глудкин [и др.]. – М. : Радио связь, 1987. – 270 с.
13. Маквецов Е.Н. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры / Е.Н. Маквецов, А.М. Тартаковский. – М. : Радио и связь, 1993. – 200 с.
14. Норман Д.А. Дизайн привычных вещей : пер. с англ. / Д.А. Норман. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2006. – 384 с.
15. Ханзен Ф. Основы общей методики конструирования (Систематизация конструирования) / Ф. Ханзен. – Л. : Машиностроение, 1969. – 164 с.
16. Хилл П. Наука и искусство проектирования. Методы проектирования, научное обоснование решений / П. Хилл ; пер. с англ. Е.Г. Коваленко ; под ред. В.Ф. Венды. – М. : Мир, 1973. – 265 с.
17. Джонс Д. Методы проектирования / Д. Джонс. – М. : Мир, 1986.
18. Холл А.Д. Опыт методологии для системотехники / А.Д. Холл ; пер. с англ. под ред. Г.Н. Поварова. – М. : Советское радио, 1975. – 448 с.
19. Ненашев А.П. Конструирование радиоэлектронных средств : учеб. для радиотехнич. спец. Вузов / А.П. Ненашев. – М. : Высшая школа, 1990. 432 с.
20. ISO/IEC/IEEE 29148:2011. Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла. Инженерия требований.

## Список литературы

1. Ярушин С.Г. Проектирование нестандартного оборудования : учеб. / С.Г. Ярушин, А.Г. Схиртладзе. – 2-е изд, перераб. и доп. – Пермь : Пермский гос. техн. ун-т, 2004. – 440 с.
2. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры : учеб. для вузов / К.И. Билибин, А.И. Власов, Л.В. Журавлева [и др.] ; под общ. ред. В.А. Шахнова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 568 с.
3. Dick J. Requirements engineering / J. Dick, E. Hull, K. Jackson. – 4-th ed. – Springer International Publishing Switzerland, 2017. – 252 p.
4. Шамие К. Системная инженерия для «чайников» / К. Шамие. – John Wiley & Sons, 2014. – С. 55.
5. IEEE-STD-1220-1998 (Стандарт IEEE 1998).
6. Кривин Н.Н. Введение в методологию системо- и схемотехнического проектирования электронных и радиоэлектронных средств : учеб. пособие для бакалавриата, специалитета и магистратуры / Н.Н. Кривин. – Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2020. – 250 с.
7. Хорошев А.Н. Основы системного проектирования технических объектов / А.Н. Хорошев. – М., 2011. – 125 с.
8. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества : учеб. пособие для студентов вузов / А.И. Половинкин. – М. : Машиностроение, 1988. – 368 с.
9. Хубка В. Теория технических систем / В. Хубка ; пер. с нем. В.В. Ачкасова, Н.И. Зук, Е.Б. Матвеевой ; под ред. К.А. Люшинского. – М. : Мир, 1987. – 209 с.
10. ISO/IEC/IEEE 29148:2011. Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла. Инженерия требований.
11. Марр Б. Ключевые показатели эффективности. 75 показателей, которые должен знать каждый менеджер / Б. Марр. – М. : Бином. Лаборатория знаний, 2014. – 340 с.
12. Мюллер И. Эвристические методы в инженерных разработках : пер. с нем. / И. Мюллер. – М., 1984.
13. Алексеев В.П. Системная технология инженерного проектирования РЭС в дипломировании: учеб. пособие / В.П. Алексеев, Д.В. Озёркин. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 97 с.
14. Федоров В.К. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств / В.К. Федоров, Н.П. Сергеев, А.А. Кондрашин. – М. : Техносфера, 2005. – 504 с.
15. Системная инженерия. Принципы и практика / А. Косяков, У. Свит [и др.] ; пер. с англ. под ред. В.К. Батоврина. – М. : ДМК Пресс, 2014. – 624 с.
16. Якокка Л. Карьера менеджера / Л. Якокка. – М. : Попурри, 2007. – 544 с.
17. Николенко В.Ю. Базовый курс системной инженерии : учеб. пособие / В.Ю. Николенко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М., 2018. – 330 с.

## 3 ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТА ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОДЕЛЬЮ «ЧЕРНОГО ЯЩИКА»

Системой является все,  
что мы хотим различать как систему.

*Б. Гейне*

### 3.1 Постановка задачи

После того как общие требования к объекту проектирования сформулированы, системотехник должен определить границу мира вещей, интересных в данной задаче, и границу между проектируемой системой и её окружением. С этой точки зрения всю работу, рассмотренную в предыдущем разделе, можно назвать определением граничных условий. Кроме того, существуют граничные условия, именуемые *ограничениями* [1].

Ограничения включают все остальные пределы, сужающие область осуществимых, приемлемых или допустимых решений и фиксирующие многие внешние и внутренние свойства системы.

В обширную область граничных условий входят:

- тип ситуации: требует ли она новой физической системы, нового или видоизмененного метода эксплуатации, ремонта, проектирования или производства физических систем;
- направление проектирования, вытекающее из потребности: расширение функции, улучшение технических характеристик, снижение стоимости, улучшение внешних качеств или какая-либо комбинация этих задач;
- грубая оценка степени риска, с которой может согласиться руководство: желает ли оно более тесного приспособления к существующему окружению или прорыва к новым возможностям;
- ожидаемое воздействие создаваемой системы на другие области или на весь бизнес;
- современные знания относительно совокупного окружения, в частности наличие технологии;
- точка зрения всех классов потребителей относительно желательных свойств системы, стоимости и т.п.;
- знания и опыт системотехников и разработчиков систем;
- вид потребности, изолирована ли она или взаимодействует с другими потребностями;
- частота потребности: можно ли удовлетворить клиента раз и навсегда или его потребность периодическая;
- острота потребности и пределы времени для принятия решения;
- физические пределы или допуски на габариты, вес, скорость и пропускную способность.

На данном шаге необходимо проанализировать, какие связи имеются у ТС со средой, исследовать их, описать и формализовать. Лучшим инструментом для этого является модель «черного ящика».

Перейдем к описанию объекта проектирования на уровне целевой функции (ЦФ) и технической функции (ТФ) согласно иерархии его описаний (см. рисунок 1.2).

Исходными данными для представления объекта проектирования моделью «черного ящика» являются общие требования технического задания на проектирование ЭРЭС.

Результатом выполнения данного шага алгоритма системотехнического проектирования ЭРЭС будет всестороннее описание «черного ящика» (тип задачи, определение количества входов и выходов «черного ящика» и их характеристика, описание целевой и технической функций «черного ящика»), а также дополненные при необходимости требования технического задания.

## 3.2 «Черный ящик» как элементарная модель технической системы

### 3.2.1 Определение «черного ящика»

В процессе разработки технической системы проектировщику важно на основе имеющихся требований к объекту проектирования создать точный образ будущего изделия. Первым шагом на этом пути является построение простейшей модели технической системы в виде образа «черного ящика» [1].

Любая деятельность человека носит целенаправленный характер. Если цели, которые ставит перед собой человек, не достигаются только за счет его собственных возможностей или внешних средств, имеющихся у него в данный момент, то такое стечение обстоятельств называется *проблемной ситуацией*.

Проблемность существующего положения осознается в несколько стадий: от нужды, т.е. смутного ощущения, что что-то не так, к осознанию потребности, затем к выявлению проблемы и, наконец, к формулировке цели.

Цель – это субъективный образ (абстрактная модель) не существующего, но желаемого состояния среды, которое может решить возникшую проблему. Система есть средство достижения цели, средство решения проблемы (таблица 3.1). Без проблемы нет системы. Однако соответствие цели и системы неоднозначно: в чем-то разные системы могут быть ориентированы на одну цель; одна система может иметь (и, как правило, имеет) несколько разных целей.

Согласно определению «чёрный ящик» представляет собой модель, характеризующую назначение (целевую функцию)<sup>10</sup> системы и игнорирующую ее внутреннее

---

<sup>10</sup> В общем случае у «черного ящика» несколько входов и несколько выходов. Функция, преобразующая главный вход в главный выход, называется целевой функцией «черного ящика» и характеризует назначение (целевую функцию или главную полезную функцию) ТС.



устройство, т.е. состав и структуру этой системы (рисунок 3.1). Слово «черный» подчеркивает полное отсутствие сведений о внутреннем содержании «ящика», так как заранее проектировщик не может знать эти сведения. Если описывать степень информационной осведомленности проектировщика относительно технических свойств объекта проектирования в оттенках серого (черный – отсутствие информации, белый – знание всех свойств объекта проектирования), то можно сказать, что процесс проектирования направлен на превращение «чёрного ящика» в «белый ящик» (или, как ещё говорят, прозрачный).

Таблица 3.1 – Примеры целей технических систем

Цель	Техническая система
В произвольный момент указать время	Часы
Передать зрительную информацию в звуковом сопровождении на большие расстояния практически мгновенно	Телевизионная система
Обеспечить самостоятельное движение воздушного судна вдоль заранее запрограммированной траектории полёта	Автопилот
Извлечь информацию о физических характеристиках объектов окружающей среды из их собственного излучения радиочастотного диапазона	Пассивная радиолокационная система

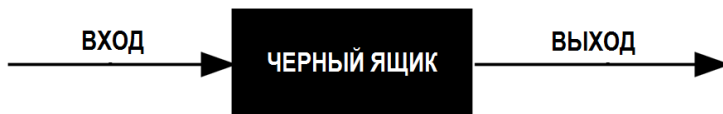


Рисунок 3.1 – Изображение элементарной модели «черного ящика» с одним входом и одним выходом

---

*«Чёрный ящик» – термин, используемый в системном подходе для обозначения системы, внутреннее устройство и механизм работы которой очень сложны, неизвестны или неважны в рамках данной задачи. Метод «чёрного ящика» – метод исследования систем, когда вместо свойств и взаимосвязей составных частей системы изучается реакция (выход) системы как целого на изменяющиеся условия (вход).*

---

Эта максимально простая модель имеет важные для проектировщика свойства наглядности, образности и по-своему отражает еще два важных свойства системы: целостность и обособленность от среды. Однако хотя «ящик» и обособлен от среды, он не является полностью от неё изолированным.

Особенность модели типа «черный ящик» состоит в том, что она отображает только связи системы со средой в виде входов и выходов, а проектировщику надо решить, какие из многочисленных реальных связей включать, а какие – не включать в состав модели. Это является главной трудностью построения «черного ящика». Кроме того, всегда существуют и такие связи, которые неизвестны, но они-то и могут оказаться существенными.

На рисунке 3.1 стрелки обозначают связи системы со средой. Их ориентация показывает направление воздействия. Связи, показанные стрелками от системы в среду, называются выходами системы. Они соответствуют целям из вышеприведенного определения системы.

Любая техническая система является средством, поэтому должны существовать возможности её использования, воздействия на неё. Связи, показанные стрелками от среды к системе, называются входами этой системы.

Таким образом, компонентами рассматриваемой модели являются среда, входы, выходы, «черный ящик».

Общий вид модели технической системы типа «черный ящик» изображен на рисунке 3.2.

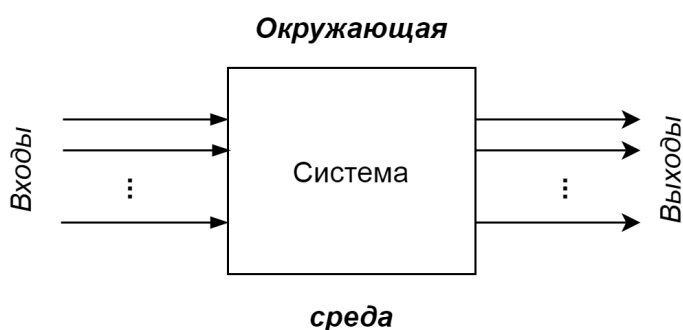


Рисунок 3.2 – Общая модель «черного ящика»

Во многих случаях достаточно содержательного словесного описания входов и выходов; тогда модель «черного ящика» является просто их списком (дескриптивная модель).

---

*Например, бытовая модель телевизора такова: входы – шнур электропитания, антенна, кнопки управления и ИК-порт для пульта дистанционного управления; выходы – экран монитора и звуковые динамики.*

---

В других случаях требуется количественное описание некоторых или всех входов и выходов. Пытаясь максимально формализовать модель «черного ящика», мы приходим к заданию множеств  $X$  и  $Y$  входных и выходных переменных, но никаких других отношений между этими двумя множествами фиксировать нельзя (иначе это будет уже не «черный», а «белый», или прозрачный, ящик).

Как правило, дескриптивная модель «черного ящика» может быть получена на основе результатов опроса представителей заинтересованных сторон, не владеющих точными профессиональными техническими и формальными языками. Такая модель позволяет описать самые общие функциональные и экономические требования потенциальных пользователей.

Теперь рассмотрим принципиально важный вопрос об обманчивой простоте модели «черного ящика». Казалось бы, так просто: перечислить входы и выходы

системы и модель готова. Но как только это требуется сделать для реальной системы, мы сталкиваемся с трудностями.

---

*Опишем, например, выходы системы «наручные часы». Учитывая, что выходы соответствуют конкретизации цели, фиксируем в качестве выхода показание времени в произвольный момент. Затем принимаем во внимание, что сформулированная таким образом цель относится ко всем часам, а не только к нашим наручным часам. Чтобы различить их, вносим следующее добавление (выход): удобство ношения часов на запястье; тогда появляется обязательность ремешка или браслета, а с ним ещё один выход: удовлетворение требований санитарии и гигиены, так как не любое крепление часов на руке допустимо с этой точки зрения.*

*Далее, представив себе условия эксплуатации часов, можно добавить достаточную в бытовых условиях прочность, пылевлагодонепроницаемость.*

*Затем, расширив понятие «условия эксплуатации часов», добавим ещё два выхода: достаточную для бытовых нужд точность, легкость прочтения показаний часов при беглом взгляде на циферблат.*

*Можно ещё более расширить круг учитываемых требований к часам, что позволит добавить несколько выходов: соответствие моде и понятие красоты, соответствие цены часов покупательной способности потребителя. Очевидно, что список желаемых, т.е. включаемых в модель, выходов можно продолжать. Например, можно потребовать, чтобы имелась возможность прочтения показаний часов в полной темноте и реализация этого выхода приведет к существенному изменению конструкции часов, в которой могут быть различные варианты самосвечения, подсветки, считывания на ощупь или подачи звуковых сигналов. А ведь мы в явной форме еще не говорили о габаритах, весе, многих других технических, физических, физиологических, экономических и социальных аспектах использования наручных часов...*

---

Рассмотренные примеры свидетельствуют, что построение модели «черного ящика» не является тривиальной задачей, так как на вопрос, сколько и каких именно входов и выходов следует включать в модель, ответ не прост и не всегда однозначен.

Главная причина множественности входов и выходов «черного ящика» заключается в том, что всякая реальная система, как и любой объект, взаимодействует с объектами окружающей среды неограниченным числом способов. Строя модель системы, мы из этого бесчисленного множества связей отбираем конечное их число для включения в список входов и выходов. Критерием отбора при этом является целевое назначение модели, существенность той или иной связи по отношению к этой цели. То, что существенно, важно, включается в модель, то, что несущественно, неважно, не включается. Именно здесь возможны ошибки. Тот факт, что мы не учитываем в модели, исключаем из рассмотрения остальные связи, не лишает их реальности, они все равно действуют независимо от нас. И нередко казавшееся несущ-

щественным или неизвестным для нас на самом деле является важным и должно быть учтено.

Особое значение этот момент имеет при задании цели системы, т.е. при определении её выходов. Это относится и к описанию существующей системы по результатам её обследования, и к проекту пока еще не существующей системы. Реальная система неизбежно вступает во взаимодействия со всеми объектами окружающей среды, поэтому следует как можно раньше, лучше всего на стадии построения модели, учесть все наиболее важное. В результате главную цель приходится сопровождать заданием дополнительных целей. Необходимо подчеркнуть, что достижения только основной цели недостаточно, что невыполнение дополнительных целей может сделать ненужным или даже вредным и опасным достижение основной цели. Этот момент заслуживает особого внимания, так как на практике часто обнаруживается незнание, непонимание или недооценка важности указанного положения. Между тем оно является одним из центральных во всей системологии.

Таким образом, простота модели «черного ящика» обманчива. Всегда существует риск составить неполный перечень входов и выходов как вследствие того, что важные из них могут быть сочтены несущественными, так и в силу неизвестности некоторых из них в момент построения модели.

Теперь рассмотрим свойства «черного ящика» [2]. К ним относятся:

1) направленность процессов «черного ящика» (процессы протекают по направлениям, указанным стрелками, при этом «чёрный ящик» является преобразователем входных процессов в соответствующие выходные процессы);

2) множественность входов и выходов (множественность целей системы);

3) масштабируемость (в зависимости от размера и сложности объекта проектирования модель «черного ящика» может охватывать разные уровни иерархии ЭРЭС: от уровня суперсистемы, т.е. системы систем, до элементарного компонента структурных (отдельный функциональный узел) или принципиальных (отдельный электрорадиоэлемент или электронный компонент, например конденсатор или транзистор) электрических схем. Таким образом, «черный ящик» можно разделять на другие «черные ящики» неограниченное число раз [1]).

В таблицах 3.2 и 3.3 приведены дополнительные примеры представления моделью «черного ящика» инженерно насыщенных комплексных технических систем в области обработки сигналов и данных [3].

Таким образом, любую ТС можно представить в общем случае в виде «черного ящика» с произвольным количеством входов и выходов самой разной природы (процессы и объекты электрической и неэлектрической природы, распределённые по трем фундаментальным категориям: материя, энергия, информация).

Полный набор моделей «черного ящика», или функциональных блоков, практически для любых материальных систем представлен на рисунке 3.3 [4]. Как видно, в него входит пять типов блоков, у которых:

- 1) ни одного входа и выхода;
- 2) один вход или один выход;
- 3) один вход и один выход;

- 4) более чем один вход и один выход и наоборот;
- 5) более чем один вход и более чем один выход.

Таблица 3.2 – Примеры описания физических операций для ЭРЭС разного уровня разукрупнения: обработка сигналов и данных

Техническая система	Входы	Процесс	Выходы
Метеорологический спутник	Изображения	Хранение и передача данных	Кодированные изображения
Система управления воздушным движением в зоне аэропорта	Сигналы бортовых радиомаяков	Опознавание и слежение	Опознавательный код Воздушная трасса Связь
Система слежения за грузовиками	Запросы о направлении грузов	Прокладка маршрута на карте Связь	Информация о маршруте Доставленный груз
Система бронирования авиабилетов	Запрос о маршруте поездки	Управление данными	Бронирование Билеты
Медицинская информационная система	Код пациента Результаты анализов Диагноз	Управление информацией	Состояние пациента История болезни Лечение
Кодирующее устройство	Сообщение	Кодирование	Код

Таблица 3.3 – Примеры описания физических операций для систем разного уровня разукрупнения: материалы и энергетика

Техническая система	Входы	Процесс	Выходы
Пассажирский самолет	Пассажиры Топливо	Сгорание Тяга Подъем	Перевезённые пассажиры
Современный уборочный комбайн	Засеянное поле Топливо	Срезание Обмолот	Убранное зерно
Нефтеперерабатывающий завод	Сырая нефть Катализаторы Энергия	Крекинг Разделение фракций Смешивание	Бензин Нефтепродукты Химические вещества
Автосборочный завод	Автомобильные детали Энергия	Манипулирование Соединение Заклочительная отделка	Собранный автомобиль
Электростанция	Топливо Воздух	Выработка электроэнергии Регулирование	Переменный электрический ток Отходы производства

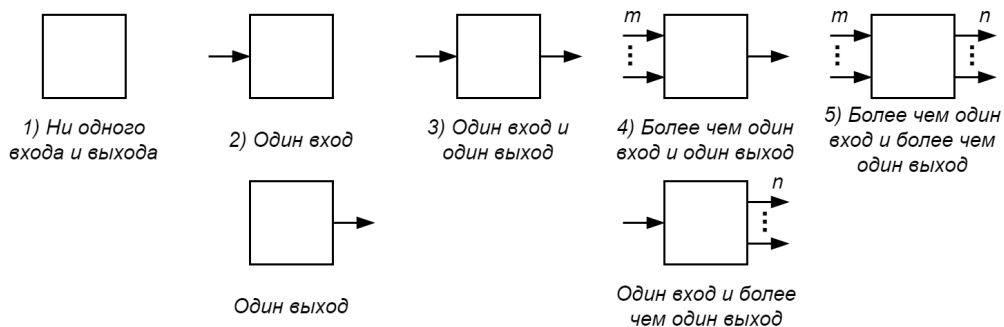


Рисунок 3.3 – Представление технической системы моделью «черного ящика»

В таком виде список является логически полным. Других типов функциональных блоков не существует. Рассмотрим первый тип блоков. Очевидно, что функциональный блок без входа (входов) и выхода (выходов) не может применяться в проектной деятельности. Он включен для придания списку логической полноты. Но на практике о нем можно забыть.

Рассмотрим пятый тип блоков. Его можно считать комбинацией блоков четвертого типа.

Наиболее важными являются второй, третий и четвертый типы функциональных блоков. При проектировании ТС необходимо помнить следующее.

1. Входом и выходом блоков могут быть либо энергия, либо материя (материальные объекты), либо и то и другое. Носителем информации может быть соответствующий объект или энергия.

2. Блоки третьего и четвертого типов представляют операцию над их входом (или энергией, или объектом, или тем и другим) для получения выхода (или энергии, или объекта, или того и другого).

3. Чтобы изменить объект каким-либо образом, необходимо затратить энергию: относительно этого объекта должна быть совершена работа.

4. Входы и выходы блока можно подразделить на желательные и нежелательные. Часть желательного входа может преобразовываться в нежелательный выход. Например, электрическое питание мобильного телефона позволяет ему выполнять полезные функции, но при этом энергия электрического тока, проходящего через резистивные цепи, преобразуется в тепловую энергию согласно закону Джоуля – Ленца, что является нежелательным выходом, так как нагрев нелинейных элементов приводит к изменению их рабочих режимов.

5. Операция выполнения целевой функции детерминирована: система оказывает воздействие на вход для получения выхода. Вход может быть некоторой функцией времени (в математическом смысле). То же можно сказать и о системе. Кроме того, общее действие детерминировано и в каждый отдельный момент времени. Операция должна быть определена заранее.

### 3.2.2 Целевая и техническая функции «черного ящика»

В первом разделе мы говорили об иерархии описаний объекта проектирования и подробно рассмотрели формализованное описание самого первого уровня – описание потребности (целевой функции, назначения) объекта проектирования. Потребность человека – это функция, назначение технической системы.

На этапе представления объекта проектирования моделью «черного ящика» необходимо рассмотреть понятие технической функции будущей системы и как она соотносится с целевой функцией этой ТС. Так как каждый последующий уровень описания ТС включает в себя предыдущий и содержит дополнительную уточняющую информацию о ней, техническая функция включает в себя понятие потребности (целевой функции).

Если целевая функция ТС – это то, что характеризует целесообразность существования системы для решения каких задач она предназначена, то техническая функция описывает как технически ТС эти задачи выполняет. Это физическое преобразование входного процесса в выходной процесс, основанное на использовании заданных физико-технических эффектов и физических принципов действия данной ТС.

---

*Например, целевая функция механических, атомных и электронных часов одна – отображать текущее время. Однако технические функции этих часов разные, так как они работают на разных физических принципах действия:*

- механические часы измеряют время на основе превращения запасенной в пружине потенциальной энергии в движение шестерней;*
  - атомные часы измеряют время на основе явления радиоактивного распада атомов активных химических элементов;*
  - электронные часы работают на основе преобразования электрической энергии, запасенной аккумулятором, в высокостабильный электронный периодический процесс, управляющий цифровым дисплеем.*
- 

Таким образом, техническая функция системы – это её способность преобразовывать входную величину в требуемую выходную величину, тогда как задачи ТС характеризуют целевыми функциями. Целевая функция находится с технической функцией в отношении «цель – средство». Здесь понятие целевой функции эквивалентно понятию «назначение», определяющему внешние задачи технической системы, а для обозначения внутренних задач ТС используется понятие «техническая функция» [5].

Рассматриваемые ТС, функционирующие на физических принципах электроники, радиоэлектроники и радиотехники, с точки зрения назначения на уровне целевой функции можно представить как преобразователи физических процессов электрической или неэлектрической природы ( $X_{э/неэ}$ ) в физические процессы электрической или неэлектрической природы ( $Y_{э/неэ}$ ), тогда как с точки зрения ТФ

эти системы являются преобразователями физических процессов только электрической природы ( $X_{\text{э}}$  в  $Y_{\text{э}}$ ) (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Соотношение целевой (внешней) и технической (внутренней) функций системы

Таким образом, в формализованном описании технической функции «чёрного ящика» содержится следующая информация [5]:

- потребность, которую может удовлетворить проектируемая ТС;
- физическая операция (физическое превращение, преобразование), с помощью которой реализуется данная потребность.

Следовательно, описание ТФ имеет вид

$$F = (P, Q), \quad (3.1)$$

где  $P$  – удовлетворяемая потребность;  $Q$  – физическая операция (ФО).

В свою очередь описание физической операции можно представить состоящим из трех компонентов:

$$Q = (A_T, E, C_T), \text{ или } Q = (A_T \rightarrow E \rightarrow C_T)^{11}, \quad (3.2)$$

где  $A_T$ ,  $C_T$  – соответственно входной и выходной поток (фактор) материи (вещества), энергии или сигналов;  $E$  – наименование операции<sup>12</sup> по превращению  $A_T$  в  $C_T$ .

Описание физической операции отвечает на вопросы «что?» ( $A_T$ ), «как?» ( $E$ ), «во что?» ( $C_T$ ), а само преобразование осуществляется с помощью описываемой ТС. Число входов  $A_T$ , действий  $E$  и выходов  $C_T$  в общем случае произвольное.

Таким образом, под ФО будем подразумевать физическое преобразование или совокупность последовательных физических преобразований заданного входного

<sup>11</sup> Стрелками указывается направленность физической операции.

<sup>12</sup> Так называемые операции Коллера (приложение 6) [6, 7].



потока (объектов или процессов определённой природы в категориях материи, энергии, информации), или фактора, в выходной поток (фактор).

В таблице 3.4 приведены примеры описания ФО для некоторых ТС.

Таблица 3.4 – Примеры описания физических операций для систем разного уровня разукрупнения

Наименование ЭРЭС (уровень преобразователя)	$A_T$ (что?)	$E$ (как?)	$C_T$ (во что?)
GPS (Система)	Географическое местоположение GPS	Преобразование	Числовые значения координат GPS на дисплее
Передатчик обзорного радара (устройство системы)	Электрический сигнал задающего генератора передающего устройства радара	Преобразование	Электромагнитная волна с заданными параметрами, излучаемая антенной системой передающего устройства радара в сторону цели
Приемник обзорного радара (устройство системы)	Электромагнитная волна, переносящая информацию о наличии цели и её физических свойствах	Обратное преобразование	Изображение цели на экране радара
Антенная система <sup>13</sup> радара (устройство системы) – режим приема	Падающая электромагнитная волна, переносящая информацию о наличии цели и её физических свойствах	Поглощение	Переменный электрический ток
Антенная система радара (устройство системы) – режим передачи	Электрический сигнал задающего генератора передающего устройства радара	Излучение	Электромагнитная волна с заданными параметрами, излучаемая антенной системой передающего устройства радара в сторону цели
Телевизор (устройство)	Электромагнитная волна, переносящая информацию изображения и звука	Преобразование	Изображение на экране телевизора и звук в динамиках
Источник вторичного электропитания (устройство)	Электрическая энергия переменного тока	Уменьшение, выравнивание	Электрическая энергия постоянного тока
Фильтр (функциональный узел)	Частотный спектр сигнала	Преобразование	Частотный спектр сигнала

<sup>13</sup> С точки зрения частотного диапазона антенна для ЭМВ с длиной волны меньше, чем линейные размеры самой антенны, является распределенной, а не сосредоточенной структурой, поэтому называется системой или устройством. Но с точки зрения уровней разукрупнения РЭС антенна является подсистемой, компонентом или даже элементом радиолокационной системы (к примеру, параболическая антенна).

Окончание таблицы 3.4

Наименование ЭРЭС (уровень преобразователя)	$A_T$ (что?)	$E$ (как?)	$C_T$ (во что?)
Усилитель (функциональный узел)	Энергия сигнала (маломощный сигнал)	Увеличение	Энергия сигнала (мощный (усиленный) сигнал)
Химический источник тока (элемент)	Электрическая энергия	Выдача	Постоянный электрический ток
Резистор (элемент)	Электрический ток	Преобразование	Электрическое напряжение; тепловая энергия
Устройство автоматического освещения	Электрический ток	Преобразование	Световой поток
Калькулятор (устройство)	Входные данные и последовательность действий с ними	Преобразование	Выходные данные (результат вычислений)
Флеш-накопитель (устройство) – режим считывания	Сигнал считывания данных	Выдача	Данные в цифровой форме
Робот-манипулятор (устройство)	Программа	Преобразование	Последовательность механических действий с физическими объектами
Аэровокзальная багажно-транспортная система конвейерного типа (подсистема подсчета количества багажа)	Поток багажа	Преобразование	Количество единиц багажа и их характеристика (вес, габариты, содержимое)

Итак, любую ТС можно назвать преобразователем физических объектов или процессов. Под преобразованием в данном случае понимается цепочка элементарных действий, физических операций над входом, переводящая его в выход. Выявление звеньев этой цепочки производится с помощью множества операций Коллера (приложение 6).

Функции ТС по приоритетности относительно целей системы можно подразделить на главные полезные функции, основные, вспомогательные и дополнительные (рисунок 3.5) [8]. Главные входы и выходы «черного ящика» отвечают за выполнение ТС главной полезной функции (ГПФ). Основные входы и выходы отвечают за основные функции (ОФ): передачу веществ, энергии и сигналов, формирование сигналов управления, преобразование энергии. Для качественной работы ТС в неё могут быть введены вспомогательные функции (ВФ), которым соответствуют вспомогательные входы и выходы и которые обеспечивают выполнение ОФ. Например,

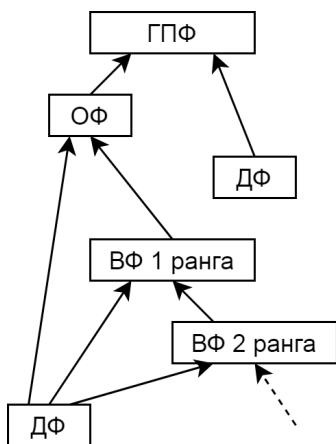


Рисунок 3.5 – Иерархическое представление связей между функциями ТС

выработка сигнала (команды) для реализации ОФ (измерители-преобразователи), коммутация (штепсельные разъемы); преобразование свойств веществ или полей (температуры, давления, положения) в электрические сигналы, необходимые для работы основных компонентов; согласование работы основных функциональных компонентов. Для качественного выполнения основных и вспомогательных функций могут вводиться дополнительные функции (ДФ), которым соответствуют дополнительные входы и выходы и которые совместно с главной функцией обеспечивают потребительские свойства ТС, улучшают выполнение ее функций в целом или ее компонентов, расширяют область ее применения. К дополнительным функциям относятся: измерение параметров (температуры, давления,

положения) для контроля протекающих процессов; обеспечение безопасности человека (защитные устройства); защита устройства от перегрузок (предохранители); повышение устойчивости работы устройства (отрицательная обратная связь); обеспечение технологичности конструкции, обслуживания ТС, например возможности подналадки и регулировки режимов работы ТС; диагностика работы ТС (индикаторы).

### 3.2.3 Классификация входов и выходов «черного ящика»

Множественность и неравноценность входов и выходов «черного ящика» свидетельствуют, что всякая реальная система, как и любой объект, взаимодействует с объектами окружающей среды неограниченным числом способов. Следовательно, необходима классификация входов и выходов «черного ящика».

В результате анализа примеров, рассмотренных ранее, все входы и выходы, т.е. связи «черного ящика» со средой, можно разделить по следующим классификационным основаниям.

1. По приоритетности целей ТС входы и выходы делятся на главные, основные и второстепенные (вспомогательные, дополнительные) согласно классификации функций ТС.

---

*Например, главной функцией мобильного телефона является обеспечение дистанционного обмена звуковой информацией между абонентами. Вспомогательной второстепенной функцией является функция автоответчика. Дополнительной второстепенной функцией является обеспечение возможности проведения несложных вычислений (встроенный калькулятор). Входом и выходом мобильного телефона с позиции главной полезной функции будут соответственно электромагнитные волны радиочастотного диапазона, переносящие информацию и поступающие*

на антенну мобильного телефона, и акустические волны, излучаемые динамиком и переносящие звуковую информацию. Входом и выходом мобильного телефона с позиции вспомогательной второстепенной функции автоответчика будут соответственно электрический сигнал, переносящий звуковую информацию, и состояние встроенной памяти запоминающего устройства мобильного телефона. Входом и выходом мобильного телефона с позиции дополнительной второстепенной функции будут ручной ввод данных пользователем через клавишный или сенсорный интерфейс и численные значения вычислений, отображаемые на табло мобильного телефона.

---

2. По подходу к описанию входов и выходов: подход пользователя (входы и выходы понимаются как требования к будущей ТС), объективный подход (входы и выходы понимаются как характеристики физических процессов).

---

Как говорилось в разделе 2, требования – это ограничения, налагаемые на физические, технические, функциональные, эксплуатационные и другие характеристики будущей ТС. Когда требования к ТС касаются области эргономики, технической эстетики, гигиены и т.д., то есть когда они обеспечиваются конструктивными свойствами, свойствами используемых материалов и т.п., требования удобно представлять в виде входов и выходов.

---

3. По степени полезности в заданных условиях входы и выходы делятся на полезные, бесполезные, мешающие и вредные.

---

**Например**, для мобильного телефона полезным входом является акустическая волна, переносящая речевую информацию абонента, а мешающим входом будет акустическая волна от источника посторонних шумов. Если интенсивность мешающего процесса будет превышать интенсивность полезного информационного процесса, то такой мешающий вход станет вредным. Полезным выходом является радиочастотный сигнал, модулированный звуковым сигналом, а вредным выходом является этот же радиочастотный сигнал, который может создавать помехи другим РЭС, работающим в том же радиочастотном диапазоне.

Необходимо отметить, что при изменении условий эксплуатации состав входов и выходов может изменяться, также входы и выходы могут изменять свою полезность: то, что в одних условиях хорошо и полезно, в других будет вредно.

Также бывают случаи, когда выход является одновременно и полезным, и вредным. К примеру, работа микроволновой печи обеспечивается за счет выхода электромагнитной СВЧ-энергии, сфокусированной в определённой точке внутреннего пространства микроволновой камеры. Однако несовершенство конструкции печи может привести к просачиванию СВЧ-излучения во внешнее пространство. Таким образом, работа микроволновой печи будет одновременно полезной (приготовление

*пищи) и вредной (создание помех находящимся по близости электронным приборам).*

---

4. По природе физических процессов можно разделить входы и выходы электрической природы (движение электронов в проводниках, электростатические и электромагнитные поля); входы и выходы неэлектрической природы (температура, влажность, давление, радиоактивный фон, механические вибрации и т.д.).

5. По классам свойств входы и выходы можно разделить на пространственные; временные; информационные; физические.

Для описания входов и выходов любой информационной системы достаточно подробно описать эти свойства [1].

Каждая ТС находится в определенном взаимодействии с окружающей средой. В качестве окружающей среды может выступать надсистема, объекты живой и неживой природы и другие ТС, которые находятся в функциональном или вынужденном взаимодействии с рассматриваемой ТС и оказывают заметное влияние на её проектно-конструкторское решение [6].

ТС, как правило, эксплуатируется в динамических условиях. Даже если система имеет стационарное назначение и, грубо говоря, «стоит на месте», условия вокруг неё могут самопроизвольно изменяться в силу объективных обстоятельств [9, 10]. Следствиями этого будут:

- изменение качественного и количественного состава входов и выходов «черного ящика»;
- изменение степени полезности входов и выходов вплоть до изменения полезных на вредные;
- одновременное сочетание противоположных качеств полезности.

---

*Например, одним из многочисленных полезных входов смартфона является радиочастотный сигнал, переносящий информацию от звонящего абонента. При этом соответствующим полезным выходом будет являться акустический речевой сигнал. Вредным входом является радиочастотная помеха, а соответствующим ей вредным выходом будет являться акустическая помеха, разрушающая или зашумляющая полезный информационный акустический сигнал. Вход электропитания является полезным входом, однако работа электрического тока частично преобразуется в тепловую энергию (вредный выход), которая влияет на элементы ЭРЭС и на объекты окружающей среды.*

---

После того как определены входы и выходы системы, необходимо детально описать свойства соответствующих процессов, т.е. установить физическую природу связей, физические величины соответствующих параметров, диапазон их возможных значений, единицы измерения и размерность (рисунки 3.6–3.8, таблица 3.5) [6–8, 11–16].

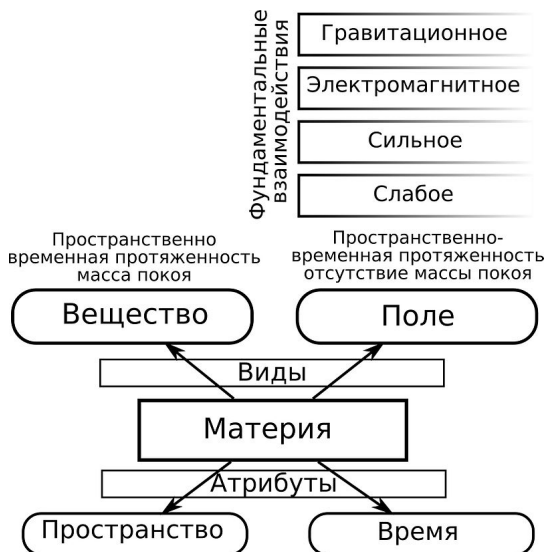


Рисунок 3.6 – Виды и атрибуты материи



Рисунок 3.7 – Виды полей

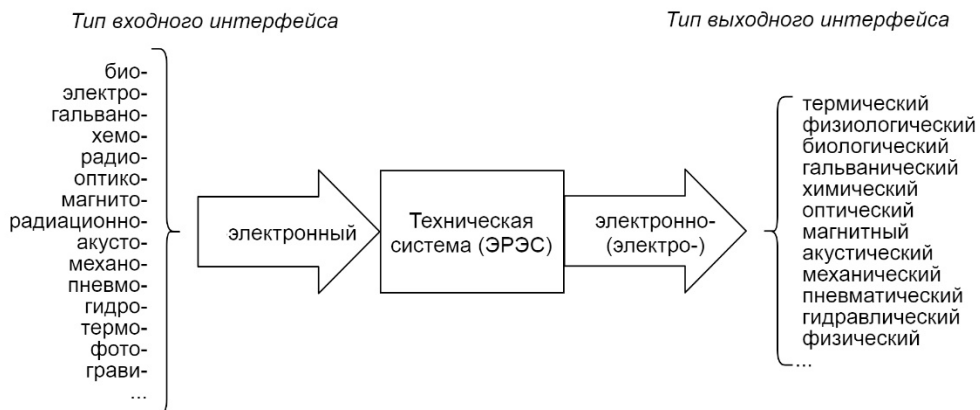


Рисунок 3.8 – Входные и выходные интерфейсы ЭРЭС

Таблица 3.5 – Фрагмент словаря входов (выходов) «черного ящика» [6]

Наименование входа (выхода)	Качественная характеристика входа (выхода)	Физическая величина, характеризующая вход (выход)		Единица измерения физической величины
		Наименование	Обозначение	
Электрическое поле	Постоянное	Напряженность электрического поля Разность потенциалов ЭДС	$E$	В/м
	Переменное		$U$	В
	Однородное		$\varepsilon$	В
	Неоднородное			
	Высокочастотное Низкочастотное			
Магнитное поле	Постоянное	Магнитная индукция Магнитный поток	$\vec{B}$	Тл
	Переменное		$\Phi$	Вб
	Однородное			
	Неоднородное			
Электромагнитное поле	Ультрафиолетовое	Интенсивность	$S$	Вт/м <sup>2</sup>
	Видимое	Частота	$\nu$	Гц
	Инфракрасное	Длина волны	$\lambda$	м
	Рентгеновское	Амплитуда	$A$	
	Линейно-поляризованное	Состояние поляризации	$p$	
	Эллиптически-поляризованное			
Акустическая волна	Звуковая Ультразвуковая	Частота	$f$	Гц
		Мощность излучения	$P$	Вт
		Интенсивность	$J$	
Сила	–	Сила	$\vec{F}$	Н
Температура	–	Температура	$T$	К

На этапах анализа связей ТС со средой и синтеза ФПД одним из основных требований к системотехнику является наличие у него способности к использованию фонда известных на данный момент физических и физико-технических эффектов и явлений.

В качестве примера на рисунке 3.9 приведена фотография обычного домашнего компьютера с указанием некоторых основных интерфейсов в терминах словаря входов и выходов «черного ящика» (см. таблицу 3.5).

Коротко общая процедура анализа модели «черного ящика» такова [1]:

- 1) перечислить все входы и выходы в отдельных списках;
- 2) полностью описать каждый перечисленный член;
- 3) попытаться связать множества входов со множествами выходов, угадывая знакомые преобразующие агенты или передаточные функции.

В перечисленных операциях уяснение задачи незаметно сливается с синтезом систем. Действительно, положим, что задача распознавания в третьем пункте процедуры не решается с первой попытки. Тогда следующим логическим шагом было бы разбиение совокупной системы на все меньшие подсистемы, пока не обнаружится, что некоторое подмножество входов может быть преобразовано желательным способом. Это влечет за собой формирование внутренней структуры системы, т.е. ее

синтез. Возникает вопрос, где та грань, которая отделяет этап анализа задачи от этапа синтеза системы, и как её определить?



Рисунок 3.9 – Примеры интерфейсов персонального компьютера

Итак, первый шаг – составить исчерпывающий перечень всех входов и выходов системы, рассматриваемой как «черный ящик». Очевидно, что входы и выходы можно сгруппировать по тому, несут они информацию, энергию или материалы. Такая группировка полезна тем, что проектирование частей системы, работающих с тремя типами входов, допускает известное разделение.

---

*Например, если входом является информация в электрической форме, то нужен инженер-связист, чтобы спроектировать передатчик – входное оборудование. Энергетическим входом в эту систему является электрическое питание, а потому требуется инженер-энергетик, чтобы спроектировать различные подсистемы, превращающие и распределяющие энергию.*

---

Следующий шаг – дать полное техническое описание каждого входа и выхода. Если входом является поток информации, то необходимо знать его источник, его начало, продолжительность и конец, его язык или код, его информационное содержание, скорость и избыточность. Важны также его физические свойства; если



информация поступает в электрической форме, то необходимо знать форму сигнала во времени, его положение на оси частот и т.д.

Эти входы затем анализируются для определения *числа их видов и интенсивности каждого вида*. Если существует только один вид входа, например пассажиры, проходящие через турникет метрополитена, то система (сбора монет) будет очень простой. Если же в этом примере поведение входов (людей), интенсивность входов и реакция системы таковы, что образуется очередь недопустимой длины, то система будет сложнее: ряд турникетов, разменный автомат и мегафонная установка. Для проектирования такой системы потребуется инженер-механик, специалист по массовому обслуживанию и специалист по технической психологии.

При наличии более чем одного вида входов система будет ещё сложнее, так как она должна различать каждый вид. Когда мы говорим по телефону, один вид входа посылается при снятии трубки (сигнал вызова); другой вид – при наборе номера (импульсы набора); третий – при возвращении трубки на место (сигнал отбоя). Система различает входы благодаря учету последовательности событий; говорят, что входы *уплотнены во времени*. Другой пример той же идеи для материальных входов – система нефтепровода, транспортирующая по очереди различные сорта нефти.

Платное шоссе, где взимаются разные сборы с легковых и грузовых автомобилей, может иметь разные полосы движения через шлагбаумы; здесь входы *уплотнены в пространстве*. Другой пример для информационных входов – станция пожарной сигнализации, к которой могут подключаться по разным линиям сотни пожарных извещателей из всех частей города. Стоит отметить, что в информационных системах весьма распространено частотное уплотнение.

Мы назвали три наиболее распространённых метода уплотнения, желая показать полезность разделения входов и выходов по числу и виду. Полезным оказывается и отличие этих аспектов проектирования от тех, которые связаны с единичным входом.

Иногда проводят синтез системы отдельно для каждого вида входов, а затем рассматривают, какие усложнения возникают при одновременном действии многих входов. Авторы [17] используют весьма удачные термины: *проектирование единичной нити* для первого аспекта и *проектирование большой нагрузки* для второго. Второй термин, однако, недостаточно общий, так как требование множественных входов не всегда заставляет обращаться к методам теории массового обслуживания (или, как её ещё называют, теории очередей).

Рассмотрим, например, проектирование домашнего радиоприёмника. Проблема единичной нити – связать и спроектировать функции усиления и демодуляции таким образом, чтобы слушать только одну передающую станцию. Проблема множественных входов – спроектировать функцию выбора станции, обеспечивающую приём одной станции без помех от других станций. Мы можем рассматривать входы как «ждущие неопределенно долго в очереди», но такая интерпретация в терминах теории массового обслуживания несколько не облегчает проектирование регулятора настройки, хотя она могла бы привести нас к шкале предварительной кнопочной настройки и «искателям сигналов», если бы эти идеи не были уже известны. Более

общий термин «проектирование множественных входов» включает проектирование большой нагрузки как частный, но важный случай.

В домашнем радиоприёмнике желательными выходами являются сигналы станций, но только от одной станции сразу. Это подсказывает другую полезную дихотомию: желательные и нежелательные входы и выходы. Нежелательным множественным входом (уплотнённым по частоте) являются атмосферные или космические помехи. Этот вход может исказить или не исказить радиопрограмму в зависимости от конструкции приёмника и силы желательных входных сигналов. Желательный единичный вход способен произвести нежелательный множественный выход. Например, плохой сглаживающий фильтр способен превратить часть желательного энергетического входа частотой 50 Гц в нежелательный гармонический фон. С другой стороны, радиоприёмник может производить нежелательные выходы, когда питание включено, но других выходов нет, например тепловой шум в настроенном входном контуре или в преобразовательной лампе. Защитой от них может служить более эффективный входной контур или ступень усиления высокой частоты между антенной и преобразователем.

Эти примеры показывают, что значительная часть проектирования направлена на предупреждение того, чтобы желательные или нежелательные входы, или даже полное отсутствие входов, производили нежелательные выходы. Этот аспект называется *проектированием противодействия* [1].

Проектирование противодействия не имеет какого-либо одного определенного орудия, как не имеет его проектирование единичной нити и множественных входов. Прежде чем утверждать нечто более положительное, необходимо знать, о каком виде систем идет речь. Если, скажем, это передающие системы, то во всех трех аспектах проектирования понадобятся теории шума, взаимных помех, модуляции, электронных схем и пассивных четырехполюсников.

Один важный раздел проектирования противодействия получил название состязательного проектирования. Оно применяется, когда нежелательный единичный или множественный вход, поступающий из человеческого источника, пытается разрушить систему или нарушить её желательные выходы.

---

*Простые примеры: противник, заглушающий желательный вход в радиоприемник организованными помехами, и антиракета, атакующая ракету.*

---

Хотя состязательные аспекты всегда присутствовали при выборе и разработке коммерческих систем, но гонка вооружений сделала проектирование противодействия специальностью военизированных наций. Проектирование противодействия не дает новшеств, а лишь подчеркивает значение уже существующих. Прежде всего следует возможно более полно изучить технику и тактику противника, а тем временем держать свои средства и действия в тайне или ввести противника в заблуждение. Этап синтеза состоит в создании средств, способных противостоять самым последним ухищрениям другой стороны. Так как состязательное преимущество никогда

не длится долго, а время упреждения в проектировании всегда коротко, то быстрота проектирования становится жизненной необходимостью [1].

**Свойства сообщений и сигналов.** В таблице 3.6 приведен полный перечень свойств сигналов и сообщений [1]. Какие именно описывать свойства входов и выходов, зависит в значительной мере от типа рассматриваемой системы, аналитических методов, которыми располагает проектировщик, и других факторов. В некоторых задачах информационные свойства могут иметь малое значение, тогда как в других они играют ведущую роль. Кроме того, некоторые свойства можно описать разными способами. Например, сигналы можно описать во временной области формами волн (временные функции сигналов) или в частотной области спектрами. Выбор метода зависит от сравнительного удобства, возможности измерения и других факторов.

*Пространственные, или географические, свойства.* Пространственные координаты источников и адресатов почти всегда указаны. В ряде случаев, как в телефонных системах, источники однозначно описываются присвоением каждому особого номера; в этих системах для передачи сигналов требуется образовать определённые пути между парами номеров. В радиовещании координаты адресатов непосредственно не известны; здесь важно лишь знать расстояния, на которых будет принят сигнал заданной мощности.

Таблица 3.6 – Свойства сообщений и сигналов

Проектная ситуация	Категории свойств	Свойства
Свойства одного сообщения и его сигналов для системы с одним входом и одним выходом	Пространственные свойства сообщения и сигналов	Положение источника и адресата Расстояние и положение пути между источником и адресатом Физические размеры источника и адресата
	Временные свойства сообщения и сигналов	Начало (эпоха), длительность (эра) и конец Форма волны (см. «Физические свойства»)
	Информационные свойства сообщения и сигналов	Язык сообщения или код сигналов Информационное содержание, статистическое и семантическое Эффективность или избыточность Скорость информации
	Физические свойства сигналов	Род колебаний (электрические, акустические, световые, тепловые и т.д.) Свойство колебаний, используемое для кодирования (амплитуда, частота, фаза, поляризация) Способ передачи (последовательно или параллельно в пространстве, во времени или по частоте) Форма волны (или её соответствующие меры, такие как распределение амплитуд, автокоррекция и т.д.) Частотное или временное положение сигналов Частотный спектр: амплитудный, фазовый и энергетический

Окончание таблицы 3.6

Проектная ситуация	Категории свойств	Свойства
Свойства сообщений и сигналов для системы со многими входами и многими выходами	Пространственные свойства сообщений и сигналов	Число и плотность источников адресатов Распределение расстояний между источниками и адресатами Пространственные отношения между каналами Распределение аналогичных физических размеров сообщений
	Временные свойства сообщений и сигналов	Распределение начальных моментов во всех важных для нас интервалах времени Распределение длительностей сообщений Распределение форм волн (см. «Физические свойства») Распределение сообщений с различными информационными свойствами
	Информационные свойства сообщений и сигналов	Используемые языки и коды Информационные содержания, статистические и семантические Эффективности Скорость информации
	Физические свойства сигналов	Роды колебаний Свойства колебаний, используемые для кодирования различных входов Методы передачи, коммутации и обслуживания очередей Формы волн Взаимная корреляция между входами и выходами Частотные или временные положения сигналов Частотные спектры: амплитудные, фазовые и энергетические

---

*Например, телефонный обмен характеризуется часовыми колебаниями в течение суток, колебаниями по дням недели, временам года, праздникам и долговременными тенденциями.*

---

При выборе системы со многими входами внимание обычно сосредоточивается на коллективных временных и пространственных свойствах всего класса или подклассов источников, создающих сообщения одного рода. Пример – класс источников, создающих телефонные сообщения. В таблице 3.6 перечислены свойства, для которых даются статистические описания, в том числе средняя скорость сообщений из каждого источника, их средняя длина и т.д. Параметры соответствующих распределений обычно не являются постоянными во времени, иными словами, перед нами нестационарные процессы. Для адекватного описания таких процессов необходимо исследовать автокорреляционную функцию, чтобы обнаружить периодичности и тренды.

*Временные свойства.* Начало и конец сообщений и сигналов представляют собой мгновения во времени. Во многих случаях эти мгновения очень важны и отмечаются специальными стартовыми и стоповыми сигналами. Длительность сообщения или сигнала есть разность во времени между началом и концом. Часто при анализе сигналов вместо слов «начало» и «длительность» употребляются слова «эпоха» и «эра». Иногда бывает важно записывать одно или несколько из этих временных свойств. Например, записывают начало, конец и длительность междугородных телефонных разговоров, чтобы на основании этих данных предъявить абоненту счет.

Начало, конец и длительность для сообщения и для сигнала не обязательно одни и те же. Начало и конец сигнала должны всегда быть позже начала и конца сообщения, так как в физически осуществимых кодирующих устройствах неизбежна задержка. Для сокращения длительности сигнал может кодироваться более эффективно, чем сообщение, и его можно передавать по быстродействующей системе. Всякое различие в длительности сообщения и сигнала требует хранения сигнала в кодирующем устройстве.

*Информационные свойства.* Полная характеристика входов и выходов должна включать их информационные свойства. Причины, почему для систем со многими входами эти свойства описываются статистически, совершенно очевидны.

Например, число кодирующих устройств и число их типов в информационной системе зависят от частоты появления различных языков и от числа сообщений на каждом языке.

Средняя скорость производства информации в элементарной системе связи должна быть одна и та же во всех частях системы. В практических многозвенных системах возможны три ситуации. Кодированный сигнал по отношению к соответствующему сообщению может иметь: 1) то же самое количество информации; 2) меньшее количество; 3) в ограниченном отрезке времени большее количество.

Предположим, что нужно понять, как ведет себя система, в которой сообщения переходят из одного места в другое. Среди многих вопросов, которые можно задать по поводу этих сообщений, будут и такие:

- а) сколько протекает информации;
- б) сколько имеется различных видов сообщений;
- в) каково значение каждого сообщения для получателя;
- г) какова ценность сообщений;
- д) как часто проходит сообщение каждого вида и как связаны между собой прохождения сообщений разных видов?

Ответы на эти вопросы могут быть весьма существенны для разработки новой системы. Однако теория информации совершенно не занимается вопросами *в* и *г*. Её предмет – вопросы *а*, *б* и *д*, но мера информации, которую она дает, является весьма частной – гораздо более узкой, чем требуется для создания практических систем.

Сообщения и сигналы могут быть непрерывными или дискретными функциями времени, но одно равносильно другому.

Положим, что сообщения выбираются из совокупности  $m$  символов (где  $m$  – размер используемого алфавита. Например, для русского алфавита  $m = 33$ , для английского –  $m = 26$ , для двоичного (или бинарного) –  $m = 2$  и т.д.). Пусть этим символам приписаны вероятности  $p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_m$  и символы появляются независимо. Важным параметром такого распределения является среднее значение

$$h = \sum_{i=1}^m p_i f(p_i).$$

Шеннон использовал этот параметр для определения средней информации на символ, выбрав функцию  $f(p_i)$  со следующими свойствами:

- 1) количество информации для любого символа является неотрицательной величиной, т.е.  $h_i \geq 0$ ;
- 2) функция  $h$  непрерывна по  $p_i$ ;
- 3) информации в символе тем больше, чем менее он вероятен, т.е. функция убывает монотонно относительно  $p_i$  и если все  $m$  вероятностей одинаковы, то количество информации на символ достигает максимума;
- 4) мера информации аддитивна, т.е. если  $p_1$  и  $p_2$  – вероятности двух событий, наступающих независимо, то информация, заключенная в совместном наступлении двух событий, равна  $h(p_1, p_2) = h_1 + h_2$ .

Условная единица информации соответствует алфавиту из двух равновероятных символов:

$$h = \sum_{i=1}^2 \frac{1}{2} \log_a 2.$$

Положив  $a = 2$ , получим  $h = 1$ . Это *двоичная единица*, или *бит* (от англ. binary digit).

Таким образом, общая мера информации в битах на знак будет

$$h = - \sum_{i=1}^m p_i \log_2 p_i. \quad (3.3)$$

Величина  $h$  называется *энтропией источника*. Энтропия максимальна, когда последовательность знаков случайна, т.е. когда следующим знаком может быть с одинаковой вероятностью любой из возможных символов независимо от того, что было раньше. Формула (3.3) при этом дает максимально возможную информацию на знак при алфавите в  $m$  символов. Так как  $p_1 = p_2 = \dots = p_m = 1/m$  и между символами нет связи, то

$$h_{\max} = \log_2 m.$$

В реальности в большинстве употребительных языков символы алфавита не равновероятны. Например, среднее количество информации на знак для английского

языка составляет  $h = 4,14$  бит на букву против  $h = 4,7$  бит на букву, как если бы вероятность появления букв в сообщениях не зависела от очередности их появления. Таким образом, можно заключить, что английский алфавит эквивалентен новому алфавиту из 18 символов (антилогарифм 4,14), появляющихся с равными вероятностями. Это приводит к еще одному информационному свойству входов и выходов «черного ящика».

Пусть имеется источник, производящий дискретные сообщения с алфавитом из  $m$  символов. Эффективность языка определяется как

$$E = \frac{\text{энтропия источника}}{\log_2 m} = \frac{h}{h_{\max}} .$$

Эту величину иногда называют относительной энтропией.

Избыточность языка есть дополнение эффективности до единицы:

$$R = 1 - E .$$

Избыточность хороша во всех практических системах связи.

---

*Например, громадное интуитивное знание родного языка, которым обладает большинство людей, делает их способными предсказывать недостающие части сообщений. Знакомство со словами, грамматикой и идиомами позволяет заполнять пробелы и исправлять искажения.*

---

Важно помнить, что энтропия не имеет никакого отношения к тому, что обозначают символы; она учитывает только их частоту и корреляцию. Иначе говоря, статистическая теория связи не дает меру для семантического содержания, или концептуального значения, сообщений. Энтропия является абсолютно объективной мерой. Она не говорит ничего о ценности информации для источника или для адресата. Системотехник должен принимать это во внимание, так как при решении задач ему может потребоваться знать, что означает каждый символ или последовательность символов для источника и для предполагаемого адресата.

*Физические свойства.* Для удобства изложения статистическая теория связи разделяется на две области:

- 1) исследование сообщений и сигналов;
- 2) связь при наличии шума.

Исследование физических свойств сигналов является логическим началом второй области.

Физические свойства сигналов необходимо знать, многие из них должны быть совместимы с сигнальным каналом и другими элементами информационной системы.

Например, имеющийся сигнальный канал может принимать и передавать сигналы в любом коде, если кодирование использует надлежащий род колебательных явлений и результирующие частотные спектры согласуются с передающими свойствами канала в границах допусков, установленных техническими стандартами. Физические свойства сигналов можно изменять соответствующими преобразователями.

В таблице 3.6 произвольно указаны лишь сигналы, передаваемые колебательными явлениями. Символы сообщения кодируются в сигналы посредством изменения некоторого свойства распространяющегося колебания: амплитуды, фазы, частоты или поляризации электрического колебания и т.п. Для того чтобы декодировать сообщение, приемник должен исследовать модулированное свойство.

Описание волновой формы сигнала включает различие видов импульсной модуляции и между ними всеми как классом и непрерывной модуляцией. Оно также включает различие между сигналами, занимающими периодические отрезки времени, и сигналами, действующими непрерывно.

Важными свойствами кодированного сигнального колебания являются его амплитудный и фазовый спектры. У исходных сигналов амплитудный спектр может лежать в очень широких границах, но обычно большая часть энергии сигнала сосредоточена в узком участке этого диапазона. Термины «ширина полосы» и «частотное положение» служат инженерным приближением к описанию существенных характеристик спектра, которые надо согласовать с каналом. Ширина полосы – это интервал частот, содержащий основную часть спектра, необходимую для передачи практически всего сообщения. Частотное положение – место этой полосы на шкале частот.

---

*Например, спектр колебаний речи простирается примерно от 50 до более чем 8000 Гц, но для нужд телефонии необходимо передавать лишь часть спектра, лежащую примерно между 250 и 3500 Гц. В реальных системах эта полоса может быть расположена где угодно на шкале частот, от исходной речевой частоты до тысяч мегагерц.*

---

**Канал передачи информации как «черный ящик». Свойства канала.** На рисунке 3.10 показана упрощённая структурная схема системы электросвязи [18]. В процессе распространения сигналов по каналу передачи информации среда изменяет свойства сигналов, поэтому канал можно рассматривать как преобразователь свойств данного процесса, а следовательно, канал можно представить моделью «черного ящика».

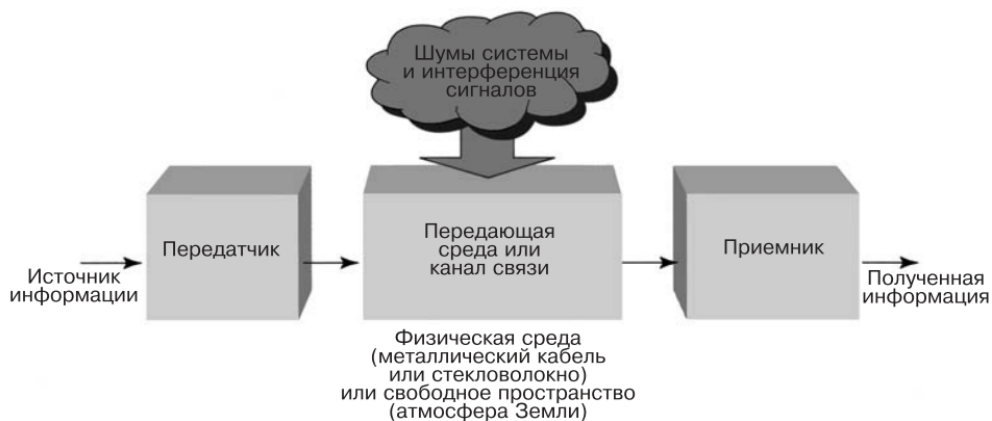


Рисунок 3.10 – Упрощённая структурная схема системы электросвязи



Свойства канала можно излагать исходя либо из легко измеримых передаточных характеристик, либо из теории информации [1]. Передаточные свойства удобнее для инженерных расчетов. Свойства, выведенные из теории информации, являются в некоторых отношениях более фундаментальными. Оба множества свойств взаимосвязаны и дополняют одно другое.

*Передаточные свойства.* Эти свойства можно измерять обычными техническими методами на концах физического канала, не зная, что в нем происходит (таблица 3.7). Большинство свойств обычно рассматривается как ухудшение передачи (а иногда так и называется).

Таблица 3.7 – Передаточные свойства сигнального канала

Категория эффектов	Категория свойств	Свойства
Эффекты распространения (функции частоты)	Затухание	Равномерные потери. Равномерное уменьшение амплитуды Ограниченная полоса частот. Затухание вне определенного диапазона частот бесконечно велико Искажение затухания. Изменение относительных амплитуд частотных составляющих сложного колебания в передаваемой полосе частот Устойчивость затухания во времени
	Фаза, задержка, скорость	Равномерная задержка. Среднее время передачи Искажение задержки (или фазовое искажение) Изменение относительного времени распространения (или относительной фазы) частотных составляющих сложного колебания Устойчивость фазы или задержки во времени Несогласованности сопротивлений. Отражения (или эхо)
Нелинейные искажения (функции амплитуды)	–	Амплитудное искажение. Большие амплитуды обычно затухают сильнее, чем малые (явление перегрузки) Искажение модуляции. Образование новых частот, которые являются гармониками частотных составляющих сигнала (искажение гармоник) или результатами модуляции, производимой взаимодействием двух или более составляющих; искажение от взаимной модуляции
Помехи	–	Добавление паразитного колебания к сигналу. Помехи часто называют в широком смысле шумом независимо от их источника. Однако при более строгом подходе их разделяют на взаимные помехи (или на взаимную наводку), создаваемые сигналами одного или нескольких других каналов связи, и на шум, создаваемый любыми другими источниками

Передаточные свойства различаются тем, насколько они ограничивают передаточный потенциал канала. К одному классу относятся свойства, которые при некоторых затратах можно компенсировать до любой желательной степени, так что остаточные эффекты не будут налагать существенных ограничений на работу канала.

---

*Например, потери можно компенсировать усилением, затухание и фазовое искажение – выравнивателями, а неустойчивость – автоматическим регулированием. В многоканальных системах связи эти функции выполняются многофункциональным устройством, которое получило название ретранслятора. Такие устройства размещаются вдоль линии для выправления характеристик, перечисленных в таблице 3.7.*

---

Равномерная задержка составляет особый класс, так как отсутствуют физические средства создания отрицательной задержки, ее нельзя уменьшить. Правда, для односторонних каналов встречающиеся на практике задержки большей частью не имеют значения. Существуют исключения, например в системах, передающих сигналы целеуказания для антиракет, время является важной координатой, поэтому задержка канала должна учитываться управляющими машинами наведения. Задержка имеет важное значение при двусторонней связи как вследствие её влияния на эхо (или отражения), так и ввиду помех, которые она создает для быстрого обмена информацией между собеседниками.

Еще один класс представлен группой трех свойств, принципиально ограничивающих передаточные возможности канала. Это ширина полосы, мощность сигнала и шум, или помехи. Максимальная допустимая мощность сигнала тесно связана с нелинейными эффектами, указанными в таблице 3.7; она не должна превышать величину, при которой эти нелинейные эффекты остаются в допустимых пределах. Иногда мощность сигнала ограничивается другими факторами, например необходимостью предотвратить помехи для других каналов или постановлением регулирующего органа (Федеральной комиссией по связи). Когда максимальная мощность установлена в соответствии с этими соображениями, на первый план выступают сравнительные уровни сигнала и шума. Таким образом, три фундаментальных свойства этой группы сводятся к двум: ширине полосы и отношению сигнал/шум. Из этих двух свойств выводится новая важная характеристика – *пропускная способность канала*.

Практическое действие на систему различных искажений и помех зависит от вида сообщения.

---

*Например, в телефонии человеческое ухо, принимающее сообщения, реагирует только на относительные амплитуды частотных составляющих речевого колебания, пренебрегая в общем их относительными фазами (если только фазовое искажение не слишком велико). В аналоговом телевидении справедливо обратное. При обычных методах кодирования искажение задержки смещает элементы изображения от их истинных положений и смазывает контуры изображения, тогда как небольшое амплитудное искажение вызывает лишь малозаметные изменения яркости. Разумеется, если применяется фазовая или частотная модуляция, то фазовое искажение в канале может превратиться в амплитудное искажение декодированного сигнала.*

---

Разные виды информационных сигналов обладают также различной чувствительностью к неустойчивости передаточных свойств. Кроме того, некоторые сигналы допускают больший уровень шума, чем другие.

---

*Например, важное преимущество систем с частотной модуляцией и многих систем с импульсной модуляцией состоит в том, что они могут работать при сравнительно малом отношении сигнал/шум.*

---

*Информационная пропускная способность канала.* Информационной пропускной способностью канала называется максимальная теоретическая скорость передачи информации, к которой можно приблизиться, но нельзя превзойти.

Понятия теории информации, относящиеся к каналу, можно резюмировать следующим образом. Когда сигналы передаются по шумящему каналу (предполагается случайный шум как вредный процесс, поступающий одновременно с полезным сигналом на вход приемной системы), декодирующее устройство из-за вносимого шума не может точно определить, какие сигналы были посланы. Эта неопределенность приводит к тому, что декодирующее устройство не извлекает из принимаемых сигналов всей посланной информации. Значит, скорость информации для принимаемых сигналов меньше, чем для исходных, т.е.

$$R = H - Q,$$

где  $R$  – скорость информации для принимаемых сигналов (бит/с);  $H$  – скорость информации для передаваемых сигналов;  $Q$  – неопределенность в принимаемых сигналах (ненадежность по Шеннону).

С помощью процесса максимизации определяется максимальная возможная скорость информации, при которой неопределенность  $Q$  можно удерживать меньше любой сколь угодно малой величины. Эта скорость называется информационной пропускной способностью канала:

$$C = W \log_2 (1 + S/N),$$

где  $C$  – информационная пропускная способность канала, бит/с;  $W$  – ширина полосы частот канала;  $S$  – средняя мощность сигнала;  $N$  – средняя мощность шума (предполагается белый тепловой шум).

В случае передачи информации непрерывными сигналами ее максимальная скорость будет

$$C = 2W \log m,$$

где  $m$  – число различных символов или уровней сигнала;  $W$  – верхняя граница амплитудного спектра передаваемого сигнала. В этом случае согласно теореме о дискретизации сигнал полностью определяется своими отсчетами через интервалы  $1/2W$ , с; иными словами, все информационное содержание сигнала заключено в этих выборочных значениях.

### 3.2.4 Интерфейсы «черного ящика»

Одним из основных в системной инженерии является понятие интерфейса. Существует несколько определений этого понятия.

Интерфейс – это граница между двумя функциональными объектами, требования к которой определяются стандартом.

Интерфейс – это совокупность средств, методов и правил *взаимодействия* (управления, контроля и т. д.) между элементами системы.

Слово «взаимодействие» является ключевым, так как подчеркивает значение динамической взаимосвязи и сценариев развития взаимосвязи между компонентами и сторонами интерфейса.

Для того чтобы оценить роль понятия «интерфейс» в системотехнике, рассмотрим определение понятия «система», которое даётся по [19].

Система – это упорядоченная совокупность взаимодействующих элементов – аппаратных, программных, а также людей, объединённых между собой для достижения желаемого результата, то есть для выполнения определённых требований.

Из этого определения следует, что люди также могут входить в состав системы и являться её неотъемлемой частью. Компетенции, знания и навыки персонала, обслуживающего техническую систему, не менее важны, чем её программные и аппаратные компоненты.

Поскольку компоненты системы непременно должны взаимодействовать, интерфейсы между ними находятся в центре внимания системной инженерии (и инженерии требований в частности).

В таблице 3.8 приведены основные типы интерфейсов с примерами.

Таблица 3.8 – Примеры основных типов интерфейсов

Тип интерфейса	Пример
Человек – ТС	Пользователь – персональный компьютер
ТС – ТС	Системный блок персонального компьютера – монитор
ПО – ТС	Операционная система Linux – персональный компьютер
ПО – человек	Операционная система Windows – пользователь
ПО – ПО	Операционная система Windows – офисная программа MS Office Word
Среда – ТС	Атмосфера в умеренном климатическом поясе – радар
Среда – ТС – человек	Космическое пространство – система управления стыковкой космических модулей – космонавт
ТС – ПО – человек	Смартфон – главное меню – пользователь
<i>Примечания:</i> интерфейс «ТС – ТС» также называют физическим интерфейсом или «машина–машина»; интерфейс «Человек – ТС» также называют «человеко-машинным»; ПО – программное обеспечение.	

**Внешние и внутренние интерфейсы.** Различные способы взаимодействия системы со своим окружением, в том числе с другими системами, происходят на ее границах, которые называются *внешними интерфейсами* [3]. Определение

и контроль внешних интерфейсов – обязанность системотехника, потому что для этого необходимы знания как о системе, так и о её окружении. Надлежащий контроль интерфейсов – обязательное условие успешного функционирования системы.

Таким образом, управление интерфейсами – важная сторона системной инженерии. Он включает:

- 1) выявление и описание интерфейсов в целях определения общей концепции системы;
- 2) координацию работ и контроль интерфейсов для обеспечения целостности системы в ходе проектирования, изготовления и последующей модернизации.

Границы между компонентами внутри ТС устанавливают её *внутренние интерфейсы*. Задача их определения также возлагается на системного инженера, потому что её нельзя отнести к сфере ответственности инженеров, проектирующих компоненты. Следовательно, определение и реализация внутренних интерфейсов включают поиск компромиссов применительно к конструкции компонентов, которые они соединяют.

**Взаимодействия.** Взаимодействие между двумя элементами системы осуществляется с помощью соединяющего их интерфейса. Так, интерфейс между руками водителя и рулевым колесом позволяет водителю направлять автомобиль в нужную сторону (взаимодействовать с ней), прилагая усилия к рулю и через него к колесам. Интерфейс между шинами и дорогой позволяет автомобилю двигаться вперед и поворачивать за счет сцепления с дорогой, а заодно защищает корпус машины от неровностей дорожного полотна.

Приведенные примеры показывают, как функциональные взаимодействия (изменение направления и приведение в движение) определяются физическими взаимодействиями (поворачивание руля, а значит, и ведущих колес), которые передаются через физические интерфейсы. На рисунке 3.11 изображены аналогичные отношения между физическими интерфейсами для управления летательным аппаратом и соответствующими функциональными взаимодействиями.

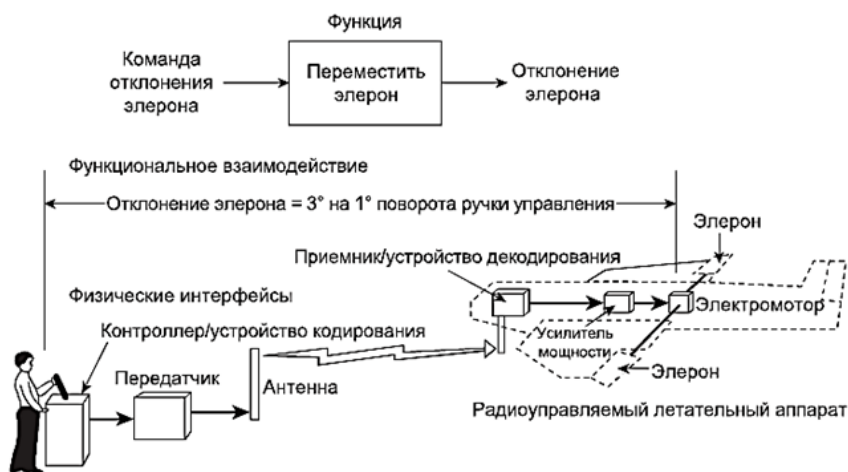


Рисунок 3.11 – Функциональные взаимодействия и физические интерфейсы

Важное, но иногда недооцениваемое внешнее взаимодействие осуществляется во время технического обслуживания и ремонта системы. Эта деятельность по необходимости требует доступа к различным системным функциям в целях их проверки на соответствие установленным требованиям. Следовательно, необходимо предусмотреть специальные контрольные точки, к которым можно подключиться с внешней стороны при минимуме манипуляций. В некоторые сложные системы включается широкий набор встроенных средств контроля, которые могут проводить техническую диагностику во время нормального функционирования системы. Определение таких интерфейсов – ещё одна задача системного инженера.

**Проблема внешней и внутренней совместимости.** Синтез систем, и особенно общая концептуализация, значительно облегчается, если входы и выходы системы описаны с достаточной полнотой и технической точностью [1].

Это станет понятно, если представить синтез как процесс согласования, в котором система, рассматриваемая как своего рода многофункциональный преобразователь, согласует множество входов с множеством желательных выходов (рисунок 3.12). Если перечни входов и выходов достаточно полны и точны, то они будут подсказывать, как выделять подсистемы, пока, наконец, проектировщик не увидит, что данное подмножество входов преобразуется желательным способом при помощи уже известного функционального устройства.



Рисунок 3.12 – Обобщённая схема согласования входов и выходов

Иными словами, коль скоро синтез есть согласование проектировщиком его запаса моделей и заранее изученных преобразователей с множеством данных входов и выходов, то систематический метод для правильного описания входов и выходов будет облегчать поиски ответа. Так как этот процесс применим в равной мере к системам (внешняя совместимость, или совместимость ТС с факторами среды) и подсистемам (внутренняя совместимость, или совместимость подсистем технической системы друг с другом), то мы имеем право сказать, что синтез состоит в выделении и проектировании однофункциональных преобразователей и путей связи между ними.

Проблему совместимости можно сформулировать точнее следующим образом (рисунок 3.13). Имеются две подсистемы  $A$  и  $B$  и требуется, чтобы некоторая информация переходила от  $A$  к  $B$ , т.е. требуется построить большую систему  $AB$ . Системы могут быть любого рода.

*Например, пусть  $A$  – профессор, а  $B$  – группа студентов или наоборот; или пусть  $A$  – космический корабль, а  $B$  – наземный центр; или пусть  $A$  – рекламодатель, а  $B$  – его желательный рынок. Задача согласования интерфейсов гласит: каковы технические условия, при которых  $B$  может эффективно принимать информацию от  $A$ ?*

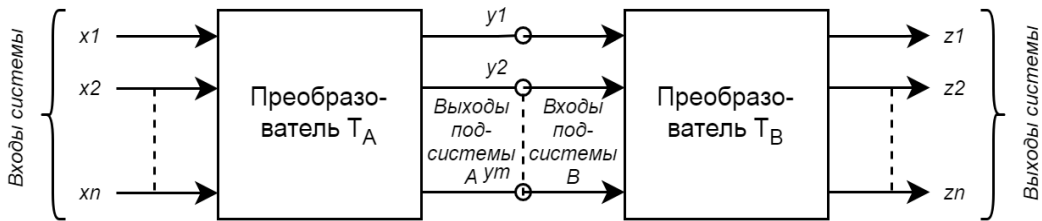


Рисунок 3.13 – Проблема совместимости

Система  $A$  передает сообщения системе  $B$  кодированными сигналами. Эти сигналы обладают определенным набором свойств. Для того чтобы две системы  $A$  и  $B$  были совместимы, значение каждого свойства сигналов, передаваемых системой  $A$ , должно совпадать со значением соответствующего свойства, которое система  $B$  может воспринимать, в пределах, установленных критериями качества работы (например, техническими стандартами). Если эти условия не выполнены, то системы называются несовместимыми и между  $A$  и  $B$  необходимо поместить преобразователь, согласующий несовместимые свойства друг с другом. Техническое описание несогласованных свойств включает требования к желательным преобразователям между входами и выходами.

Анализ проблемы совместимости поэтому естественно начинать с вопросов о каждом таком свойстве. Объем проектной работы определяется числом, видами и величинами несогласованностей. Затем идут другие вопросы, например о правильном физическом размещении нужных преобразователей. Положение каждого преобразователя зависит от технологии, экономики и других факторов. Но в принципе, преобразователи можно либо поместить на одном из концов канала, соединяющего  $A$  и  $B$ , либо поделить между двумя концами, либо разбросать группами в ряде точек канала, либо распределить непрерывно вдоль него.

Заметим, что необходимо описать два множества свойств на входе и два на выходе. На входе необходимо описать свойства входных сигналов и свойства, которые способна воспринимать входная сторона преобразователя. Можно предложить систематический метод для правильного описания свойств сигналов. Но число комбинаций этих свойств столь велико, что нет надежды составить полный список заранее проанализированных преобразователей. Поэтому в настоящем разделе остановимся на описании свойств сигналов, а в следующем рассмотрим лишь некоторые классы

преобразователей, чтобы дать известное понятие о синтезе посредством согласования.

**Интерфейсные элементы.** Для систематизации подхода к выявлению внешних и внутренних интерфейсов удобно выделить среди них три типа:

1) соединители, которые обеспечивают передачу электрических сигналов между компонентами;

2) изоляторы, которые блокируют такие взаимодействия;

2) преобразователи, которые изменяют характер среды взаимодействия. Подобные интерфейсы реализуются в виде составных частей компонентов или субкомпонентов, которые можно представлять как интерфейсные элементы.

В таблице 3.9 перечислен ряд характерных интерфейсных элементов каждого из трех типов для каждой из четырех сред взаимодействия, а именно: электрической, механической, гидравлической и человекомашиной.

Таблица 3.9 – Примеры интерфейсных элементов

Тип интерфейса	Физическая среда (средство взаимодействия)			
	Электрическая (ток)	Механическая (усилие)	Гидравлическая (жидкость)	Человеко-машинная (информация)
Соединитель	Кабельный переключатель	Шарнирное соединение	Задвижка трубопровода	Управляющая индикаторная панель
Изолятор	Радиочастотная защита	Амортизационная подвеска	Прокладка	Защитная крышка
Преобразователь	Аналого-цифровой преобразователь	Шток, присоединенный к блоку шестерен	Насос с редукционным клапаном	Клавиатура

Функция установления или разрыва соединения между двумя компонентами (то есть разрешения или запрета взаимодействия между ними) должна рассматриваться как важный элемент проектного решения, часто включаемый в состав средств управления системой.

Функция соединения несмежных компонентов системы кабелями, трубами, рычагами и т.д. зачастую не является частью какого-то одного компонента системы. Несмотря на их пассивную природу, таким «проводящим» элементам следует уделять особое внимание на уровне системы, чтобы быть уверенным, что их интерфейсы верно сконфигурованы и сконфигурированы.

Относительная простота интерфейсных элементов не умаляет их роли в обеспечении функционирования и надежности системы. Опыт показывает, что сбои системы в значительной степени происходят именно в интерфейсах. Обеспечение совместимости и надежности интерфейсов – зона особой ответственности системного инженера.

**Человекомашиный интерфейс.** Учитывая свойства проектируемых ТС, в частности ЭРЭС, в самостоятельную группу выделяется система «человек–машина».



Сопряжение свойств человека-оператора и ТС происходит через человеко-машинный интерфейс, от качества которого зависит качество функционирования системы «человек–машина». Создание высокоэффективных человеко-машинных систем (которые являются частью более сложных эргатических систем) является целью эрго-дизайна ТС [20].

---

***Эргодизайн** – научно-техническое направление, предметом изучения которого является деятельность, направленная на формирование у проектируемого объекта таких свойств, которые обеспечивают при взаимодействии с ним человека функциональный комфорт и придают ему большую эстетическую ценность. Объектами эргодизайна являются процесс и средства деятельности (внешние и внутренние), а также условия её протекания (санитарно-гигиенические, социокультурные, психологические и т.п.).*

***Эргатическая система** – сложная система управления, в состав которой входит человек-оператор (или группа операторов), например система управления космическим кораблем, диспетчерская служба аэропорта, вокзала, морского порта и др. [20]*

---

У человеко-машинных систем должен быть комплекс эргодизайнерских показателей конструкции, которые можно разделить на три класса: гигиенические, антропометрические и физиолого-психологические, они в свою очередь делятся на группы (таблица 3.10).

Таблица 3.10 – Эргодизайнерские показатели

Гигиенические	Антропометрические	Физиолого-психологические
Освещенность	Компоновка	Статические
Тепловой баланс	Достигаемость рабочих органов	и динамические нагрузки
Уровень шумов и вибраций	Конструкционные характеристики (размеры, форма)	(скоростные и силовые)
Уровень электромагнитных полей	Соотношение объема и пространства	Зрительные
Уровень ионизации	Пропорциональность и симметричность конструкции	Слуховые
Токсичность	Композиционно-гармонические	Одорантные
Климатический комфорт		Эмоциональные
		Тактильные
		Информационные

Требования, предъявляемые к человеко-машинным системам (применительно к электронной аппаратуре следует иметь в виду также человекоприборные или человекоаппаратные системы), регламентируются нормативными документами – законами (закон РФ «О сертификации продукции и услуг» и др.), государственными и отраслевыми стандартами, санитарными нормами и правилами.

---

Так, в СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» изложены базовые требования, которые должен учитывать проектировщик при разработке современных вычислительных систем.

– Требования к ПЭВМ.

– Требования к помещениям для работы с ПЭВМ.

– Требования к микроклимату, содержанию аэроионов и вредных химических веществ в воздухе на рабочих местах, оборудованных ПЭВМ.

– Требования к уровням шума и вибрации на рабочих местах, оборудованных ПЭВМ.

– Требования к освещению на рабочих местах, оборудованных ПЭВМ.

– Требования к уровням электромагнитных полей на рабочих местах, оборудованных ПЭВМ.

– Требования к визуальным параметрам ВДТ, контролируемым на рабочих местах.

– Общие требования к организации рабочих мест пользователей ПЭВМ.

– Требования к организации и оборудованию рабочих мест с ПЭВМ для взрослых пользователей.

– Требования к организации и оборудованию рабочих мест с ПЭВМ для обучающихся в общеобразовательных учреждениях и учреждениях начального и высшего профессионального образования.

– Требования к оборудованию и организации помещений с ПЭВМ для детей дошкольного возраста.

– Требования к организации медицинского обслуживания пользователей ПЭВМ.

– Требования к проведению государственного санитарно-эпидемиологического надзора и производственного контроля.

Знание и учет перечисленных показателей и требований необходим уже на ранних стадиях проектирования электронной аппаратуры, будь то персональный компьютер или распределенная вычислительная система.

---

Одним из основных направлений эргономического исследования является анализ психофизиологической сущности функциональной деятельности человека-оператора. Наиболее характерной особенностью деятельности оператора является то, что он лишен возможности непосредственно наблюдать за управляемыми объектами и вынужден пользоваться информацией, поступающей к нему по каналам связи.

Восприятие информации человеком-оператором осуществляется органами чувств, которые для него служат «входами» (в смысле человека-оператора как биологической системы, представляемой моделью «черного ящика»). «Выходами» для человека-оператора служат органы речи и двигательные реакции, которые также несут определённое количество информации. Учитывая это, человека-оператора можно представить в виде сложной системы, предназначенной для приёма, переработки и выдачи информации и охваченной обратными связями (рисунок 3.14).

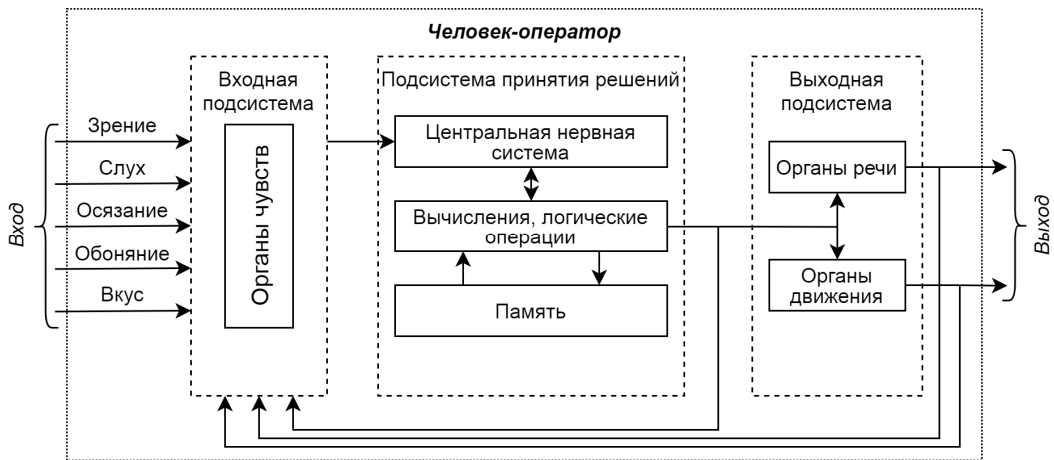


Рисунок 3.14 – Функциональная схема человека-оператора в управляющей системе

Каждый из блоков системы человек-машина характеризуется двумя важнейшими параметрами: временем реакции  $\tau_1$  и вероятностью получения правильного результата  $P$ . Правомерность принятия конкретного значения  $P_i$  для каждого из блоков связана с тем, что, во-первых, информация, получаемая человеком, не всегда может быть исчерпывающей, во-вторых, она по-разному воспринимается людьми, в-третьих, целенаправленные действия человека не всегда выполняются безошибочно и, в-четвертых, часто человеку-оператору приходится иметь дело не с реальными объектами, а с их моделями.

Объём информации, перерабатываемой и хранящейся в модели, и правила её организации должны соответствовать задачам и способам управления. Наиболее существенной особенностью работы человека с информационной моделью является необходимость определения степени соответствия сведений, получаемых с помощью приборов, экранов, табло, как между собой, так и с реальными управляемыми объектами. Именно на основании этого анализа строится вся деятельность человека-оператора.

Приведенное описание деятельности человека-оператора позволяет сформулировать основные требования к ее обеспечению на каждом из этапов, но для проектирования системы важна также количественная оценка тех или иных характеристик каждого из этапов.

Время реакции человека-оператора складывается из времен реакции на каждом из этапов его функциональной деятельности. Общее время *сенсомоторной реакции* – это время, затраченное на выполнение определенного вида реакции (движения или голосовой реакции) в ответ на внезапно появляющийся сигнал с максимально возможной для человека скоростью. Для упрощения расчетов принято, что время задержки в этом случае складывается из латентного периода реакции – времени от момента появления сигнала до начала ответного действия (таблица 3.11), и длительности моторного действия – времени ответного действия (таблица 3.12).

Таблица 3.11 – Сравнительные характеристики анализаторов человека-оператора

Анализатор	Латентный период, с
Тактильный (прикосновение)	0,09–0,22
Болевой (укол)	0,03–0,2
Слуховой (звук)	0,12–0,18
Зрительный (свет)	0,15–0,22
Обонятельный (запах)	0,31–0,39
Температурный (тепло-холод)	0,28–1,6
Вестибулярный (вращение)	0,4–0,8
Вкусовой:	
– горький	1,08
– сладкий	0,45
– кислый	0,54
– соленый	0,31

Таблица 3.12 – Некоторые характеристики времени и безошибочности действий человека

Наименование действия	Математическое ожидание, с	Среднее квадратичное отклонение, с <sup>2</sup>	Вероятность
Обнаружение и декодирование сигнала	1,63	0,70	0,9700–0,9999
Поиск и декодирование заданного сигнала	4,10	1,52	–
Поиск органов управления и осуществление заданного управляющего воздействия	5,50	2,04	0,9610–0,9850
Обнаружение сигнала и принятие решения	8,40	3,30	0,9380–0,9780
Выполнение управляющего воздействия, состоящего из нескольких действий	3,50	2,32	–
Приём информации и её оценка:			
– число воспринимаемых признаков 3–5, задержка во времени появления 10–12 с	26,40	11,50	0,8750–0,9950
– число воспринимаемых признаков 5–6, задержка во времени появления 15–40 с	81,0	24,0	0,4470–0,7830
– число воспринимаемых признаков 1–2, задержка во времени появления 10–12 с	20,50	8,76	0,8550–1,0000
Проверка логического условия типа ИЛИ	0,3	0,1	0,9960
Нажатие кнопки	0,2	0,003	0,9999
Считывание информации с табло	0,3	0,002	0,9950–0,9995

### Окончание таблицы 3.12

Наименование действия	Математическое ожидание, с	Среднее квадратичное отклонение, с <sup>2</sup>	Вероятность
Включение тумблера	0,2	0,1	0,9990–0,9995
Простые реакции по преобразованию информации (прямое, кратковременное и оперативное запоминание)	1,5	0,6	0,9995
Выдача и приём речевой команды	4,0	2,0	0,9998

Взаимодействие человека-оператора с управляющей системой осуществляется поэтапно (см. рисунок 3.14).

На *первом этапе* (восприятие информации) человек-оператор доступными ему анализаторами (см. таблицу 3.11) выполняет обнаружение объекта восприятия, выделение в объекте отдельных признаков, ознакомление с выделенными признаками и распознавание объекта восприятия. Важным параметром, характеризующим способность человека-оператора воспринимать поступающую информацию, является возможная скорость переработки информации (бит/с). Максимальная пропускная способность человека по восприятию информации не превышает 40 бит/с, а номинальная пропускная способность составляет 2–6 бит/с (для сравнения: средняя пропускная способность телевизионного канала 30000 бит/с, а сетевого – несколько гигабит).

Пропускная способность человека-оператора связана с темпом (скоростью) поступления информации от вычислительной системы. Низкий темп поступления информации проявляется в снижении активности человека-оператора. Высокий темп, наоборот, приводит к резкому росту ошибок и отказу человека-оператора от выполнения задачи. Пропускная способность человека-оператора зависит также от условий работы и от того, насколько полно они соответствуют психофизиологическим и антропометрическим характеристикам.

На *втором этапе* (оценка информации и принятие решений) время анализа и принятия решений складывается из целого ряда субъективных данных, таких как личностные характеристики умственных возможностей человека-оператора, параметры памяти, его опыт и навыки, которые трудно поддаются количественным оценкам (таблица 3.13).

На *третьем этапе* (реакция на информацию) определяющей составляющей во времени реакции является длительность моторного действия, которая труднее, чем латентный период, поддается измерению, так как зависит от многих случайных факторов (места нахождения человека-оператора в момент приёма информации, его позы, степени усталости и т.п., формы пульта управления, расположения органов управления, уровня образования и опыта работы человека-оператора и т.д.). Большинство данных параметров носит субъективный характер. Их трудно оценить численно, поэтому длительность моторного действия определяется статистически на моделях или макетах тех или иных устройств с участием человека.

Таблица 3.13 – Характеристики умственной деятельности человека

Долго-временная память (long-term memory - LTM)	Рабочая память (working memory – WM)				
$\delta_{LTM} = X$ , $\mu_{LTM} = X$ , $K_{LTM} =$ семантический	$\mu_{WM} = 7(5-9)$ цепочек, $\delta_{WM} = 7(5-226)$ с, $\delta_{WM}$ (1 цепочка) = $7(5-34)$ с, $K_{WM} =$ Акустическая или визуальная				
	Обработка визуальной информации – Visual Image Store (VIS)	Обработка звуковой информации – Auditory Image Store (AIS)	Нейрообработка	Познавательная обработка (приобретение знаний)	Моторная реакция
	$\delta_{VIS} = 200$ (70–1000) мс, $\mu_{VIS} = 17$ (7–17) знаков, $K_{VIS} =$ физический	$\delta_{AIS} = 1500$ (900–3500) мс, $\mu_{AIS} = 5$ (4,4–6,2) знаков, $K_{AIS} =$ физический	$\tau_p = 100$ (50–200) мс	$\tau_p = 70$ (25–170) мс	$\tau_p = 100$ (30–100) мс
Примечание: $\delta$ – время стирания информации; $X$ – индивидуальный показатель; $\mu$ – емкость памяти; $K$ – характер исполнительного органа					

Диалог с вычислительной системой накладывает требования, которые во многом определяются уровнем нервно-психологической нагрузки на человека-оператора (таблица 3.14).

Таблица 3.14 – Характеристики нервно-психологической нагрузки на человека

Характеристики нервно-психологической нагрузки человека-оператора по вниманию			
Интенсивность нагрузки	Количество одновременно наблюдаемых объектов, шт.	Время сосредоточенного наблюдения относительно продолжительности смены, %	Частота сигналов, $ч^{-1}$
Легкая	До 5	До 25	До 75
Средняя	5–10	25–50	75–175
Тяжелая	10–25	50–75	175–600
Очень тяжелая	Более 25	Более 75	Более 300
Легкая	До 1	До 75	18–15
Средняя	1–0,3	75–90	15–6

Окончание таблицы 3.14

Характеристики нервно-психологической нагрузки человека-оператора по анализаторным функциям			
Интенсивность нагрузки	Размеры объекта наблюдения (учитывается и при установке разрешения на мониторе), мм	Время пассивного наблюдения относительно продолжительности смены, %	Отношение звукового сигнала и шума, дБ
Тяжелая	0,3–0,15	90–95	6–0
Очень тяжелая	Менее 0,15	Более 95	0–5

Если время ответа значительно превышает 2 с, функции, которые человек хочет или может выполнить, изменяются. Человек должен изменить свой ритм работы, как пришлось бы, например, изменить привычку набирать телефонный номер, если бы требовалась задержка между набираемыми цифрами. Как выяснил эксперт по времени ответа Р.Б. Миллер, если задержки превышают критическое значение, то начинаются случайные спады в умственной деятельности, которые можно рассматривать как прерывания, снижающие психологическую деятельность человека.

Кратко рассмотрим некоторые физиолого-психологические характеристики человека-оператора: зрительные, слуховые, тактильные и информационные.

*Зрительное восприятие* обеспечивает возможность различать форму, цвет, яркость и движение. Установлено, что 80% информации человек получает с помощью органов зрения. Глаз среднего человека способен воспринимать электромагнитное излучение длиной волны 380–780 нм. Способность человека воспринимать информацию зрением характеризуется чувствительностью, полем зрения обоих глаз, остротой зрения, аккомодацией, адаптацией, конвергенцией, цветовым восприятием, стробоскопичностью и стереоскопичностью.

*Слуховое восприятие* обеспечивает человеку-оператору прием звуковых колебаний. Слух человека способен воспринимать звуковые колебания в частотном диапазоне от 16 до 20 000 Гц. Колебания с частотами ниже 16 Гц относятся к *инфразвуку*, а с частотами выше 20 000 Гц – к *ультразвуку*.

Степень восприятия звука ухом человека зависит от частоты, энергетической характеристики звукового поля и состояния слухового аппарата человека в данный момент времени. Громкость – субъективный аналог интенсивности звука, оцениваемой в единицах звуковой энергии ( $\text{Вт}/\text{см}^2$ ) или в относительных единицах – децибелах (дБ). Субъективная усредненная оценка действия звука с частотой 1 кГц на человека-оператора находится в интервале от порога слышимости (с уровнем 0 дБ, или  $10^{-12} \text{ Вт}/\text{м}^2$ ) до болевого порога (с уровнем 130 дБ, или  $10^2 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ).

*Тактильная чувствительность* – способность человека воспринимать механические раздражения кожи через нервные окончания, расположенные на ее поверхности. При легком касании к предмету появляется чувство прикосновения, при более сильном – давления, при очень сильном – боли. Кожа ладоней рук и кончиков пальцев относится к числу наиболее восприимчивых к внешним механическим раздра-

жениям участков тела человека. Как и другие органы чувств, тактильная чувствительность зависит от ряда объективных и субъективных факторов. Так, она повышается при нагревании кожи и уменьшается при ее охлаждении. При продолжительной неизменной стимуляции тактильная чувствительность может адаптироваться к определенным раздражителям. В этом случае характерные ощущения не возникают.

Под *психологическими* характеристиками человека-оператора понимают состояния, вызванные переживанием человека, его отношением к внешнему миру и к самому себе. Они определяются изменениями количественных и качественных параметров реакций на воздействия внешней среды. Психологическое (эмоциональное) состояние тесно связано с индивидуальной семантической значимостью поступающей к человеку информации и являются как бы коррекцией, вносимой человеком в ответ, определяемый только информационной структурой раздражителя.

К *внешним эмоциогенным факторам* относятся прежде всего так называемые экстремальные факторы, физические или информационные характеристики которых ведут к развитию крайней степени напряжения физиологических и психологических функций с полным исчерпанием всех физиологических резервов. Чем более выражена экстремальность фактора, тем выше вероятность появления выраженных степеней эмоциональных сдвигов. Характер этих сдвигов определяется видом реакции, развивающейся в результате воздействия. В случае формирования адекватной реакции, т.е. реакции, направленной на преодоление действий фактора или на поддержание необходимого уровня деятельности при продолжении экстремальности, как правило, наблюдается та или иная степень эмоционального напряжения.

Приведем краткую сравнительную характеристику человека и машины (таблица 3.15). Специалисты по инженерной и технической психологии создали ориентировочные списки основных показателей, по которым сравнивают человека и машину. Предлагаемая таблица составлена на основе нескольких таких списков.

Таблица 3.15 – Сравнительная характеристика человека и вычислительной машины

Показатели, по которым человек превосходит машину	Показатели, по которым машина превосходит человека
Обнаружение полезных сигналов, имеющих очень низкий энергетический уровень	Предостережение (как человека, так и машины)
Чувствительность к чрезвычайно широкому диапазону стимулов	Выполнение однообразных чрезвычайно точных операций
Опознавание образов и их обобщение	Способность очень быстро реагировать на управляющие сигналы
Обнаружение сигналов при высоких уровнях шумов	Плавное и точное приложение больших усилий
Способность хранить большое количество информации в течение длительного времени и вспоминать полезные сведения в нужный момент времени	Хранение и использование большого количества информации в течение кратковременного периода



Окончание таблицы 3.15

Показатели, по которым человек превосходит машину	Показатели, по которым машина превосходит человека
Способность выносить суждения при неполной информации о событиях	Выполнение сложных вычислений быстро и с большой точностью
Нахождение и использование эвристических методов решения	Чувствительность к стимулам, лежащим за пределами чувствительности человека (инфракрасное излучение, радиоволны и т.д.)
Способность реагировать на непредвиденные маловероятные события	Одновременное выполнение разнообразных действий
Проявление оригинальности в решении проблем	Дедуктивные процессы
Способность учитывать прошлый опыт и менять способ действия	Нечувствительность ко многим посторонним факторам
Способность выполнять тонкие операции, особенно в непредвиденных ситуациях	Способность в течение длительного периода быстро и точно повторять однообразные операции
Способность продолжать действия даже в условиях перегрузки	Действие в условиях вредных или вообще невыносимых для человека

**Требования к интерфейсам.** Итак, интерфейс необходим для установления связи между двумя функциями или процессами в системе. Из вышеизложенного следует, что существуют разные типы интерфейсов: механические, электрические, электронные, передачи данных, человеко-машинные и др. В системе выделяют внешние и внутренние интерфейсы, т.е. элементы, разделяющие функциональные части системы на компоненты [21].

Требования системного уровня к внешним интерфейсам установлены вместе с другими требованиями системного уровня. То есть требования к внешним интерфейсам, как и другие функциональные и эксплуатационные системные требования, распределяются по подсистемам через исходные данные, производные или вниз по потоку.

Внешние интерфейсы образуют границы между системой и окружением. Для уточнения целей интерфейсов полезно задать следующие вопросы о каждой границе системы:

- что система делает для окружающего мира;
- что окружающий мир делает для системы;
- что самое худшее может случиться через этот интерфейс;
- может ли интерфейс измениться в ходе разработки системы;
- может ли интерфейс измениться после того, как система начнёт эксплуатироваться?

Требования к внутренним интерфейсам отличаются тем, что они создаются в рамках декомпозиции системы. Различные решения системы, то есть различные распределения требований, будут создавать разные подсистемы и разные интерфейсы подсистем. Это порождает дополнительные задачи интеграции системы и одно-

временно предоставляет возможность команде разработчиков оптимизировать конструкцию системы.

Требования к интерфейсам должны удовлетворять определенным правилам для использования задаваемых функций.

1. Интерфейсы возникают как между подсистемами, так и между подсистемами и системой.

2. Функции, характеристики, ограничения и допущения интерфейсов должны быть определены и зафиксированы в требованиях к интерфейсам.

3. Должен быть определен владелец каждого интерфейса, даже если это очевидно.

4. Требования к интерфейсу определяют функциональные, физические, характеристические, электрические, экологические, человеческие требования и ограничения, которые существуют на общей границе между двумя или более функциями, элементами системы, элементами конфигурации или систем.

5. Требования к интерфейсу включают логические и физические интерфейсы.

6. Требования содержат по мере необходимости физические измерения, определения последовательностей передачи энергии или информации, а также все другие значимые взаимодействия между элементами. Например, коммуникационные интерфейсы связаны с движением и передачей данных и информации внутри системы и между системой и окружающей средой. Оценка требований связи включает определение структурных компонентов коммуникаций (например, полосы пропускания, скорость передачи данных, распространения и т.п.) и требования к содержанию (какие данные/информация передаются, что движется между системными компонентами и критичность этой информации для функций системы).

7. Требования к интерфейсу могут быть получены из функционального распределения, если функциональные входы и выходы определены.

Примером внешнего интерфейса является интерфейс между космическим аппаратом и его ракетой-носителем. Ракета-носитель уже существует, и спутник разработан для стыка существующих интерфейсов (электрических, шины обмена данными, термических и механических, вибрационных и акустических).

А для системы радара дистанционного зондирования Земли (из космоса) интерфейс между подсистемой радарного датчика и подсистемой обработки данных является внутренним. Команда разработчиков имеет возможность определять интерфейсы механические, электрические, тепловые и шины между этими подсистемами.

8. Функциональные и ресурсные распределения по подсистемам влияют на требования интерфейса. В качестве примера рассмотрим сжатие данных. Эта функция может быть выделена в радиолокационной подсистеме, подсистеме обработки данных или даже в подсистеме связи. Так, оптимальная декомпозиция системы рассматривается в рамках требований не только подсистем, но и их интерфейсов.

Требования к интерфейсам как часть системных требований должны быть идентифицированы во время определения системных решений. Они фиксируются в моделях функциональной и физической архитектурой, уточняются на собраниях заинтересованных лиц. Когда системные требования декомпозируют по отдельным

подсистемам, существуют риски неверной интеграции расходящихся индивидуальных конструкций подсистем по интерфейсам. Необходимы регулярные междисциплинарные обзоры и проверки проекта, чтобы убедиться, что интерфейсы, определённые ранее, по-прежнему достижимы с точки зрения функциональности и производительности системы.

На рисунке 3.15 показаны некоторые распространённые типы стандартных интерфейсов.



*а*

*б*

Рисунок 3.15 – Примеры интерфейсов: *а* – механический; *б* – шины данных

### 3.2.5 Типология задач «черного ящика»

Рассмотрим подход к инженерному проектированию, задача которого состоит в том, чтобы найти систему или элемент, дающие определённый выход (результат) при заданном воздействии на их вход (рисунок 3.16). Как показано на рисунке, другие виды деятельности – науку и анализ – также можно описать аналогичным образом. Задача науки состоит в открытии законов природы, а задача анализа – в определении воздействия на входе системы для получения заданного выхода или определения выхода по заданному входному воздействию. Вследствие того что анализ связан главным образом с такими случаями, когда задан выход, процесс нахождения воздействия на входе при требуемом выходе называется *инверсным анализом*. Это краткое схематическое представление служит иллюстрацией основного различия между инженерным проектированием и другими видами научно-технической деятельности (таблица 3.16) [22].

Таким образом спектр задач системотехники не ограничивается указанным выше инверсным анализом. Полная типология задач «черного ящика» в области системотехники ЭРЭС может быть проиллюстрирована на примере простейшей модели технической системы в виде «черного ящика» с одним входом и одним выходом (таблица 3.17).

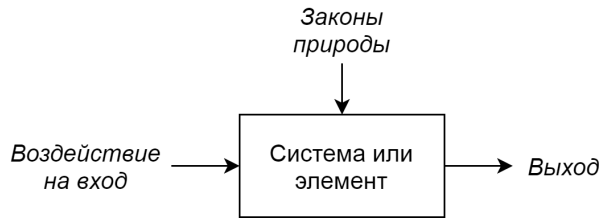


Рисунок 3.16 – Схема процесса инженерного проектирования в форме модели «черного ящика»

Таблица 3.16 – Составляющие процесса инженерного проектирования

Дано	Найти	Процесс
Воздействие на вход, законы природы, система или элемент	Выход	Анализ (дедукция)
Выход, законы природы, система, комплекс, устройство, функциональный узел или элемент	Воздействие на вход	Инверсный анализ
Воздействие на вход, выход, система или элемент	Законы природы	Научные исследования (индукция)
Воздействие на вход, выход, законы природы	Систему, комплекс, устройство, функциональный узел или элемент	Инженерное проектирование

Наиболее распространена четвертая задача, когда по известному входу и известному выходу системотехнику необходимо найти полное описание ТС согласно иерархии описаний (см. рисунок 1.2): целевую функцию, техническую функцию, функциональную структуру, физический принцип действия, техническое решение, проект.

Таблица 3.17 – Типология задач «черного ящика» для систем с одним входом и одним выходом

Вариант задачи	Вход	Система	Выход
1	Найти	Найти	Дано
2	Дано	Найти	Найти
3	Найти	Дано	Найти
4	Дано	Найти	Дано
5	Найти	Дано	Дано
6	Дано	Дано	Найти
7	Дано	Дано	Дано
8	Найти	Найти	Найти

Реальные задачи намного сложнее, так как проектировщик имеет дело с ТС, у которой несколько входов и выходов, а взаимосвязь между ними в общем случае не известна [23].

При постановке и анализе задач «черного ящика» возникает необходимость привлечения обширных знаний из самых разных научно-технических областей. С целью

облегченной и наглядной ориентации среди них системного инженера на рисунке 3.17 показано место, занимаемое системотехникой среди наук «слабой» (неформализованных и нестрогих) и «сильной» (формализованных и строгих) версий.

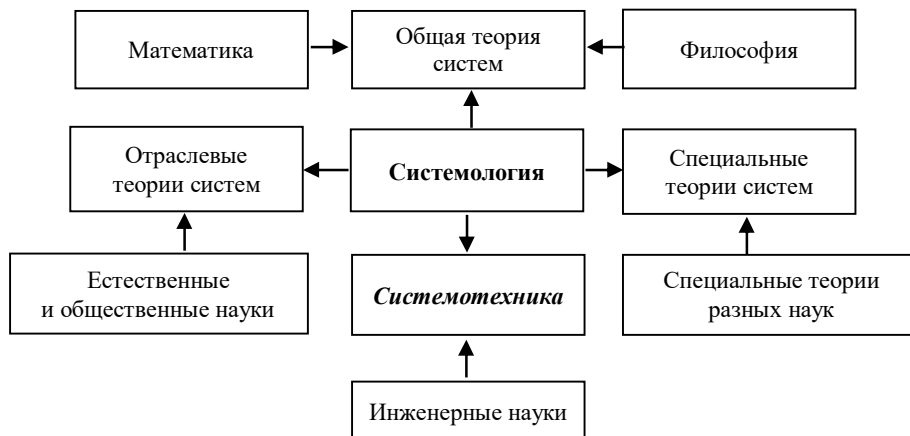


Рисунок 3.17 – Место системотехники среди наук «слабой» и «сильной» версий

**Радиотехника и смежные дисциплины.** Системотехника является междисциплинарной отраслью. В процессе проектной деятельности системотехник должен уметь самостоятельно ориентироваться в предметных областях смежных наук. Эту работу значительным образом облегчают карты предметных областей смежных наук. В таблице 3.18 приведены сведения о тринадцати главных смежных областях радиотехники [24].

Однако область интересов инженера-системотехника этими дисциплинами не ограничивается. Среди других многочисленных и не менее важных отраслей науки и техники, с которыми должен быть знаком системотехник, находятся системная логика, теория вероятностей, математическая статистика, теория моделирования, линейное и динамическое программирование, теория массового обслуживания, теория игр, техническая психология и т.д. [9, 17].

Таблица 3.18 – Карта смежных дисциплин радиотехники и их краткая характеристика [24]

Дисциплина	Характеристика дисциплины	Разделы дисциплины	Характеристика разделов
Акустика	Наука о звуке и колебаниях упругих сред	Физическая	Изучает особенности распространения акустических волн в жидкой, твердой и газообразной средах, их взаимодействие с веществом
		Физиологическая	Изучает устройство и работу звуковоспринимающих и звукообразующих органов у человека и животных
		Архитектурная	Изучает законы распространения звуковых волн в закрытых (полуоткрытых, открытых) помещениях, отражение и поглощение звука поверхностями, влияние отражённых волн на слышимость речи и музыки, методы управления структурой звукового поля, шумовыми характеристиками интерьеров и т. п.
		Акустоэлектроника	Область функциональной электроники, в которой используются акустические и электроакустические явления в пьезоэлектриках (прямой и обратный пьезоэффекты, магнитострикция) для создания функциональных элементов радиоэлектронных систем
		Акустооптика	Область акустоэлектроники, связанная с дифракционными решетками, образцованными акустическими колебаниями и волнами в оптически прозрачных средах
		Электроакустика	Изучает вопросы формирования звука с помощью электронных технических средств; ультразвук, который используется в промышленности для обработки материалов и контроля качества производства продукции, в медицине для лечения и диагностики внутренних органов и тканей
			На основе электроакустики создана прикладная отрасль – звукотехника, связанная с разработкой аппаратуры для передачи, записи, воспроизведения речевых и музыкальных программ
		Гидроакустика	Исследует излучение, прием, генерирование и распространение акустических волн в водном пространстве
		Биоакустика	Изучает звукоизлучение и звукоприемление органов человека и животных, проблемы передачи и приема речи, действие акустических волн на биологические объекты

Продолжение таблицы 3.18

Дисциплина	Характеристика дисциплины	Разделы дисциплины	Характеристика разделов
Бионика	Наука, которая решает инженерно-технические задачи (в том числе радиотехнические) на основе анализа жизнедеятельности живых организмов. Прикладная наука о применении в технических устройствах и системах принципов организации, свойств, функций и структур живой природы, то есть о формах живого в природе и их промышленных аналогах. Различают биологическую, теоретическую и техническую бионику. В переводной литературе чаще употребляется термин «биомиметика»		
Кибернетика	Наука об общих законах управления информацией, её получения и обработки. Теоретическое ядро кибернетики составляют теории информатики, алгоритмов, оптимального управления, распознавания образов. Основные объекты исследования – кибернетические системы, представляющие множество информационно взаимодействующих элементов	Техническая  Экономическая  Биологическая  Военная	Изучает технические системы управления. Областью технической кибернетики является радиоавтоматика. Её основой является теория автоматического управления, изучающая способы построения автоматических систем и качество их функционирования  Научное направление кибернетики, которое занимается приложением ее идей и методов к экономическим системам. В расширенном смысле под экономической кибернетикой понимают область науки, возникшую на стыке математики и кибернетики с экономикой, включая математическое программирование, исследование операций, экономико-математические модели, эконометрику и математическую экономику. Экономическая кибернетика рассматривает экономику, а также её структурные и функциональные части как сложные системы, в которых протекают процессы регулирования и управления, реализуемые движением и преобразованием информации  Научная дисциплина, в которой идеи и методы кибернетики применяются для изучения процессов саморегуляции в биологии и физиологии. Биологическая кибернетика изучает закономерности управления, хранения, переработки и передачи информации в живых системах  Научная дисциплина, в которой идеи и методы кибернетики применяются для решения военных задач

Продолжение таблицы 3.18

Дисциплина	Характеристика дисциплины	Разделы дисциплины	Характеристика разделов
Радиоастрономия	Раздел астрономии, в котором изучаются космические объекты на основе наблюдения их радиозлучения или поглощения, а также с помощью радиондирования	Солнечная Планетарная Галактическая Внегалактическая	Исследование физических параметров небесных тел или их скоплений, таких как Солнце, планеты, астероиды, радиогалактики, пульсары, квазары и т.д. Поиск сигналов внеземных цивилизаций (SETI – Search Extraterrestrial Intelligence)
Радиобиология	Наука о действии всех видов ионизирующих излучений на живые организмы, в том числе электромагнитных волн сантиметрового, миллиметрового, инфракрасного и ультрафиолетового диапазонов	Радиология Фотобиология, радиационная селекция	Поиск различных способов защиты организма от излучений, разработка путей использования ионизирующих излучений в медицине для диагностики и лечения Разработка путей использования ионизирующих излучений в генетике и сельском хозяйстве
Радиогеофизика	Раздел прикладной геофизики, совокупность методов разведки полезных ископаемых, которые базируются на изучении аномалий электромагнитных полей, определяющихся геoeлектрическим строением горных пород		



Продолжение таблицы 3.18

Дисциплина	Характеристика дисциплины	Разделы дисциплины	Характеристика разделов
Радиометеорология	Наука, которая изучает, с одной стороны, влияние метеоусловий в тропосфере и стратосфере на распространение радиоволн, а с другой – метеорологические явления в атмосфере по характеристикам радиосигналов, в том числе и от собственного излучения атмосферы, как теплового, так и обусловленного электрическими разрядами		
Радиоспектроскопия	Наука, изучающая строение вещества, а также физико-химические процессы в нем		
Радиофизика	Раздел физики, в котором изучаются физические основы радиотехники и электротехники, в том числе физические процессы, связанные с электромагнитными колебаниями в радиодиапазоне: их возбуждение, излучение, распространение, прием, преобразование, а также взаимодействие электрических и магнитных полей с носителями зарядов в вакууме, газах и твердых телах		
Радиохимия	Область химии, в которой изучаются свойства и физико-химические закономерности поведения радиоактивных изотопов, элементов и веществ, методы их выделения и концентрации		
Радиоэлектроника	Совокупность отраслей науки и техники, связанных с передачей, приемом и преобразованием информации с помощью электромагнитных волн		
Электроника	Научно-техническая область, связанная с исследованиями законов взаимодействия и других носителей зарядов с электромагнитными полями с целью создания электронных приборов, у которых это	Вакуумная	Охватывает вопросы, связанные с электронной эмиссией, формированием потоков электронов и управлением ими, формированием электромагнитных полей с помощью резонаторов, замедляющих систем, с физикой и техникой глубокого вакуума. Основное направление развития связано с созданием электровакуумных приборов: электронные лампы, прибор СВЧ (магнетроны, клистроны и т.д.), электронно-лучевых и фотоэлектронных приборов (кинескопов, видеоканов, фотоэлектронных умножителей), газовых приборов, рентгеновских трубок и т.д.
	Твердотельными полями с целью создания электронных приборов, у которых это	Твердотельная	Изучает свойства твердотельных материалов (полупроводниковых, диэлектрических, магнитных и т.д.), влияние на них примесей. Твердотельная электроника делится на полупроводниковую, связанную с разработкой и изготовлением различных приборов (диодов, транзисторов, интегральных схем, полупроводниковых матриц и т.п.);

Продолжение таблицы 3.18

Дисциплина	Характеристика дисциплины	Разделы дисциплины	Характеристика разделов
	взаимодействие используется для передачи, обработки и хранения информации, автоматизации производственных процессов, создания энергетических устройств, контрольно-измерительной аппаратуры, средств научного эксперимента и т.п.		акустоэлектронику; оптоэлектронику, магнитооптику; магнитоэлектронику; электро-теплоэлектронику; криоэлектронику; пьезоэлектронику; молекулярную электронику; моноэлектронику и т.д.
		Квантовая	Связана с разработкой способов усиления и генерации электромагнитных колебаний на основе вынужденного излучения атомов, молекул и твердых тел. Главным направлением её развития является разработка лазеров, квантовых усилителей, молекулярных генераторов
		Функциональная	Область электроники, в которой используется совокупность различных физических явлений в твердых телах, жидкостях и газах для формирования, хранения и обработки сигналов
Электротехника	Научно-техническая отрасль, связанная с использованием электрических и магнитных явлений для получения и преобразования электрической энергии		

### 3.2.6 Типы и характеристики избранных технических систем

Определим основные ТС, работа которых основана на физических принципах электроники, радиоэлектроники и радиотехники, представим их моделью «черного ящика», проведем классификацию и проанализируем их целевые и технические функции, параметры, характеристики и свойства.

К основным ТС относятся:

- радиотехнические системы;
- электроакустические и звуковещательные системы;
- измерительные системы;
- энергообеспечивающие системы;
- вычислительные системы;
- автоматические системы управления.

#### Радиотехнические системы

По информационному назначению радиотехнические системы делят на четыре основных класса [25]:

- передачи информации (системы радиосвязи, радиовещания, телевидения, ре-трансляции);
- извлечения информации (обнаружение и измерение – радиолокация, радионавигация, радиоастрономия, радиоизмерения, радиотехническая разведка и т.д.);
- радиотелеуправления (беспилотные летательные аппараты, ракетно-космическая техника и т.д.);
- разрушения информации (радиопротиводействие, радиоэлектронная борьба (РЭБ)).

В настоящее время широкое применение находят радиотехнические комплексы, состоящие из нескольких радиосистем, в которых для обработки информации и управления различными объектами используют мощные вычислительные компьютерные системы. К ним относятся системы спутниковой и космической связи, глобальные системы связи, системы контроля и управления воздушным движением, ракетные и космические комплексы и т.д.

Большинство РТС предназначено для доставки получателю определенной информации. Поэтому практически все РТС можно назвать информационными. Содержание информации, методы ее получения и использования различны, методы же обработки, представления и передачи в значительной степени являются общими. Во всех случаях приходится иметь дело с сообщением о каком-либо физическом процессе и принимаемым сигналом, отображающим сообщение, а также с естественной или искусственной помехой, искажающей принимаемый сигнал.

В РТС извлечения информации интересующая получателя информация не содержится в сигнале передатчика, а иногда передатчик в такой системе вообще отсутствует. В этих системах большей частью информация характеризует параметры трассы, по которой распространяются электромагнитные волны. Информацию несут

направление трассы, её длина, а также скорость изменения этих параметров во времени. По их значениям можно получать сведения о положении и характеристиках движения излучающих или отражающих объектов (радиолокационные системы, системы траекторных измерений). В других задачах информацией являются такие параметры трассы, как показатели поглощения и преломления (радиометеорологические системы, радиометрические системы). В некоторых случаях полезная информация заключается в самой структуре принимаемого радиосигнала (радиоастрономические и разведывательные радиосистемы).

Значительного развития достигли системы радиолокации, широко применяемые в комплексах военного и гражданского назначения. Особое место заняли сегодня также километровые (длинноволновые) и метровые (ультракоротковолновые) системы наземной и спутниковой навигации, без которых невозможно осуществлять безопасное мореплавание и полеты самолетов.

Системы радиотелеуправления предназначены для обеспечения движения летательных аппаратов по заданной траектории или в заданном районе. Такие системы широко применяют для решения задач дистанционного управления космическими объектами.

Радиосистемы разрушения информации служат для создания помех нормальной работе конкурирующей радиосистемы путем излучения мешающего сигнала или приёма, умышленного искажения и переизлучения сигнала.

Основной частью практически всех РТС является *радиотехнический канал* (радиоканал), состоящий из радиопередающего (передающего) и радиоприемного (приемного) устройства и линии связи. Упрощенно *передающим* называют устройство, преобразующее сообщение в передаваемый сигнал, а *приёмным* – устройство, преобразующее принятый сигнал в исходное сообщение. В пассивных РТС, например в теплотокаторах (ИК-пеленгаторах, тепловизорах), передающее устройство отсутствует.

Важной частью радиоканала системы связи является линия связи (среда распространения), которая оказывает существенное влияние на достоверность и качество принимаемого сообщения.

*Линией связи* называют физическую среду (космическое пространство, свободное пространство – воздух в нейтральном или ионизированном состоянии, земную поверхность, морскую воду, волноводы, кабели, волоконно-оптические линии и др.) и совокупность аппаратных средств, используемых для передачи сигналов от передатчика к приёмнику. Простейшая линия связи может представлять собой два провода, соединяющих передатчик и приёмник. В этом случае речь идет о проводной, например телефонной, связи. Сейчас осуществляют связь и без проводов – с помощью электромагнитных или световых волн (через световоды). В системах радиосвязи линией связи является, как правило, область пространства, в которой распространяются электромагнитные волны от передающего устройства к приёмному устройству.

Составными частями практически любой РТС являются также устройства питания, антенно-фидерные, электронно-вычислительные и другие устройства.

Основные задачи, решаемые радиосистемой при приеме информации:

- обнаружение сигнала на фоне помехи;
- различение сигналов на фоне помехи;
- оценка параметров сигнала;
- воспроизведение сообщения.

К *показателям качества РТС*, т.е. к совокупности количественных параметров, характеризующих основные свойства РТС, относят: точность воспроизведения сообщений; помехоустойчивость; помехозащищенность; разрешающую способность; скрытность действия; пропускную способность; электромагнитную совместимость; экологическую совместимость; дальность действия; надежность; массу и габаритные размеры; эффективность и пр.

Рассмотрим системы радиосвязи и радиолокационные системы (РЛС) более подробно по следующей схеме:

- определение, назначение и область применения;
- классификация;
- основные технические параметры, характеристики и свойства.

**Системы связи.** Системой связи называется совокупность технических средств для передачи сообщений от источника к потребителю.

Системы связи (радиосвязи) предназначены для передачи *сообщений* из одной точки пространства (местоположения) в другую через *канал связи*. При этом канал связи должен обладать определенными свойствами, в частности пропускать лишь заданную полосу частот, иметь одну или несколько несущих и т.д. Для решения задачи связи приходится осуществлять целый ряд преобразований сообщений (информации).

Системы связи содержат все основные устройства, применяемые в большинстве радиотехнических систем передачи информации. Иногда в понятие системы связи включают такие элементы, как источник сообщений и потребитель.

*По виду передаваемых сообщений* различают системы передачи информации (телефония); передачи данных, радиовещание, передачи подвижных изображений (телевидение); передачи текста (телеграфия); передачи неподвижных изображений, рисунков и текста (фототелеграфия); телеизмерения; телеуправления [25].

*По назначению* телефонные, радиовещательные и телевизионные системы делят на *вещательные*, отличающиеся высокой степенью качества воспроизведения сообщений, и *профессиональные*, имеющие специальное применение (служебная связь, промышленное телевидение и т.д.).

В системе телеизмерения физическая величина, подлежащая измерению (напряжение, температура, скорость и т.п.), с помощью датчиков преобразуется в электрический сигнал (этот сигнал называют *первичным*), поступающий на передающее устройство. На приемном конце переданную физическую величину или ее изменения выделяют из сигнала и наблюдают или регистрируют с помощью записывающих приборов. В системе телеуправления осуществляется передача команд для автоматического выполнения определенных действий. Часто эти команды формируют по результатам измерений, переданных телеметрической системой.

Повсеместное внедрение высокоэффективных и скоростных компьютеров привело к быстрому развитию систем передачи данных, обеспечивающих обмен информацией между вычислительными средствами и объектами автоматизированных систем управления и измерения. Этот вид связи по сравнению с другими отличается более высокими требованиями к скорости и точности передачи информации.

По общему принципу построения систем радиосвязи (радиоканала) они делятся на симплексные и дуплексные.

Под *симплексной связью* (*simplex* – односторонний, связь «один-ко-всем») понимают связь между двумя пунктами, когда в каждом из них передача и прием сообщений ведется поочередно на одной несущей частоте. Часто симплексную связь используют для передачи информации только в одном направлении, например в радиовещании, телевидении, оповещении и т.д.

*Дуплексная связь* (*duplex* – двусторонний, связь «один-на-один») – двусторонняя связь между двумя пунктами, когда передача и прием сообщений осуществляется одновременно на разных несущих частотах. Сейчас применяют такую разновидность симплексной радиосвязи, как *полудуплексная* (*half-duplex*) связь или *двухчастотный симплекс*, когда система связи обеспечивает поочередно передачу и прием информации на двух разных несущих частотах с использованием ретрансляторов.

Ретранслятор (от лат. *translator* – переносчик) – радиотехническое устройство, используемое как промежуточный приемопередающий пункт линии радиосвязи.

По числу используемых каналов различают одноканальные и многоканальные системы связи (системы передачи информации).

Система связи называется *многоканальной*, если она обеспечивает передачу нескольких сообщений по одной общей линии связи (каналу). Основная задача многоканальных систем связи – одновременная передача сообщений от многих источников, т.е. увеличение пропускной способности (часто используется термин «емкость»). Повышение эффективности использования канала связи достигается путем применения разных методов уплотнения каналов связи, за счет сокращения избыточности сообщений и организации так называемого *многоканального* и *многостанционного доступа* абонентов.

Для увеличения пропускной способности большинства систем связи применяют временное и частотное уплотнение (*multiplexing*, от лат. *multiplex* – сложный, многократный) сигналов.

По расположению элементов радиотракта системы радиосвязи принято делить на наземные и спутнико-космические.

В наземных системах радиосвязи радиоволны распространяются в пределах земной атмосферы. Такие системы служат для обеспечения связи с самолетами, кораблями, наземным транспортом и другими объектами. Они осуществляют персональную радиосвязь в рамках сотовой, транкинговой и других видов связи.

Особенностью спутнико-космических систем радиосвязи является наличие в их составе *искусственных спутников Земли* (ИСЗ), на которых располагают ретрансляторы радиосигналов. В целом система состоит из двух частей, или сегментов: наземного и космического. С помощью систем космической радиосвязи, работающих, как

правило, в диапазоне СВЧ, передают огромные объемы сообщений: множество телевизионных каналов, компьютерных данных, телефонных, телефаксных и иных сообщений.

По типу сигналов, с которыми работает система радиосвязи, различают *аналоговые* и *цифровые* системы радиосвязи.

Работа любой системы связи оценивается прежде всего точностью и скоростью передачи информации. Точность определяет качество передачи, скорость – количество. В целом работу системы связи характеризуют следующие параметры [25].

1. Помехоустойчивость, т.е. степень соответствия принятого сообщения переданному. Эта величина характеризуется общим термином – *верность*, которая определяется отношением средних мощностей сигнала и помехи (чаще отношение сигнал/шум; *signal-to-noise ratio (SNR)* или *S/N*).

2. Скорость передачи информации. Напомним, что в системах передачи дискретных сообщений скорость передачи измеряется числом передаваемых символов в единицу времени, т.е. в бодах (или бит/с).

3. Пропускная способность канала *C (channel capacity)*. В реальной системе связи средняя скорость передачи информации всегда меньше пропускной способности.

4. Избыточность сообщений – бесполезная, лишняя при приеме часть информации, которой невозможно воспользоваться и она не нужна потребителю.

5. Информационная эффективность, характеризующая использование системой пропускной способности канала.

6. Динамический диапазон канала – отношение допустимой мощности передаваемого сигнала к мощности неизбежно присутствующей в канале помехи.

7. Время, в течение которого по каналу возможна передача информации.

8. Полоса пропускания канала.

**Радиоприемные устройства.** Радиоприемным устройством (РПУ) в широком смысле называют систему узлов и блоков, которые осуществляют следующие операции [25]:

– преобразование с помощью приемной антенны электромагнитного поля сигнала (помех) в радиосигнал и обеспечение пространственной и поляризационной избирательности полезного радиосигнала;

– выделение (фильтрацию по частоте) полезных радиосигналов из совокупности других (мешающих) сигналов и помех, действующих на выходе приемной антенны и не совпадающих по частоте с полезным сигналом;

– усиление радиосигнала;

– преобразование и усиление принимаемых сигналов для обеспечения качественной работы детектора, декодера, схем защиты приемника от помех;

– демодуляцию (детектирование) принятого сигнала для выделения информации (модулирующей функции), содержащейся в полезном радиосигнале;

– усиление демодулированного сигнала;

– декодирование принятого сигнала;

– обработку принимаемых сигналов с целью ослабления мешающего воздействия помех искусственного и естественного происхождения.

Последняя операция предусматривает введение в приемник средств помехозащиты и эффективную обработку сигналов и помех, при которой достигается наилучшее обнаружение сигналов или оценка принятой информации (сообщения) по какому-либо критерию оптимальности приемника в соответствии с целевым содержанием решаемой задачи.

Радиоприемные устройства предназначены для приема радиосигналов и преобразования их к виду, позволяющему использовать содержащуюся в них полезную информацию. Любое радиоприемное устройство состоит из *приемной антенны* и собственно *радиоприемника*.

Практически во всех РТС полезная информация заложена в параметрах радиосигнала на входе радиоприемного устройства. Поэтому все основные операции, связанные с пространственной и частотной избирательностью радиосигнала, его усилением, демодуляцией и обработкой, могут решаться на основе единой теории анализа и синтеза трактов приемника и одинаковых принципов их схемотехнической реализации.

Приемники классифицируют по назначению, диапазону принимаемых волн (частот), виду модуляции передаваемых сигналов и условиям эксплуатации. Качественные показатели радиоприемных устройств определяются электрическими, конструктивно-эксплуатационными и экономическими характеристиками.

*По назначению* приемники делят на профессиональные и вещательные (бытовые). К профессиональным относятся приемники связные, радиолокационные, радионавигационные, радио-, телеуправления и др. Бытовые приемники обеспечивают прием программ звукового и телевизионного вещания.

*Диапазон рабочих частот*, т.е. область частот настройки, в пределах которой обеспечиваются все другие электрические характеристики приемника. Современные радиоприемные устройства обеспечивают уверенный прием радиосигналов в большом частотном диапазоне, где возможна работа радиосистем.

По виду модуляции сигнала радиоприемники, как и радиопередатчики, делят на устройства с амплитудной, амплитудной балансной и однополосной, частотной, фазовой, импульсной, импульсно-кодовой (цифровой) и другими видами модуляции.

*По условиям эксплуатации* приёмники бывают стационарными, бортовыми (космическими, корабельными, самолетными, автомобильными) и переносными (портативными) или мобильными.

К основным характеристикам приемника относятся диапазон рабочих частот, чувствительность, избирательность (селективность), помехоустойчивость, нелинейные искажения в отсутствие помех и динамический диапазон.

**Радиопередающие устройства.** Радиопередающим называют устройство, служащее для генерирования, модуляции ВЧ- и СВЧ-колебаний и усиления мощности подводимых к антенне и излучаемых в пространство сигналов (или передаваемых по линиям связи). Генерацию, модуляцию и усиление объединяет общее понятие «формирование сигнала», под которым подразумевают колебание (радиосигнал), несущее



информацию. Радиопередатчик часто применяют вместе с радиоприемником и питающим устройством; весь этот комплекс называют *радиостанцией*. Самостоятельно радиопередатчики используются в областях, где не нужен прием информации в месте её передачи: сигналы точного времени, разнообразные навигационные радиомаяки для определения местоположения объектов, многопозиционная радиолокация, радиовещание и т.д.

Передатчики классифицируют по назначению, диапазону рабочих волн (частот), излучаемой мощности, виду модуляции сигналов, типу излучения и условиям эксплуатации [25].

Назначение передатчика определяется радиосистемой, в которой он используется, что связано с видом передаваемой информации. *По назначению* передатчики бывают связными, вещательными, телевизионными, радиолокационными, телеметрическими, навигационными и т.д.

*По диапазону рабочих волн* современные передатчики делятся в соответствии с классификацией диапазонов радиоволн и частот.

*По средней излучаемой мощности* передаваемых радиосигналов различают передатчики очень малой (менее 3 Вт), малой (3–10 Вт), средней (10–500 Вт), большой (0,5–10 кВт) и сверхбольшой (более 10 кВт) мощности. Обычно мощность передатчика определяют как максимальную мощность ВЧ-колебаний, поступающую в антенну, при отсутствии модуляции и непрерывном излучении.

*По виду модуляции сигнала* передатчики (и приемники) делятся на устройства с амплитудной, балансной и однополосной, частотной, фазовой, импульсной, квадратурной, импульсно-кодовой и другими видами модуляции.

*По виду излучения* различают передатчики, работающие в непрерывном и импульсном режимах. В первом случае при передаче сообщения сигнал излучается непрерывно, во втором – в виде радиоимпульсов.

*По условиям эксплуатации* бывают стационарные, бортовые (космические, корабельные, самолетные, автомобильные) и переносные (портативные) передатчики.

К основным параметрам передатчиков относятся коэффициент полезного действия (КПД), диапазон частот, шаг сетки рабочих частот, выделенная полоса частот излучения, нестабильность частоты несущего колебания, побочные и внеполосные излучения, коэффициент нелинейных искажений сигнала, степень электромагнитной совместимости и т.д.

Нормы на надежность и долговечность, массу и габаритные размеры радиопередатчика устанавливаются в соответствии с общими нормами для радиотехнической аппаратуры. Для радиопередатчиков повышенной мощности действуют специальные нормы, связанные с *техникой безопасности*.

Конструкции, габаритные размеры и масса передатчиков в основном определяются средней излучаемой мощностью. Стабильность и устойчивость работы передатчика оценивают по его способности сохранять свои электрические характеристики в допустимых пределах при воздействии окружающей среды (температуры, влажности, атмосферного давления, механических нагрузок, климатических условий) и изменении параметров источника питания.

**Радиолокационные системы.** *Радиолокация* (от лат. *locatio* – расположение, размещение) означает определение местоположения объекта по сигналам, излучаемым самим объектом (пассивная локация) или по отраженным от него сигналам, излучаемым радиолокационной станцией (активная локация). Это область науки и техники, предметом которой является наблюдение различных объектов (целей) радиотехническими методами: их обнаружение, определение пространственных координат и направления движения, измерение дальности и скорости движения, разрешение, распознавание и др. *Радиолокационные системы* – это технические средства, решающие задачи радиолокации [25].

Основными классификационными признаками РЛС являются назначение; характер принимаемого сигнала; вид измеряемого элемента, характеризующего положение и параметры движения объектов (целей), иногда степень автономности [26].

*По назначению* РЛС подразделяют на обзорные и следящие.

*Обзорные РЛС* применяют для обнаружения и измерения координат всех целей в данной области пространства или земной поверхности, а также для управления движением средств противовоздушной (противоракетной) обороны, разведки, получения метеорологической информации и т.п.

*По расположению* (или месту базирования) различают наземные, морские (в том числе речные), воздушные, космические, подповерхностные и ряд других РЛС.

*Следящие РЛС* выполняют функцию точного и непрерывного определения координат одной или ряда целей. Полученная РЛС информация используется, например, для наведения оружия на цель или для управления объектом.

*По степени независимости функционирования* от вспомогательных систем различают автономные и неавтономные РЛС. *Автономные РЛС* работают самостоятельно, без помощи других РЭС и не используют радиолинии, связывающие бортовую аппаратуру данного объекта с внешними по отношению к нему системами и устройствами. В таких радиосистемах реализуется принцип однопозиционной радиолокации, т.е. информация об элементах разрешения извлекается из отраженного от земной поверхности или цели сигнала.

*Неавтономные РЛС* имеют в своем составе как бортовую аппаратуру, установленную на объекте, так и не связанную с ней радиолинией аппаратуру специальных радиоустройств, размещаемых в наземных пунктах или на других объектах, т.е. реализуется принцип многопозиционной радиолокации.

*По виду измеряемого элемента  $W$*  различают угломерные, дальномерные и разностно-дальномерные устройства, а также устройства измерения скорости.

*Угломерные устройства* радиолокаторов определяют угол между опорным направлением и направлением на объекты радиолокации в горизонтальной ( $W = \alpha$ ) или вертикальной ( $W = \beta$ ) плоскости (измеряют пеленг) в соответствующей системе координат. К этим устройствам (радиопеленгаторам) относят средства, которые позволяют найти угловые координаты источника излучения электромагнитных колебаний по результатам измерения направления прихода радиоволн.

*Дальномерные устройства* (радиодальномеры) предназначены для измерения расстояния до объекта ( $W = R$ ). Обычно радиодальномеры измеряют запаздывание отраженного целью сигнала относительно собственного излученного (зондирующего) сигнала. Дальномеры – часть большинства РЛС, они также применяются самостоятельно, например для нахождения высоты полета воздушного аппарата (радиовысотомеры). Дальномеры могут реализовать принцип «запрос-ответ», когда дальность измеряется по ретранслируемому сигналу.

*Разностно-дальномерные устройства* позволяют найти элемент  $W = R_{\Delta} = R_1 - R_2$ , где  $R_1$  и  $R_2$  – расстояние до объекта от двух излучающих (переизлучающих) устройств в многопозиционной РЛС, определяемое путем сравнения информативных параметров сигналов.

*Тактические параметры* определяют значение и возможности системы, основными из которых являются: область обзора (рабочая область), разрешающая способность, точность, помехоустойчивость, пропускная способность, надежность и эксплуатационная эффективность.

*Технические параметры РЛС* характеризуют технические средства, необходимые для обеспечения заданных тактических параметров. К ним относятся значение и стабильность несущей частоты, вид и параметры модуляции излучаемых колебаний, диаграммы направленности антенных устройств, мощность передатчика, чувствительность приемника, надежность устройств системы, ее массогабаритные характеристики и др. Отклонение любого технического параметра от заданного значения влияет на определенный тактический параметр (или группу параметров), что может вызвать выход тактических параметров радиолокационного устройства за установленные пределы, т.е. отказ системы.

## Электроакустические и звуковещательные системы

*Вещанием* называют организацию и распространение через системы, сети и средства электрической связи различных сообщений, предназначенных для широких слоев населения и служащих целям их информирования, идеологического воздействия, образования, культурного воспитания и отдыха. Наряду с печатью вещание – одно из средств массовой информации (СМИ). Оно имеет большое общественно-политическое значение как мощное средство воздействия на ум и чувства людей [27].

*Электроакустические системы* – это средства радиовещательной или проводной связи, обработки разнообразной звуковой информации, записи и воспроизведения звуковых сообщений [24].

*Звуковещательные (или звукотехнические) системы* – средства озвучивания помещений и открытых пространств, звукоусиления и формирования акустических свойств помещений и студий, приборы для озвучивания кинофильмов и т.п.

Начальные звенья тракта передачи звуковых сообщений – это совокупность источников звука (музыкальные инструменты, голоса певцов, дикторов, актеров и др.),

воздушная среда студии, зала, микрофоны. Оконечное звено – электроакустический преобразователь: телефон, наушники, громкоговоритель. Последний в быту называют акустической системой (АС), но целесообразно так называть минимум два громкоговорителя, представляющих собой стереофоническую базу для воспроизведения звука.

Поскольку АС работает в помещении озвучивания, то свойства помещения существенным образом влияют на качество воспроизведения и восприятия программы. Слушатель воспринимает звуковые колебания барабанной перепонкой органа слуха – анализатора спектра акустических сигналов. Совокупность звеньев тракта передачи звука определяет качество восстановления первичного звукового сообщения, поэтому при расчётах, проектировании и аппаратурной реализации систем обработки звуковых сигналов нужно учитывать свойства и особенности каждого звена.

Путь, по которому электрические сигналы вещания проходят от источников сигналов (микрофона, магнитофона, проигрывателя компакт-дисков, электронного музыкального инструмента и т.д.) до приёмных устройств, называют *электрическим каналом вещания*. Отдельные функционально законченные и организационно обособленные части электрического канала называют *трактами*, а более мелкие членения – *звеньями* трактов.

По используемым техническим средствам различают *радиовещание* и *проводное вещание*. По форме передаваемых электрических сигналов звуковое вещание подразделяют на *аналоговое* и *цифровое*.

По ГОСТ 11515-91 электрический канал звукового вещания заканчивается на выходе радиопередатчика (в случае радиовещания) или на абонентской розетке (при проводном вещании). Система звукового вещания (рисунок 3.18) включает тракты формирования программ, их первичного (каналы доставки программ к радиовещательным станциям) и вторичного (сети радиовещательных станций и систем проводного вещания) распределения, а также тракты приёма программ радиовещания (радиоприёмные и абонентские устройства слушателей).

Тракт формирования программ включает в себя оборудование студий, а также аппаратных радиодомов (РД) и телевизионных центров (ТЦ), служащее для формирования, преобразования и усиления электрических сигналов.

Тракт первичного распределения программ содержит городские соединительные линии (СЛ) и междугородные каналы звукового вещания, а тракт вторичного распределения – оборудование радиовещательных передающих центров (радиопередатчики) и станций проводного вещания (ПВ) (усилители, передатчики ПВ), а также линии ПВ. Приёмное оборудование (радиовещательные приемники и абонентские устройства ПВ) выделяют в тракты приёма программ (ТПП).

Каждый способ звукового вещания – радиовещание и проводное вещание – имеет свои преимущества и недостатки, проявляющиеся в конкретных условиях. При выборе и построении системы звукового вещания основную роль играют качество воспроизведения, устойчивость, надёжность и экономичность.

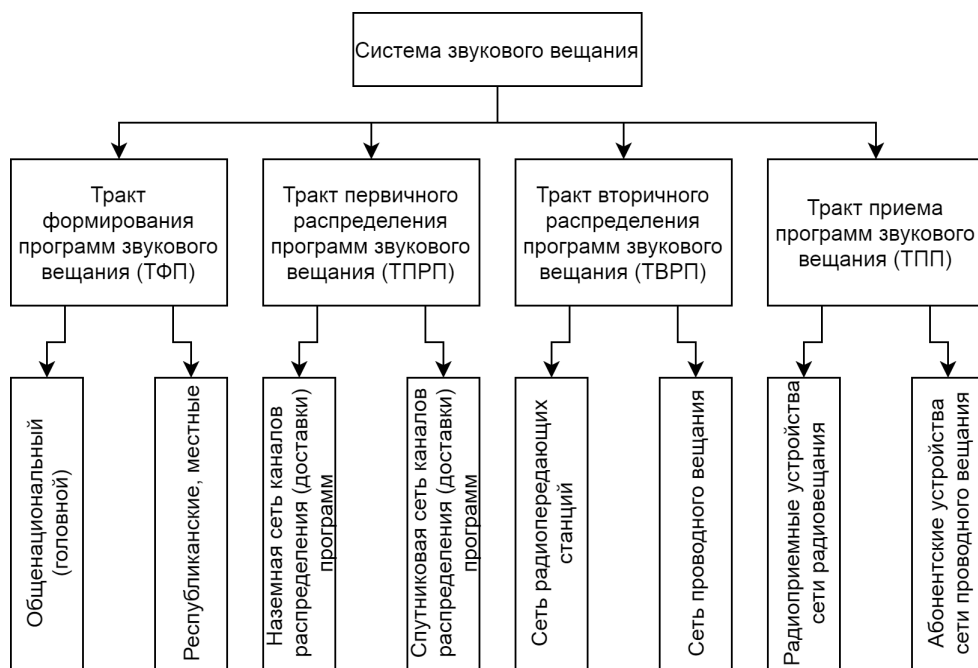


Рисунок 3.18 – Составные части системы звукового вещания

---

*Например, при сравнительно малых расстояниях от источника программы до точек расположения приёмных устройств и при их большой плотности, т.е. количестве устройств на единицу площади территории, технические и экономические преимущества имеет система ПВ. При больших расстояниях и малой плотности более выгодной оказывается система РВ.*

---

Понятие «*сеть*» носит территориальный смысл. Под сетью понимают распределение по обслуживаемой территории выбранных технических средств вещания. Говорят, например, о сети междугородных каналов звукового вещания (МКЗВ), сети радиовещательных станций, централизованной или децентрализованной сети радио- или проводного вещания. В первом случае территорию обслуживает одна радиостанция или станция ПВ, во втором – несколько.

Перечень параметров качества каналов звукового вещания в определённой полосе частот включает:

- 1) отклонение амплитудно-частотной характеристики относительно коэффициента передачи на частоте 1 кГц, выраженное в децибелах, в полосе частот, кГц;
- 2) изменение группового времени прохождения в миллисекундах на частоте, кГц;
- 3) максимальный психометрический уровень помех (шума) в свободном канале, дБ, в полосе частот, кГц;
- 4) коэффициент гармоник, выраженный в процентах, в полосе частот, кГц;

5) защищённость от внятной переходной помехи, выраженная в децибелах, в заданном интервале частот;

6) защищённость от взвешенного шума, выраженная в децибелах, в заданной полосе частот.

Параметры качества каналов и трактов звукового вещания устанавливаются национальными стандартами (ГОСТ 11515-91). При их создании руководствуются рекомендациями международных организаций.

## **Информационно-измерительные системы**

Усложнение современного производства, развитие научных исследований привело к необходимости измерений одновременно сотен и тысяч физических величин. Значительно увеличилось потоки измерительной информации, возросла сложность ее обработки с целью принятия решений, что вызвало появление такого вида средств, как измерительные системы [28]. Сегодня измерительные системы являются одним из основных средств создания «цифровых двойников» [29].

*Измерительная система (ИС)* – средство, предназначенное для измерения и отображения физических величин; совокупность средств измерения и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи и вырабатывающих сигналы измерительной информации (ИИ) в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и (или) использования в системах автоматического регулирования [30].

*Измерительная установка* – совокупность расположенных в одном месте, функционально объединённых средств измерения (СИ) и вспомогательных устройств, вырабатывающих сигналы ИИ в форме, удобной для восприятия наблюдателем (например, установка для поверки вольтметров).

*Средства измерения* – это технические средства с нормированными метрологическими характеристиками.

*Измерительный прибор* – СИ, вырабатывающее сигнал ИИ в форме, пригодной для непосредственного восприятия наблюдателем.

*Измерительный преобразователь* – СИ, вырабатывающее сигнал ИИ в форме, непосредственно не воспринимаемой наблюдателем, но удобной для передачи, дальнейшего преобразования и (или) хранения.

*Мера* – СИ, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера (значения). Например, кварцевый генератор – мера частоты электрических колебаний.

*Радиоизмерительные устройства* – это технические средства, предназначенные для измерения параметров радиотехнических сигналов, цепей и устройств при их исследовании, регулировке и эксплуатации. Как и любые СИ, эти устройства подразделяют на меры, измерительные преобразователи, приборы, установки и системы.

По назначению ИС делятся на системы, измеряющие физические и технические параметры объектов и процессов; по области (или сфере) использования – на радио-

измерительные устройства; медицинскую радиоэлектронную аппаратуру (медицинские электронные диагностические устройства и системы), предназначенную для диагностики физиологического состояния больных, и т.д. [24].

К радиоизмерительным устройствам относятся: анализатор спектров, ваттметр, вольтметр, измерительный генератор сигналов, девиометр, измерители параметров компонентов цепей, характеристик случайных процессов, нелинейных искажений, измерительные устройства СВЧ-диапазона, модулометр, мультиметр, осциллограф, фазометр, характерограф, частотомер.

По физической природе сигналов, несущих информацию (и далее преобразующихся в электрические сигналы радиочастот), диагностические системы делятся на фонографические (звуковые), эхографические (ультразвуковые), радионуклидные ( $\gamma$ -приборы), рентгеновские, электрофизиологические, термодиагностические и др.

Различают следующие типы ИС [28]:

– измерительные информационные системы (ИИС) – системы, предназначенные для представления информации в виде, необходимом потребителю. ИИС подразделяют на системы ближнего и дальнего действия (телеизмерительные системы). В зависимости от вида и числа элементов в измерительной части различают многоканальные ИИС или ИИС с параллельной структурой, сканирующие ИИС, или ИИС с последовательной структурой; мультиплицированные ИИС, или ИИС с общей мерой; многоточечные ИИС, или ИИС с параллельно-последовательной структурой;

– измерительные контролирующие системы (ИКС) – системы, предназначенные для контроля параметров технологического процесса, явления, движущегося объекта и т.п.;

– системы автоматического контроля (САК) – системы, осуществляющие измерение параметров исследуемого объекта с целью определения его предаварийного и аварийного состояния. САК разделяются на системы непрерывного контроля и системы с дискретным последовательным контролем;

– системы технической диагностики (СТД) – системы, осуществляющие измерение параметров исследуемого объекта с целью определения его предаварийного и аварийного состояния, а также непосредственно определяющие и указывающие место неисправности объекта. СТД подразделяются на диагностические, предназначенные для обнаружения неисправности или подтверждения исправности исследуемого объекта, и прогнозирующие, предсказывающие по результатам проверки объекта в предыдущие моменты времени поведение объекта в будущем. По характеру процедуры выработки оценки состояния объекта СТД делят на статистические (решение выносится на основании измерений или проверок сигналов, характеризующих объект), детерминированные (параметры исследуемого объекта сравнивают с параметрами образцового объекта, в качестве которого обычно используют сигналы, имитирующие его поведение). По видам проверок СТД делят на функциональные (выявляют наличие сигнала на выходе объекта при подаче сигнала на вход), алгоритмические (проверяется последовательность выполнения функций), логически-

комбинационные, или тестовые (на вход подается специальное стимулирующее воздействие (тест), что позволяет выявить неисправность на любом уровне);

– измерительные управляющие системы (ИУС) – система, предназначенные для автоматического управления технологическим процессом, движущимся объектом и т.п.;

– измерительно-вычислительные комплексы (ИВК) – функционально объединенные совокупности средств измерений, ЭВМ и вспомогательных устройств, предназначенных для выполнения в составе ИИС конкретных измерительных задач.

Основные области применения ИС – научные исследования, испытания и контроль сложных изделий, управление технологическими процессами.

По организации алгоритма функционирования различают:

1) системы с жестким алгоритмом функционирования – алгоритм работы ИС не меняется;

2) программируемые системы – алгоритм работы ИС меняется в соответствии с заранее заданной программой, учитывающей особенности функционирования объекта;

3) адаптивные системы – алгоритм работы, а иногда и структура ИС изменяется в зависимости от изменений измеряемых величин и условий работы объекта исследования.

С целью универсализации ИС все измеряемые и контролируемые физические величины представляют унифицированными электрическими сигналами – это непрерывные, импульсные, кодово-импульсные сигналы, параметры или диапазоны изменения параметров которых нормируются государственными стандартами.

Измерительные системы характеризуют следующие параметры:

– диапазон измерений;

– точность измерений (интервал, показывающий, насколько могут быть неверными показания средства измерения);

– чувствительность (отношение изменения показания СИ к изменению измеряемой величины);

– порог чувствительности (минимальный уровень входного сигнала, который должен быть достигнут для появления различимых изменений в показаниях прибора. Это верхняя граница мертвой зоны при изменении входного сигнала от нулевого значения);

– мертвая зона (диапазон значений измеряемой величины, в котором выходной сигнал прибора не изменяется);

– разрешающая способность (дискриминация, минимальная разность двух значений измеряемых однородных величин, различимая с помощью прибора);

– время установления показаний (время успокоения);

– быстродействие (максимальное число измерений с нормированной погрешностью за единицу времени);

– входное сопротивление;



– стабильность (повторяемость измерений, способность прибора отображать одни и те же показания при измерении одной и той же величины в течение определённого промежутка времени или при измерении этой величины определённое количество раз);

– сходимость (степень разброса результатов измерений из-за случайных ошибок. Она показывает, насколько близко друг к другу находятся результаты измерений одной и той же величины, проведённых несколько раз при одних и тех же условиях);

– надёжность (вероятность нормального функционирования прибора в условиях, определённых для его эксплуатации).

О точности СИ судят по их погрешностям. *Абсолютная погрешность СИ* – разность между показанием прибора и истинным значением  $A_0$  измеряемой величины:  $\Delta_{\text{п}} = A_{\text{п}} - A_0$ . *Относительная погрешность СИ* – отношение абсолютной погрешности к истинному значению измеренной величины:  $\delta_{\text{п}} = \Delta_{\text{п}}/A_0 \approx \Delta_{\text{п}}/A_{\text{п}}$ . *Приведённая погрешность СИ* – отношение абсолютной погрешности к нормировочному значению  $D$ :  $\gamma = \Delta_{\text{п}}/D$ . Для приборов с равномерной или степенной шкалой и нулевой отметкой на краю или вне шкалы в качестве величины  $D$  выбирают предел измерений. *Основная погрешность* – это погрешность СИ в нормальных условиях эксплуатации (нормальные температура, влажность, атмосферное давление, напряжение, частота питания и т.п.). *Дополнительная погрешность* – это погрешность СИ, вызванная отклонением условий эксплуатации от нормальных. *Класс точности (КТ)* – обобщённая характеристика СИ, указывающая предельные значения допускаемых основных и дополнительных погрешностей. КТ не определяет погрешность конкретного измерения, а лишь указывает пределы, в которых она может находиться. Связь между КТ и пределами допустимых погрешностей СИ устанавливается соответствующими стандартами.

## Энергообеспечивающие системы

Источники электрической энергии, необходимой для питания любой электронной или радиоэлектронной аппаратуры, принято делить на первичные и вторичные источники электропитания.

К первичным источникам электропитания относят трехфазную (или однофазную) сеть промышленной частоты 50 Гц (для стационарной аппаратуры) и генераторы постоянного или переменного напряжения повышенной частоты 400–500 Гц, химические и солнечные батареи, аккумуляторы (для аппаратуры, устанавливаемой на подвижных объектах).

Источники вторичного электропитания (ИВЭП) выполняют функции преобразования рода тока (выпрямители – преобразование переменного тока в постоянный; инверторы – обратное преобразование), стабилизации и регулировки напряжения и тока, фильтрации различных помех и высших гармоник и т.д. [31].

Широкое внедрение электронных средств во все сферы человеческой деятельности (быт, автоматизированное проектирование и производство, оборонная техника, космос и т.п.) определяет большой объём технических, эксплуатационных и экономических требований как к самим электронным средствам, так и к составляющим их узлам и устройствам. Одним из таких устройств, входящих в состав практически всех электронных средств, является ИВЭП. Только правильно спроектированный источник электропитания способен обеспечить нормальную работу ЭРЭС за все время его жизненного цикла [32].

С момента появления первого РЭС (радио А.С. Попова) сменилось несколько поколений ЭРЭС, имеющих принципиальные отличия по функциональным возможностям, виду применяемой элементной базы, конструктивно-технологическим решениям и т.п. Это в равной мере относится как к радиоэлектронной аппаратуре бытового назначения, так и к системам управления сложными техническими объектами. Однако в каждом из видов ЭРЭС, будь то вычислительная машина или система управления роботом, CD-проигрыватель или радиолокационная станция, узел управления холодильником или электрокардиографом, имеется система, устройство или элемент, выполняющие одну и ту же функцию: обеспечение электропитанием всех входящих в данное средство активных элементов (электронных ламп, транзисторов, микросхем и др.). Наличие в ЭРЭС источника электропитания настолько очевидно, что на структурной и функциональной электрических схемах этого ЭРЭС он даже не указывается. Оговаривается лишь перечень номиналов напряжений, мощность по выходу каждого канала и стабильность (если это необходимо). А между тем при проектировании любого ЭРЭС, даже если оно состоит только из одного транзистора, требуется очень внимательное отношение к источнику электропитания.

При создании ЭРЭС определённого класса и назначения (электронно-вычислительная, медицинская и бытовая электронная техника, средства автоматизации) источник или система электропитания могут быть подобраны из серийно выпускаемых промышленностью унифицированных ИВЭП. В некоторых странах существуют фирмы, специализирующиеся на промышленном выпуске источников электропитания, и потребитель имеет возможность выбрать тот, который ему наиболее подходит. Однако, если по эксплуатационным, конструктивным или другим соображениям серийно выпускаемые источники ИВЭП не удовлетворяют потребителя, необходимо разработать новый ИВЭП с учётом всех правил и ограничений, специфичных для этого вида ЭРЭС.

Государственными стандартами дано определение ИВЭП как устройства, предназначенного для преобразования подаваемых на ЭРЭС напряжения и тока до оговорённых в технической документации номиналов, показателей стабильности и надёжности.

Применяются также автономные источники электропитания, использующие:

- химико-электрические гальванические элементы;
- электрохимические аккумуляторы;
- биохимические элементы;
- биологические элементы;

- оптико-электрические преобразователи (солнечные батареи);
- атомно-электрические устройства;
- механоэлектрические устройства для носимой электроники, преобразующие энергию движения человека в электричество, и др. Проектирование таких источников электропитания весьма специфично [32].

ИВЭП в зависимости от решаемой задачи обеспечивают изменение уровня напряжения, поступающего на вход устройства, его выпрямление, инвертирование, стабилизацию, фильтрацию, защиту или комбинацию этих функций. В связи со спецификой назначения, условий эксплуатации и с разнообразием параметров электронных средств источники электропитания должны обеспечивать широкий диапазон варьирования своих параметров. Поэтому целесообразно классифицировать источники по следующим основным характеристикам [32].

1. *По виду входной электроэнергии:* работающие от сети переменного тока (одно- или многофазного); от сети постоянного тока; от сетей переменного и постоянного токов.

2. *По выходной мощности:* микромощные  $P_{\text{ВЫХ}} \leq 1$  Вт; малой мощности  $P_{\text{ВЫХ}} = 1 - 10$  Вт; средней мощности  $P_{\text{ВЫХ}} = 10 - 100$  Вт; повышенной мощности  $P_{\text{ВЫХ}} = 100 - 1000$  Вт; большой мощности  $P_{\text{ВЫХ}} \geq 1000$  Вт. Отдельную группу составляют источники с выходной мощностью от 1 до 1000 кВт для электропитания приёмных и передающих устройств, установок ионной оптики, технологических установок.

3. *По виду выходной электроэнергии:* с выходным напряжением переменного тока (одно- и многофазного); с выходным напряжением постоянного тока; комбинированные (с выходными напряжениями переменного и постоянного токов).

4. *По номинальному значению выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$ :* с низким  $U_{\text{ВЫХ}} < 100$  В, повышенным  $U_{\text{ВЫХ}} = 100 - 1000$  В и высоким  $U_{\text{ВЫХ}} > 1000$  В напряжением. ИВЭП с уровнем выходного напряжения свыше 1000 В принято называть высоковольтными. У этих источников рабочие цепи находятся под потенциалом относительно «земли», равным рабочему напряжению. Кроме них, используются источники электропитания, рабочие цепи которых находятся под потенциалом относительно «земли» выше рабочего напряжения. Такие источники применяются обычно в радиопередающих устройствах, где уровень потенциала превышает 1000 В. В этом случае источники электропитания называются высокопотенциальными.

5. *По степени постоянства выходного напряжения:* нестабилизирующие и стабилизирующие. Стабилизирующие источники электропитания обеспечивают постоянство выходного напряжения на заданном уровне при воздействии влияющих величин (изменении входного напряжения, выходного тока, температуры окружающей среды и др.). Они имеют в своём составе стабилизатор напряжения, который может быть выполнен в виде функционального узла.

6. По допустимому отклонению номинала выходного напряжения: низкой точности ( $> 5\%$ ); средней точности ( $1-5\%$ ); высокой точности ( $0,1-1\%$ ); прецизионные ( $< 0,1\%$ ).

7. По уровню пульсации (переменной составляющей) выходного напряжения постоянного тока: с малым уровнем ( $< 0,1\%$ ); со средним уровнем ( $0,1-1\%$ ); с большим уровнем ( $> 1\%$ ).

8. По числу выходов: одноканальные (один выход) и многоканальные (два и более выхода).

9. По способу стабилизации напряжения: непрерывного и импульсного действия. Независимо от структурной схемы и схемотехнических решений ИВЭП характеризуются рядом электрических параметров. Назовем основные из них [31]:

– номинальные уровни входного  $U_{\text{вх ном}}$  и выходного  $U_{\text{н ном}}$  напряжений. В зависимости от формы этих напряжений задаются либо действующие, либо постоянные значения напряжений;

– постоянное напряжение  $U_{\text{н}}$  и ток  $I_{\text{н}}$  нагрузки;

– предельный уровень амплитуды переменной составляющей выходного напряжения  $U_{\text{м вых}}$ . Часто эта величина задаётся в виде коэффициента пульсаций  $K_{\text{п}}$ , который может быть определён как отношение амплитуды переменной составляющей выходного напряжения  $U_{\text{м вых}}$  к номинальному значению выходного напряжения

$$K_{\text{п}} = \frac{U_{\text{м вых}}}{U_{\text{н ном}}} \cdot 100\% = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{max}} + U_{\text{min}}} \cdot 100\% ;$$

– внешняя (нагрузочная) характеристика  $U_{\text{н}} = f(I_{\text{н}})$  – зависимость напряжения на выходе от тока нагрузки.

Кроме перечисленных требований к ИВЭП могут предъявляться дополнительные, определяющие их электрические и конструктивно-технологические характеристики [33].

## Вычислительные системы

Электронная вычислительная система, или электронно-вычислительная машина (ЭВМ) – комплекс технических, аппаратных и программных средств, предназначенных для автоматической обработки информации, вычислений, автоматического управления. Ее основные функциональные узлы (логические, запоминающие, индикационные и др.) выполнены на электронных элементах [34].

Понятие «электронно-вычислительная машина» следует отличать от более широкого понятия «вычислительная машина» (компьютер); ЭВМ является одним из способов воплощения вычислителя. ЭВМ подразумевает использование электронных компонентов в качестве её функциональных узлов, однако вычислитель может быть устроен и на других принципах – механическом, биологическом, оптическом, квантовом и других, работая за счёт перемещения механических частей, движения

электронов, фотонов или за счёт других физических явлений. Кроме того, по типу функционирования вычислительная машина может быть аналоговой, цифровой и комбинированной (аналого-цифровой).

Во времена широкого распространения аналоговых вычислительных машин, которые были в подавляющем большинстве электронными, во избежание недоразумений использовали название «цифровая электронная вычислительная машина» (ЦЭВМ) или «счётная электронная вычислительная машина» (СЭВМ), подчеркивая, что это устройство осуществляет непосредственно вычисление результата, в то время как аналоговая машина осуществляет процесс физического моделирования с получением результата измерением.

По типу функционирования электронная вычислительная машина может быть цифровой и аналоговой.

Аналоговая вычислительная машина (АВМ) – устройство, в котором каждому мгновенному значению переменной величины, участвующей в исходных соотношениях, ставится в соответствие мгновенное значение другой (машинной) величины, часто отличающейся от исходной физической величины природой и масштабным коэффициентом. Каждой элементарной математической операции над машинными величинами, как правило, соответствует какой-либо физический закон, устанавливающий математические зависимости между физическими величинами на выходе и входе решающего элемента (например, закон Ома и правила Кирхгофа для электрических цепей, выражение для эффекта Холла, силы Лоренца и так далее).

Аналоговая вычислительная машина (АВМ) представляет числовые данные при помощи аналоговых физических параметров (скорость, длина, напряжение, сила тока, давление), в чём и состоит ее главное отличие от цифровой ЭВМ. Другим принципиальным отличием является отсутствие у АВМ хранимой программы, под управлением которой с помощью одной и той же вычислительной машины можно решать разнообразные задачи. Решаемая задача (класс задач) жёстко определяется внутренним устройством АВМ и выполненными настройками (соединениями, установленными модулями, клапанами и т. п.). Даже для универсальных АВМ для решения новой задачи требуется перестройка внутренней структуры.

В военной технике исторически выработалось ещё одно название аналоговых вычислительных устройств для управления огнём артиллерии, высотного бомбометания и других военных задач, требующих сложных вычислений, – это счётно-решающий прибор. Примером может служить прибор управления зенитным огнём. Аналоговая техника интересна для военных двумя свойствами: она крайне быстра, в условиях помех работоспособность машины восстанавливается, как только помеха исчезает.

Мозг человека – самое мощное и эффективное «аналоговое устройство» из существующих. И хотя передача нервных импульсов происходит за счет дискретных сигналов, информация в нервной системе не представлена в цифровом виде. Нейрокомпьютеры – аналоговые, гибридные компьютеры (модели, реализованные на цифровых ЭВМ), построенные на элементах, которые работают подобно клеткам мозга [35].

По назначению все АВМ можно разделить на две группы:

– специализированные — предназначены для решения узкого класса задач (или одной задачи);

– универсальные – предназначены для решения широкого спектра задач.

Цифровые вычислительные машины (ЦВМ) имеют ряд принципиальных недостатков, которые необходимо учитывать при создании автоматизированных систем управления движением объектов, таких как космические и летательные аппараты, морские суда и т.д. [31].

В первую очередь это дискретная форма представления данных, которая неизбежно приводит к округлению и неточности представления информации. Увеличение разрядной сетки процессоров позволяет повысить точность, но принципиально не решает проблему: ошибки остаются и накапливаются при выполнении большого количества операций, что приводит к проблеме численной устойчивости вычислительных алгоритмов.

Кроме того, решение целого класса задач, основанных на использовании дифференциально-интегральных уравнений и лежащих в основе многих задач управления движением, в силу конечно-разностной природы алгоритмов вычисления требует значительных расчётных затрат (в сравнении с простыми операциями). Это делает дорогостоящим или даже невозможным применение таких решений в автономных системах оперативного управления, требующих решения задач в режиме реального времени.

Также следует отметить, что полупроводниковая элементная база компьютеров достаточно чувствительна к условиям окружающей среды: температуре, электромагнитным возмущениям, радиации.

В то же время аналоговые вычислительные машины лишены многих из указанных недостатков. АВМ, существовавшие до экспансии цифровой техники, успешно справлялись со своими задачами и используются до сих пор в системах оборонного назначения. Самыми распространёнными и технически совершенными являлись АВМ на основе электрических элементов.

Сравнение АВМ и ЦВМ показывает, что хотя АВМ тоже выполняют расчёты с погрешностью (правда, она имеет иную причину), они более выигрышны при решении сложных задач, поскольку по своей природе позволяют получать решение в реальном времени. Однако АВМ менее универсальны: в них элементы и структура их взаимодействия определяют и обрабатываемые данные, и способ их обработки, в то время как в цифровых вычислительных машинах элементная база, данные и программа являются различными сущностями, причём изменяемыми почти независимо друг от друга.

По принципу работы АВМ можно назвать машиной параллельного действия, так как в ней вся схема работает одновременно, т. е. параллельно. Причем быстрота решения не зависит от сложности решаемых задач, так как для этого требуется только увеличить число решающих элементов.

В аналоговых вычислительных машинах точность решения задачи зависит от качества изготовления узлов и элементной базы. Погрешности решения, найденного

с помощью АВМ, получаются вследствие неидеальности работы отдельных решающих элементов, неточности установки их коэффициентов передачи и начальных условий. Результирующая погрешность зависит также от характера и особенностей решаемой задачи. Как правило, погрешность увеличивается с ростом числа решающих (особенно нелинейных) элементов, включенных последовательно. Практически можно считать, что погрешность при исследовании устойчивых нелинейных систем автоматического управления не превышает нескольких процентов, если порядок набираемой системы дифференциальных уравнений не выше 10-го.

Если необходимо поменять алгоритм решения задачи и соответственно порядок выполнения отдельных операций (т.е. осуществлять программирование на АВМ), то машину необходимо остановить, чтобы выполнить необходимые коммутации согласно формулам решаемой задачи, что обуславливает прерывистый характер работы АВМ и значительно сказывается на ее производительности.

Таким образом, для АВМ характерна малая универсальность (алгоритмическая ограниченность), которая означает, что при переходе от решения задач одного класса к решению задач другого класса требуется изменять структуру машины и число решающих элементов. Особенности представления исходных величин и построения отдельных решающих элементов ограничивают область применения и точность получаемого результата. В основном с помощью АВМ решают следующие задачи.

*Контроль и управление:* в системах автоматического управления АВМ используются, как правило, для определения или формирования закона управления, для вычисления сводных параметров процесса (КПД, мощности, производительности и др.). Например, АВМ широко применяются для оценки экономической эффективности энергетических систем.

*Опережающий анализ,* основанный на быстродействии. В режиме опережающего анализа АВМ выполняют функции либо машин-советчиков, когда оператор пользуется результатами полученных на машине расчетов для ручного или полуавтоматического управления, либо управляющих машин, автоматически учитывающих текущие характеристики процесса и управляющих им по оптимальным показателям.

*Экспериментальное исследование* поведения системы с аппаратурой управления или регулирования в лабораторных условиях. С помощью АВМ воспроизводится та часть системы, которая по каким-либо причинам не может быть воспроизведена в лабораторных условиях.

*Анализ динамики* систем управления или регулирования. Заданные уравнения объекта решаются в выбранном масштабе времени с целью нахождения основных параметров, обеспечивающих требуемое протекание процесса. АВМ резко сокращает время проведения расчетов и делает наглядными результаты. Решение задач синтеза систем управления и регулирования сводится к подбору по заданным техническим условиям структуры изменяемой части системы, функциональных зависимостей требуемого вида и значений основных параметров.

*Определение возмущений или полезных сигналов, действующих на систему.* В этом случае по дифференциальным уравнениям, описывающим динамическую систему, по значениям начальных условий, известному из эксперимента характеру изменения выходной координаты и статистическим характеристикам шумов в измеряемом сигнале определяется значение возмущения или полезного сигнала на входе.

АВМ может также служить для построения приборов, автоматически регистрирующих возмущения и вырабатывающих сигнал управления в зависимости от характера и размера возмущений.

Сфера применения АВМ ограничивается преимущественно промышленным производством, военной сферой, транспортом, авиацией, наукой. Данный класс вычислительных машин оперирует только конкретными числами и дает только частные решения.

Таким образом, фундаментальным решением при проектировании компьютера является выбор, будет он цифровой или аналоговой системой. Если цифровые компьютеры работают с дискретными численными или символьными переменными, то аналоговые предназначены для обработки непрерывных потоков поступающих данных. Сегодня цифровые компьютеры имеют значительно более широкий диапазон применения, хотя их аналоговые варианты всё ещё используются для некоторых специальных целей. Следует упомянуть, что возможны и другие подходы, применяемые, к примеру, в импульсных и квантовых вычислителях, однако пока что они являются либо узкоспециализированными, либо экспериментальными решениями.

---

***Примерами** аналоговых вычислителей (от простого к сложному) являются: номограмма, логарифмическая линейка, астролябия, осциллограф, телевизор, аналоговый звуковой процессор, автопилот, мозг.*

---

Среди наиболее простых дискретных вычислителей известен абак, или обыкновенные счёты; наиболее сложной из такого рода систем является суперкомпьютер.

Основные технические характеристики АВМ:

- максимальный порядок решаемых уравнений;
- диапазон изменения переменных величин;
- максимальное время интегрирования;
- дрейф нуля усилителей за период;
- максимальные статическая и динамическая погрешности вычисления алгебраических функций, %;
- быстродействие.

Основной технической характеристикой цифровых компьютеров является производительность – объективная количественная мера работы машины. Используют следующие меры производительности: пиковую, номинальную, системную и эксплуатационную (рисунок 3.19) [36].

*Пиковая производительность* – среднее число коротких операций типа «регистр–регистр» в секунду (оп/с) без операций обмена с ОП. На западе пиковую производительность оценивают для команд типа «Нет операции» в миллионах операций



в секунду (млн оп/с) или в MIPS (million instruction per second). Пиковую мощность часто называют быстродействием компьютера.

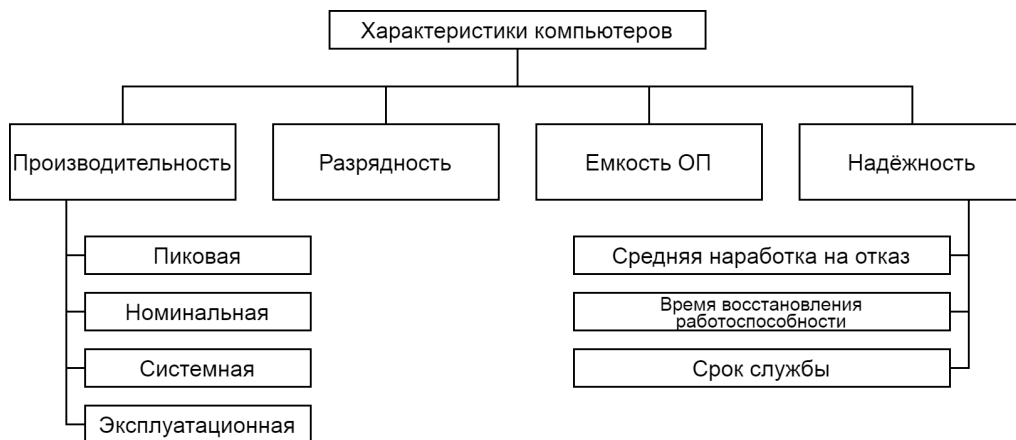


Рисунок 3.19 – Основные характеристики компьютеров

*Номинальная производительность* – среднее число смеси команд с учётом их статистического веса (частоты повторения), которые выполняет ядро компьютера в выбранном классе задач (зависит от скорости ОП):

$$V_c = 1 / (P_1 t_1 + P_2 t_2 + \dots + P_i t_i + P_n t_n),$$

где  $P_i$  и  $t_i$  – соответственно весовой коэффициент каждой  $i$ -й команды и время её выполнения;  $n$  – число команд.

Номинальную производительность часто называют быстродействием компьютера на смеси команд. Производительность мощных машин измеряют в мегафлопсах (MFLOPS) – миллион операций в секунду над операндами с плавающей запятой.

*Системную производительность* измеряют с помощью типовых оценочных программ (бенчмарков), реализованных на языках высокого уровня. Результаты оценки системной производительности компьютера конкретной архитектуры представлены в числовых таблицах.

*Эксплуатационную производительность* оценивают данными о реальной рабочей нагрузке в основных областях применения; при этом учитывают необходимую площадь размещения машины, механические и климатические условия эксплуатации, потребляемую мощность и т.д.

К характеристикам компьютеров также относят:

- разрядность машинного слова, которое хранится, пересылается и обрабатывается как единое целое; измеряется в битах, байтах;
- объём оперативной памяти в битах, байтах, килобайтах, мегабайтах, гигабайтах;
- надёжность, которая характеризует среднюю наработку на отказ – не менее 15 тыс. ч; время восстановления работоспособности, срок службы (не менее 10 лет).

## Автоматические системы управления

Автоматическая система управления (АСУ) – совокупность объекта управления (ОУ) или контроля (ОК) и управляющего устройства (УУ), которые под внешними воздействиями взаимодействуют друг с другом [24]. АСУ предназначена:

а) для формирования такого закона изменения управляющих воздействий, при котором достигается желаемое поведение объекта независимо от наличия возмущений (*задача управления*);

б) поддержания выходных величин объекта равными (или пропорциональными) некоторым эталонным функциям времени – задающим воздействиям (более узкая *задача регулирования*). Воздействия могут быть постоянными или изменяющимися как по заданному, так и по заранее неизвестному закону.

Признаки классификации АСУ:

– структура или принцип управления (разомкнутые, замкнутые, комбинированные);

– точность установившегося состояния (статические и астатические);

– функциональное назначение (стабилизаторы, следящие и программные);

– вид обрабатываемых сигналов (аналоговые и дискретные);

– статические характеристики (линейные и нелинейные);

– количество регулируемых величин (одномерные, многомерные);

– характер параметров (стационарные, нестационарные, с распределёнными параметрами).

Также АСУ разделяют на оптимальные и обыкновенные, адаптивные (экстремальные, самонастраивающиеся, самоорганизующиеся, самообучающиеся) и неадаптивные.

Основные технические характеристики АСУ: устойчивость; показатели качества в статическом режиме – регулировочная статическая характеристика, внешние статические характеристики, статическая ошибка системы (основной точностной параметр АСУ), абсолютная и относительная величина отклонения выходного параметра, статизм внешней характеристики, порядок астатизма; в динамическом режиме – время переходного процесса, перерегулирование, колебательность, период собственных колебаний; косвенные показатели – частотные, корневые и интегральные критерии оценки качества [37].

## 3.3 Математические методы описания и представления процессов в системах

### 3.3.1 Классификация процессов

Все существующие физические процессы *по происхождению* можно разделить на две обширные категории: естественные и искусственные (рисунок 3.20).

*По степени полезности для функционирования ТС* естественные процессы делятся на вредные (или мешающие) и полезные. Вредные процессы представлены помехами естественного происхождения. Их источниками, как правило, являются молнии, космическое ионизирующее излучение, высокоэнергетические процессы в ионосфере и т.д. В состав полезных входят процессы, переносящие информацию о физическом состоянии их источников.

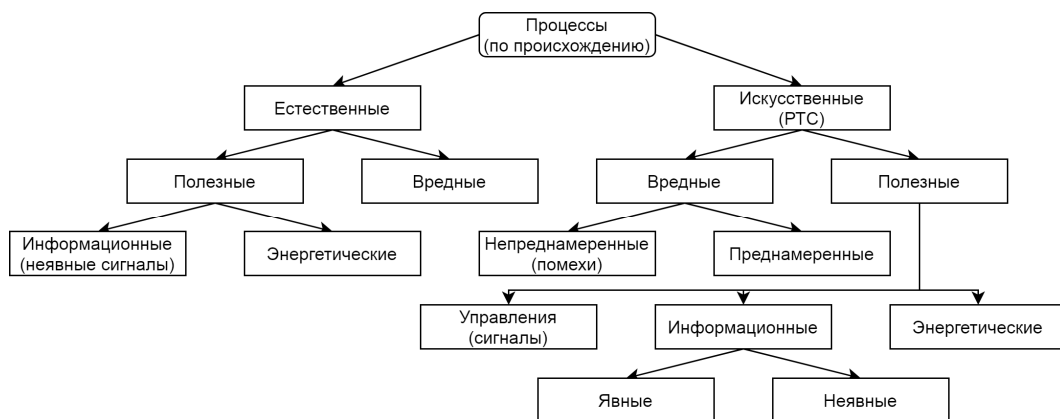


Рисунок 3.20 – Классификация процессов

---

*К примеру, естественное электромагнитное излучение земных покровов и морских поверхностей в неявном виде несет информацию об их физическом состоянии, которая полезна для геологии, гляциологии, океанологии и других наук. Извлечением и интерпретацией этой информации занимается техническая отрасль пассивной радиолокации.*

---

Энергетические процессы естественного происхождения используются человеком для обеспечения функционирования ТС.

---

*К примеру, электронные системы космических спутников получают электрическое питание от солнечных батарей, преобразующих энергию солнечного излучения в электричество.*

---

В свою очередь искусственные процессы, также называемые радиотехническими процессами, по степени полезности делятся на мешающие и полезные. В состав мешающих процессов входят непреднамеренные (помехи искусственного

происхождения, например работа электрических генераторов, излучение от линий электропередач, промышленного электротехнического оборудования и т. п.) и преднамеренные (процессы, формируемые целенаправленно для решения задач радиоэлектронной борьбы).

По назначению полезные процессы подразделяются на процессы управления и регулирования, которые также называются сигналами управления и регулирования; информационные процессы, которые по определению называются сигналами, переносящими разнообразную информацию (телевизионные сигналы, сигналы радиовещания и т.п.); энергетические процессы, используемые для электропитания электронных и радиотехнических систем и устройств. По степени выраженности информационные процессы подразделяются на явные, для обнаружения и идентификации которых не требуется специальных процедур обработки сигналов, и неявные, о существовании которых известно априори, но они, как правило, замаскированы в смеси других естественных или искусственных процессов так, что для их обнаружения и идентификации требуется специальная обработка смеси сигналов.

В условиях реальной помеховой обстановки информационные процессы представляют собой смесь полезных и вредных процессов. Однако соотношение их энергий позволяет разграничивать информационные процессы на явные и неявные.

---

*К примеру, сигнал мощного передатчика, принимаемый приёмником в условиях их относительной близости, является явным. Сигнал того же передатчика, удалённого на большое расстояние от приёмника, может быть неотличим от внутренних шумов приёмника. Априори известно, что этот сильно ослабленный сигнал существует в данной точке приёма, однако его энергия меньше энергии смеси собственных шумов приёмника и помех, поступающих на его вход, так что сигнал оказывается неявным, неразличимым в данных условиях.*

---

Из классификационной схемы видно, что к сигналам искусственного происхождения относятся не все полезные процессы, поэтому в дальнейшем вместо понятия «сигнал» будем использовать более широкое понятие «процесс», если отдельно не оговорено иное или нет конкретных уточнений по тексту.

Раздел теоретической радиотехники, посвящённый изучению идей, методов анализа и принципов реализации основных радиотехнических процессов, т.е. процессов преобразования сигналов и помех в радиотехнических цепях, устройствах и системах, называют «Радиотехнические цепи и сигналы» [24].

Различают:

– *линейные процессы* (линейное усиление и фильтрация, дифференцирование, интегрирование, задержка сигнала), не сопровождающиеся трансформацией спектров (появлением на выходе цепи гармонических составляющих сигнала с частотами, отсутствующими на входе) и реализуемые в линейных цепях;

– *нелинейные процессы* (модуляция, детектирование, преобразование, умножение и деление частоты, нелинейное усиление, ограничение, генерирование

колебаний и т.п.), сопровождающиеся трансформацией спектров и реализуемые лишь в нелинейных или параметрических цепях.

Основные понятия, термины и определения в области радиотехнических сигналов (РТС) устанавливает национальный стандарт «Сигналы радиотехнические. Термины и определения». Классификация РТС по ряду основных признаков приведена на рисунке 3.21 [25].

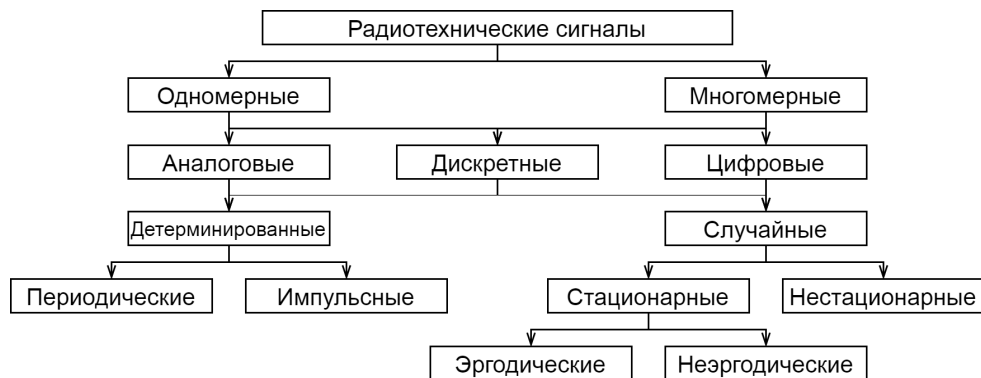


Рисунок 3.21 – Классификация радиотехнических сигналов

Радиотехнические сигналы удобно рассматривать в виде математических функций, заданных во времени и в физических координатах. С этой точки зрения сигнал описывается одной (одномерный сигнал,  $n = 1$ ), двумя (двумерный сигнал,  $n = 2$ ) или более (многомерный сигнал,  $n > 2$ ) независимыми переменными. Одномерные сигналы являются функциями только времени, а многомерные, кроме того, отражают положение в  $n$ -мерном пространстве. Многомерный сигнал – упорядоченная совокупность одномерных сигналов.

---

*В телевизионных системах сигнал черно-белого изображения можно рассматривать как функцию  $f(x, y, t)$ , т.е. двух пространственных координат и времени, представляющую интенсивность излучения в точке  $(x, y)$  в момент времени  $t$  на катоде. При передаче цветного телевизионного сигнала имеем три функции:  $f(x, y, t)$ ,  $g(x, y, t)$ ,  $h(x, y, t)$ , определённые на трёхмерном множестве (можно рассматривать эти три функции как компоненты трёхмерного векторного поля). Кроме того, различные виды телевизионных сигналов могут возникать при передаче телевизионного изображения совместно со звуком.*

---

По особенностям структуры временного представления (рисунок 3.22) все РТС делятся на аналоговые (analog), дискретные (discrete-time; от лат. discretus – разделённый, прерывистый) и цифровые (digital).

Если физический процесс, порождающий одномерный сигнал, можно представить непрерывной функцией времени  $u(t)$  (рисунок 3.22,а), то его называют *аналоговым (непрерывным)* или более обобщённо *континуальным (continuos – многоступенчатый)*, если он имеет скачки, разрывы по оси амплитуд. Заметим, что традиционно

термин «аналоговый» используют для описания сигналов, которые непрерывны во времени. Непрерывный сигнал можно трактовать как действительное или комплексное колебание во времени  $u(t)$ , являющееся функцией непрерывной действительной временной переменной  $t$ . Понятие «аналоговый» сигнал связано с тем, что его любое мгновенное значение *аналогично* закону изменения соответствующей физической величины во времени.

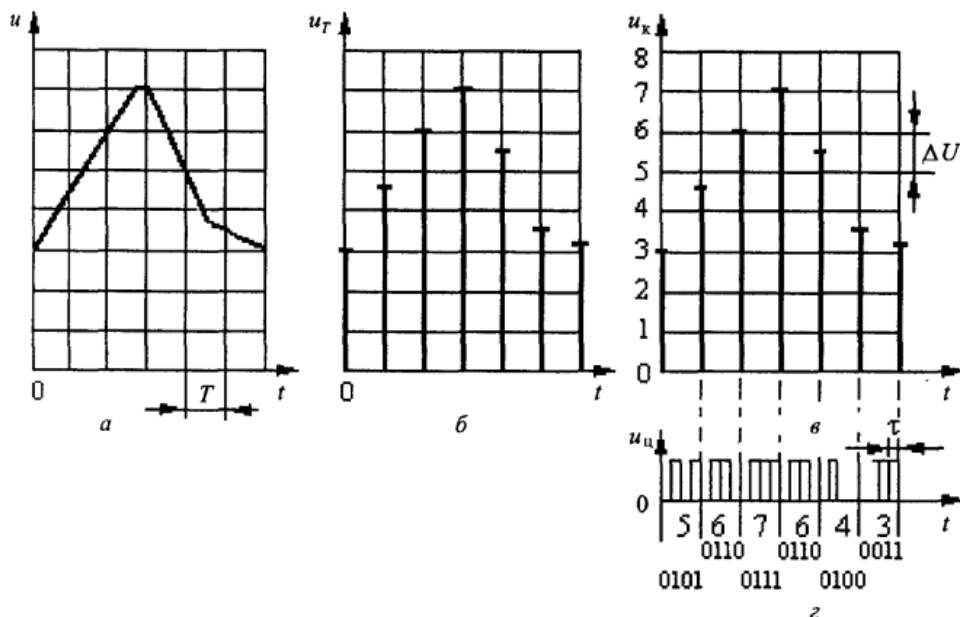


Рисунок 3.22 – Радиотехнические сигналы:

$a$  – аналоговый;  $б$  – дискретный;  $в$  – квантованный;  $z$  – цифровой

В радиоэлектронике и технике связи широко применяются импульсные системы, устройства и цепи, действие которых основано на использовании дискретных сигналов.

---

*Например, электрический сигнал, отражающий речь, является непрерывным как по уровню, так и по времени, а датчик температуры, выдающий её значения через каждые 10 мин, служит источником сигналов, непрерывных по значению, но дискретных по времени.*

---

Дискретный сигнал получают из аналогового путём специального преобразования. Процесс преобразования аналогового сигнала в последовательность отсчетов называется *дискретизацией (sampling)*, а результат такого преобразования – *дискретным сигналом* или *дискретным рядом (discrete series)*. Простейшая математическая модель дискретного сигнала  $u_T(t)$  – последовательность точек на временной оси, взятых, как правило, через равные промежутки времени  $T = \Delta t$ , называемые периодом дискретизации (*интервалом, шагом дискретизации; sample time*), в каждой из

которых заданы значения соответствующего непрерывного сигнала (см. рисунок 3.22,б). Величина, обратная периоду дискретизации, называется *частотой дискретизации (sampling frequency)*:  $f_d = 1/T$  (другое обозначение  $f_d = 1/\Delta t$ ).

Разновидностью дискретных сигналов является *цифровой сигнал (digital signal)*. В процессе преобразования дискретных отсчетов сигнала в цифровую форму (обычно в двоичные числа) производится его *квантование по уровню (quantization)* напряжения  $\Delta$ . При этом значения уровней сигнала можно пронумеровать двоичными числами с конечным числом разрядов. Сигнал, дискретный во времени и квантованный по уровню, называют цифровым сигналом. В цифровом сигнале дискретные значения  $u_T(t)$  вначале квантуют по уровню (рисунок 3.22, в) и затем квантованные отсчеты дискретного сигнала заменяют числами  $u_{ц}(t)$ , чаще всего реализованными в двоичном коде, который представляют высоким (единица) и низким (ноль) уровнями напряжения – короткими импульсами длительностью  $\tau$  (рисунок 3.22, г). Такой код называют *униполярным*.

Поскольку отсчёты могут принимать конечное множество значений уровней напряжения, то при представлении сигнала неизбежно происходит его округление. Возникающие при этом ошибки округления называются *ошибками (или шумами) квантования (quantization error, quantization noise)*. Последовательность чисел, представляющая сигнал при цифровой обработке, является *дискретным рядом (discrete series)*. Числа, составляющие последовательность, являются значениями сигнала в отдельные (дискретные) моменты времени и называются *цифровыми отсчетами сигнала (samples)*. Далее квантованное значение сигнала представляется в виде набора импульсов, характеризующих нули («0») и единицы («1») в двоичной системе счисления (см. рисунок 3.22,з). Набор импульсов используют для амплитудной модуляции несущего колебания и получения кодово-импульсного радиосигнала.

В результате цифровой обработки получаются цифры – абстракция, способ описания информации, содержащейся в сообщении. Следовательно, необходимо иметь что-то физическое, что будет представлять цифры или являться «носителем» цифр. Итак, сущность цифровой обработки состоит в том, что *физический* сигнал (напряжение, ток и т.д.) преобразуется в последовательность *чисел*, которая затем подвергается *математическим* преобразованиям в вычислительном устройстве. Трансформированный цифровой сигнал (последовательность чисел) при необходимости может быть преобразован обратно, т.е. в напряжение или ток.

Одним из основных признаков, по которым различаются сигналы, является предсказуемость сигнала (его значений) во времени.

По математическому представлению (по степени наличия *априорной*, от лат. *a priori* – из предшествующего, т.е. доопытной информации) все радиотехнические сигналы принято делить на две основные группы: детерминированные (регулярные; *determined*) и случайные (*casual*) сигналы (рисунок 3.23).

*Детерминированными* называют радиотехнические сигналы, мгновенные значения которых в любой момент времени достоверно известны, т.е. предсказуемы

с вероятностью, равной единице. Детерминированные сигналы описываются заранее заданными функциями времени.

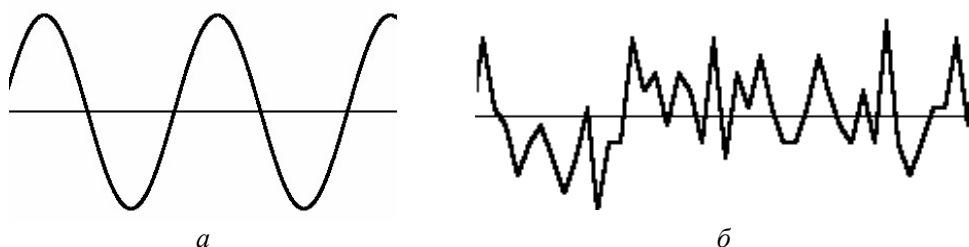


Рисунок 3.23 – Сигналы:  
а – детерминированный; б – случайный

---

*Простейшими примерами детерминированного сигнала являются гармоническое колебание с известной начальной фазой, высокочастотные колебания, модулированные по известному закону, последовательность или пачка импульсов, форма, амплитуда и временное положение которых заранее известны.*

---

Детерминированные сигналы разделяют на *периодические* и *непериодические* (*импульсные*). Сигнал конечной энергии, существенно отличный от нуля в течение ограниченного интервала времени, соизмеримого со временем завершения переходного процесса в системе, для воздействия на которую он предназначен, называют *импульсным* сигналом.

*Случайными* называют сигналы, мгновенные значения которых в любой момент времени неизвестны и не могут быть предсказаны с вероятностью, равной единице. Фактически, для случайных сигналов можно знать только вероятность того, что он примет какое-либо значение. Сигналом, несущим полезную информацию, может быть только случайный сигнал. Информация заложена во множестве амплитудных, частотных (фазовых) или кодовых изменений передаваемого сигнала. Сигналы связи во времени меняют мгновенные значения, причём эти изменения могут быть предсказаны лишь с некоторой вероятностью, меньшей единицы. Таким образом, сигналы связи являются в некотором роде случайными процессами, поэтому их описание осуществляется посредством методов, аналогичных методам описания случайных процессов.

В процессе передачи полезной информации РТС могут быть подвергнуты тому или иному преобразованию. Это обычно отражают в их названии: *модулированные*, *демодулированные* (*детектированные*), *кодированные* (*декодированные*), *усиленные*, *задержанные*, *дискретизированные*, *квантованные* и другие сигналы.

По назначению, сигналы можно разделить на *модулирующие* (первичный сигнал, который модулирует несущее колебание) и *модулированные* (несущее колебание).



По принадлежности к тому или иному виду радиотехнических систем, в частности систем передачи информации, различают связанные, телефонные, телеграфные, радиовещательные, телевизионные, радиолокационные, радионавигационные, измерительные, управляющие, служебные (в том числе пилот-сигналы) и другие сигналы.

Приведенная классификация РТС является краткой и не охватывает всё их разнообразие.

Помеха – стороннее воздействие, которое мешает приёму и обработке сигналов. В радиотехнических системах передачи информации помеха вызывает отклонение принятого сообщения от переданного. При радиовещательном приёме помехи проявляются в тресках и шумах, которые ухудшают качество звучания. При телевизионном приёме помехи искажают изображение, при локации они вызывают пропуск реально существующей или обнаружение несуществующей цели. Классификационная схема помех по происхождению приведена на рисунке 3.24. По принадлежности к РТС помехи подразделяют на внесистемные и внутрисистемные (внутренние шумы, шумы квантования, межканальные помехи, излучения гетеродинов и др.) [24].

По своей природе помехи подразделяются на детерминированные (помехи мешающих радиостанций) и случайные (космические, атмосферные, внутренние и др.). Мгновенные значения первых можно определить заранее, поэтому борьба с ними существенно упрощается. Мгновенные значения случайных помех заранее неизвестны и могут быть только предсказаны с определённой вероятностью. Эти помехи, в отличие от детерминированных, полностью устранить невозможно, поскольку они определяются дискретным строением материи и статистическим характером многих физических процессов. Вследствие этого их подавление вызывает значительные трудности как при разработке теории, так и при технической реализации. Значительная часть помех имеет гауссовский или производные от него законы распределения (усечённый гауссовский, логарифмический гауссовский, полигауссовский). В числе негауссовских распределений чаще других используются законы Рэля, Лапласа, Вейбулла.

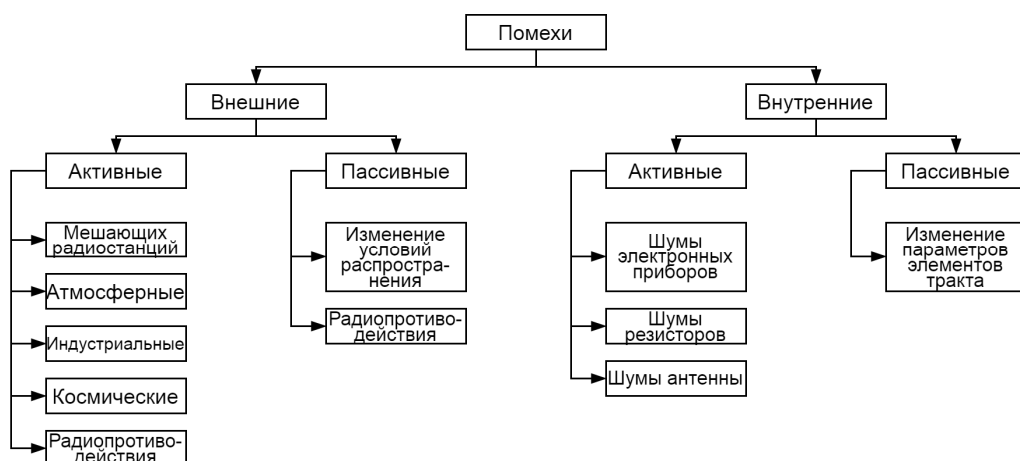


Рисунок 3.24 – Классификация помех

Помеха может влиять на сигнал через электромагнитное, электростатическое, магнитостатическое, акустическое поля, а также кондуктивным путём – через провода, шасси, монтаж и др. В общем случае на вход РЭС поступает смесь сигнала и помехи  $U_{\text{см}} = V(U_c, U_{\text{п}})$ . Если оператором  $V$  определяется сумма  $V(U_c, U_{\text{п}}) = U_c + U_{\text{п}}$ , то помеху называют *аддитивной*, а если произведение  $V(U_c, U_{\text{п}}) = U_c \cdot U_{\text{п}}$  – *мультипликативной*. Обычно первая принадлежит классу активных помех, а вторая – пассивных.

Большинство рассмотренных помех может быть представлено пятью моделями: флуктуационной, импульсной (сосредоточенной во времени), квазиимпульсной, сосредоточенной по спектру и пассивной. Удобной идеализацией реальных помех являются марковские случайные процессы, которые дают возможность охватить рассмотренные модели – стационарные и нестационарные, с гауссовским и негауссовским распределениями.

### 3.3.2 Способы описания процессов

**Параметрический базис математической модели физического процесса.** Для формализации описания процессов необходимо знать их параметрический базис, т.е. множество тех переменных, которыми описывается любой физический или технический процесс внутри и вне ЭРЭС.

Определить параметрический базис процессов в ЭРЭС можно на основе сведений о демаскирующих признаках этих средств из раздела радиотехники, относящегося к радиоэлектронной борьбе [38].

Многочисленные демаскирующие признаки ЭРЭС можно свести в следующие группы:

*частотные* – несущая частота, модуляция, количество фиксированных частот, диапазон изменения при частотной модуляции, стабильность несущей модуляции и др.;

*временные* – длительность импульса, продолжительность излучения и др.;

*энергетические* – мощность излучения, спектральная плотность мощности, динамический диапазон изменения мощности излучения и др.;

*спектральные* – ширина спектра, вид спектра, относительная величина спектральных составляющих и др.;

*пространственно-энергетические* – направление распространения излучения, направление максимума излучения, параметры диаграммы направленности антенны и др.;

*фазовые* – вид и параметры фазовой модуляции, количество дискретных скачков фазы и др.;

*поляризационные* – вид поляризации, направление вращения вектора электрического поля.

Параметрами и свойствами, с помощью которых описывается любой процесс внутри ЭРЭС, являются:

- энергия (Дж);
- мощность (Вт);
- форма процесса;
- амплитуда (В, А);
- фаза (градусы, с);
- спектр, спектральный состав (Гц);
- период (с);
- частота процесса (Гц);
- длительность импульса, длительность процесса (с);
- динамический диапазон процесса (дБ, разы);
- природа процесса.

Для внешних условий (условий среды) к указанным выше параметрам добавляются параметры электромагнитной волны (ЭМВ):

- состояние поляризации ЭМВ (ориентация плоскости поляризации, вид поляризации, направление вращения вектора напряженности ЭМВ);
- степень поляризованности ЭМВ (полностью поляризованная волна (ППВ), частично поляризованная волна (ЧПВ), неполяризованная волна (НПВ));
- пространственный спектр ЭМВ (м);
- форма фронта ЭМВ;
- вектор направления фронта ЭМВ.

**Классификация способов представления процессов.** Для того чтобы сделать процессы объектами теоретического изучения и расчетов, следует указать способ их математического описания или, говоря языком современной науки, создать математическую модель исследуемого процесса [39].

Создание такой модели – первый существенный шаг на пути систематического изучения свойств явления. Прежде всего математическая модель позволяет абстрагироваться от конкретной природы носителя сигнала. В радиотехнике одна и та же математическая модель с равным успехом описывает ток, напряжение, напряженность электромагнитного поля и т.д.

Существенная сторона абстрактного метода, базирующегося на понятии математической модели, заключена в том, что мы получаем возможность описывать именно те свойства сигналов, которые объективно являются определяюще важными. При этом игнорируется большое число второстепенных признаков.

---

*Например, в подавляющем большинстве случаев крайне затруднительно подобрать точные функциональные зависимости, которые соответствовали бы электрическим колебаниям, наблюдаемым экспериментально. Поэтому исследователь, руководствуясь всей совокупностью доступных ему сведений, выбирает из наличного арсенала математических моделей сигналов те, которые в конкретной ситуации*

*наилучшим и самым простым образом описывают физический процесс.  
Итак, выбор модели – процесс в значительной степени творческий.*

---

*Модель детерминированного сигнала* – математическое описание сигнала в форме, наиболее пригодной для исследования процессов его преобразования в конкретной радиотехнической системе (устройстве, узле, цепи) [24]. Отыскание модели детерминированного сигнала есть задача аппроксимации сигнала  $f(t)$  функцией

$$\tilde{f}(t) = \Psi(t, C_1, C_2, \dots, C_i),$$

состоящая в определении вида функции  $\tilde{f}(t)$  и подборе значений коэффициентов  $C_i$ , минимизирующих ошибку аппроксимации

$$\Delta f(t) = \tilde{f}(t) - f(t)$$

(или её количественную оценку  $\langle |\Delta f(t)| \rangle, \langle \Delta f^2(t) \rangle$ ). Наиболее распространена аппроксимация рядами по упорядоченным и особенно по ортогональным системам функций  $\{\varphi(t)\}$ , т.е. суммой

$$f(t) = \sum_{i=0}^N C_i \varphi_i(t)$$

счётного множества ортогональных колебаний  $\varphi_i(t)$  (ортогональные разложения). Возможно также представление сигнала несчетным множеством (интегральной суммой) элементарных колебаний (обратными преобразованиями Фурье или Лапласа, сверткой с  $\delta$ -функцией и т.п.). Ниже приведем краткие сведения о функциях, системах функций и методах, наиболее часто используемых для моделирования как сигналов, так и любых других функциональных зависимостей  $f(t)$  произвольного аргумента  $x$  (спектров, амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик (АЧХ и ФЧХ) цепей и т.п.).

Процессы используются для исследования систем посредством анализа их временных характеристик. Под временными характеристиками в общем случае понимается графическое изображение процесса изменения выходной величины в функции времени при переходе системы из одного равновесного состояния в другое в результате поступления на вход какого-либо типового воздействия.

Некоторые системы могут быть описаны дифференциальными уравнениями. Так как дифференциальное уравнение системы тоже определяет изменение выходной величины в функции времени при заданных начальных условиях, то временная характеристика изображает решение дифференциального уравнения для принятого типового воздействия и, следовательно, полностью характеризует динамические свойства системы.

Временные характеристики могут быть получены не только путем решения дифференциального уравнения, но и экспериментально. Поэтому возможность

определения динамических свойств системы по временной характеристике имеет исключительно важное практическое значение, так как в этом случае не требуется выводить и решать дифференциальное уравнение [37].

В качестве типовых воздействий наиболее широкое применение находят *единичное ступенчатое* и *единичное импульсное* воздействия.

Единичное ступенчатое воздействие в аналитической записи выглядит так:

$$1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0, \\ 1 & \text{при } t > 0. \end{cases}$$

При  $t = 0$  значение единичного ступенчатого воздействия не определено.

Нормированным импульсным воздействием считается единичный импульс, т.е. импульс, у которого произведение длительности на величину равно единице:

$$g_1 t_1 = g_2 t_2 = g_3 t_3 = 1,$$

где величина  $t_1$  достаточно мала.

Пределом, к которому стремится единичный импульс, когда его продолжительность стремится к нулю, является единичная импульсная функция (функция Дирака или  $\delta$ -функция), для которой имеют место следующие соотношения:

$$\delta(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \neq 0, \\ \infty & \text{при } t = 0, \end{cases}$$

причем

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1.$$

Легко видеть, что

$$\delta(t) = \frac{d}{dt} 1(t).$$

*Радиосигнал* – высокочастотный и узкополосный (в относительном смысле) сигнал

$$a(t) = A(t) \cos[\omega_n t + \theta(t)] = [A_0 + \Delta A(t)] \cos[\omega_n t + \theta_n + \Delta \theta(t)],$$

несущий сообщение в колебаниях приращений одного или нескольких своих параметров  $[\Delta A(t), \Delta \theta(t), \Delta \omega(t) = d\theta(t)/dt]$ , модулируемых с этой целью управляющими сигналами (УС). Благодаря относительным высокочастотности и узкополосности радиосигналы эффективно излучаются антеннами конструктивно приемлемых размеров, распространяются в пространстве в виде волн соответствующей физической природы, не искажаются частотно-зависимыми элементами каналов передачи, обеспечивают возможность многоканальной связи с частотным разделением каналов [24].

*Несущее колебание* – гармоническое ВЧ-колебание  $A_n \cos(\omega_n t + \theta_n)$ , параметры которого модулируются при формировании радиосигнала. *Несущая частота* –

частота  $\omega_n$  несущего колебания. *Управляющий сигнал* – модулирующий сигнал, пропорционально которому изменяется параметр радиосигнала.

*Модуляция* – процесс управления любым параметром несущего колебания по закону передаваемого сообщения, а также результат этого процесса, т.е. свойство радиосигнала, состоящее в изменениях его параметра. Модуляция может быть как полезной (формирование радиосигнала), так и вредной, сопутствующей (искажение радиосигнала в избирательных цепях).

В зависимости от параметра, модулируемого по закону УС, различают амплитудную, фазовую и частотную модуляции (АМ, ФМ, ЧМ) и соответствующие им виды радиосигналов. ФМ и ЧМ объединяют общим термином *угловая модуляция*. Также применяется *поляризационная модуляция*, т.е. модуляция вида поляризации электромагнитных волн. *Манипуляция* – разновидность импульсной модуляции – дискретная модуляция, отличающаяся квантованностью значений модулируемого параметра и дискретностью промежутков времени между их сменами.

*Спектральный (гармонический) анализ периодических сигналов (ПС)* – разложение их на счетное множество гармонических колебаний (гармоник) с кратными частотами; описание и исследование свойств ПС в частотной области с помощью частотных распределений (спектров) амплитуд, фаз и мощностей этих гармоник [24]. Цель спектрального анализа периодических сигналов – представление (аппроксимация) ПС суммой гармоник – ориентирована на использование принципа суперпозиции и метода комплексных амплитуд для отыскания отклика линейной цепи на сложный ПС. Спектральный анализ ПС осуществляется разложением его в тригонометрический или комплексный (экспоненциальный) ряд Фурье по соответствующим формулам. Приведем формулу тригонометрического ряда Фурье:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\Omega t + b_n \sin n\Omega t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\Omega t + \psi_n),$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \cos n\Omega t dt = 2C_{nc},$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \sin n\Omega t dt = 2C_{ns},$$

$$A_0 = \frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) dt = C_0,$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} = 2C_n,$$

$$\psi_n = -\arctg(b_n/a_n),$$

$$\bar{P} = \langle f^2(t) \rangle = P_0 + \sum_{n=1}^{\infty} P_n = \left(\frac{a_0}{2}\right)^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n^2}{2},$$

где  $T$  – период сигнала;  $\Omega = 2\pi/T$  – его частота.

Отыскание коэффициентов ряда Фурье является спектральным анализом ПС, суммирование ряда Фурье (восстановление ПС по его спектру) – спектральным синтезом. Оба ряда аппроксимируют с нулевой среднеквадратической ошибкой любой физически возможный сигнал  $f(t)$  на конечном интервале времени  $[t_0, t_1]$ . Однако вследствие кратности частот гармоник суммы рядов Фурье периодичны с периодом  $t_1 - t_0$ , что дает возможность распространить аппроксимацию ПС на интервал  $[-\infty, \infty]$ . Для этого достаточно выбрать интервал ортогональности  $t_1 - t_0$  так, чтобы он был равен периоду  $T$  аппроксимируемого ПС. Ряды Фурье инвариантны к выбору начала отсчета времени, поэтому его можно выбирать произвольно, исходя из удобства записи и интегрирования ПС (например, интегрировать в пределах  $[0, T]$  или  $[-T/2, T/2]$ ).

Гармоника – составляющая  $A_n \cos(n\Omega t + \psi_n)$  гармонического спектра ПС  $f(t) = f(t + kT)$  с частотой, равной или в целое число раз  $n$  большей частоты

$\Omega = 2\pi/T$ . Число  $n$  называют кратностью или номером гармоники;  $n = 0$  соответствует постоянной составляющей (среднему значению  $f(t)$ ) ПС. Спектры ПС всегда дискретны (линейчатые), не могут иметь частот, не кратных частоте ПС, и имеют общую тенденцию к спаду амплитуды гармоник с ростом частоты.

На рисунке 3.25 показаны спектры: амплитудный (АС), фазовый (ФС) и мощности (СМ).

*Спектральный анализ непериодических сигналов (НС)* – разложение детерминированных НС на несчетное множество микрогармоник (гармонических колебаний с бесконечно малыми комплексными амплитудами  $d\dot{C}(\omega) = dC(\omega)e^{j\psi(\omega)}$  и бесконечно близкими частотами, отличающимися на  $d\omega = 2\pi df$ ) и представление этого множества комплексной спектральной плотностью

$$\dot{S}(\omega) = S(\omega)e^{j\psi(\omega)} = \frac{dC(\omega)}{df}e^{j\psi(\omega)}.$$

Спектральный анализ НС – это описание и исследование свойств НС в частотной (спектральной) области с помощью частотных распределений (спектров) – спектральных плотностей амплитуд (СПА) и спектральных плотностей энергии (СПЭ).

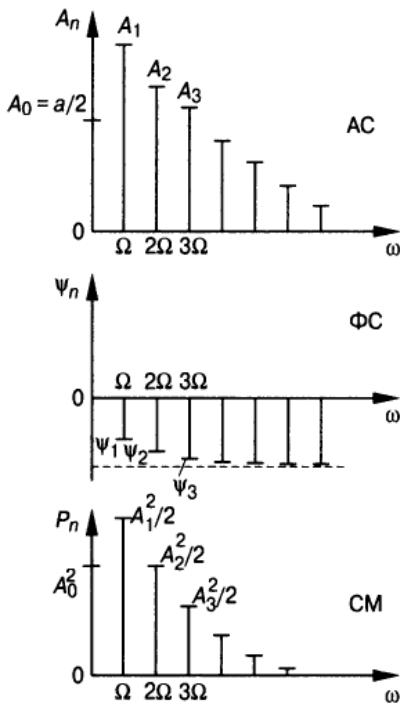


Рисунок 3.25 – Спектры периодического процесса: амплитудный (АС), фазовый (ФС) и мощности (СМ)

Его цель – представление (аппроксимация) НС интегральной суммой микрогармоник – ориентирована на использование принципа суперпозиции и метода комплексных амплитуд для отыскания отклика линейной цепи (ЛЦ) на сложный НС и достигается с помощью преобразований Фурье (ПФ). Прямое ПФ решает задачу спектрального анализа НС (отыскание  $\dot{S}(\omega)$ ), а обратное преобразование Фурье (ОПФ) – задачу спектрального синтеза (восстановления сигнала  $f(t)$  по его СПА  $\dot{S}(\omega)$  с нулевой среднеквадратической ошибкой). Таким образом, любой физически возможный НС можно однозначно и равнозначно представить во временной и частотной областях функциями времени  $f(t) = F^{-1}\{\dot{S}(\omega)\}$  и частоты  $\dot{S}(\omega) = F\{f(t)\}$ , взаимное соответствие между которыми обозначают  $f(t) \Leftrightarrow \dot{S}(\omega)$ . Спектры НС – сплошные (континуальные), чем они принципиально отличаются от дискретных спектров периодических сигналов.

СПА – физическая величина, имеющая смысл удельной (отнесенной к единице полосы частот) комплексной амплитуды микрогармоник  $\dot{S} = \frac{dC}{df} e^{j\psi}$  с единицей измерения (для электрических сигналов) вольт на герц или ампер на герц. СПА – комплексная функция частоты  $\dot{S}(\omega)$  с тем же физическим смыслом и размерностью, представляющая сигнал  $f(t)$  в частотной области и часто (для сокращения) называемая просто спектральной плотностью или спектром сигнала. Общие свойства СПА основаны на ее математическом определении:

$$\dot{S}(\omega) = F\{f(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt = A(\omega) - jB(\omega) = S(\omega) e^{j\psi(\omega)},$$

где  $A(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cos \omega t dt$ ;  $B(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \sin \omega t dt$ ;  $S(\omega) = \sqrt{A^2(\omega) + B^2(\omega)}$ ;

$\psi(\omega) = -\text{arctg}[B(\omega)/A(\omega)]$ . Они состоят в следующем: СПА четной функции времени  $f(-t) = f(t)$  действительна, т.е.  $\dot{S}(\omega) = A(\omega)$ ; нечетной функции  $f(-t) = -f(t)$  мнима, т.е.  $\dot{S}(\omega) = -jB(\omega)$ , а в общем случае комплексна;  $S(\omega) = |\dot{S}(\omega)|$  и  $\text{Re}\{\dot{S}(\omega)\} = A(\omega)$  – четные функции частоты, а  $\psi(\omega)$  и  $\text{Im}\{\dot{S}(\omega)\} = -B(\omega)$  – нечетные функции частоты; СПА на нулевой частоте равна площади под кривой  $f(t)$  (площади импульса для импульсных сигналов),

т.е.  $\dot{S}(0) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) dt$ .



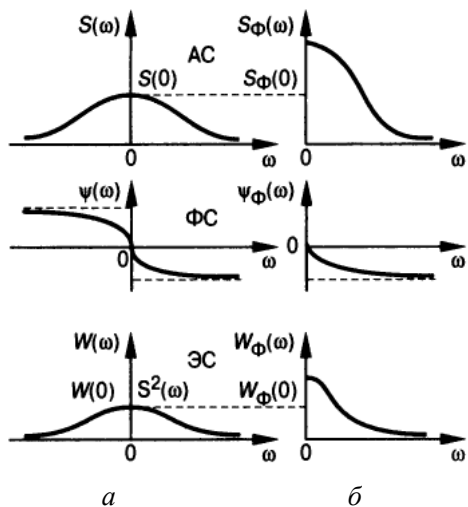


Рисунок 3.26 – Спектрограммы непериодических сигналов:

*a* – математическая; *б* – физическая

Различают и представляют соответствующими спектрограммами (рисунок 3.26): *амплитудный спектр* НС – частотное распределение модуля СПА  $S(\omega) = |\dot{S}(\omega)|$ ; *фазовый спектр* НС – частотное распределение фазы (аргумента) СПА  $\psi(\omega)$ ; *энергетический спектр* НС – частотное распределение спектральной плотности энергий  $W(\omega) = |S(\omega)|^2$ . Если эти спектры представлены в области  $\omega \in [-\infty, \infty]$ , то они называются математическими спектрами  $\dot{S}(\omega)$  (см. рисунок 3.26, *a*), а если в области  $\omega \in [0, \infty]$ , – физическими спектрами  $\dot{S}_\phi(\omega)$  (см. рисунок 3.26, *б*). Связь между ними понятна из сопоставления комплексной и

тригонометрической форм обратного преобразования Фурье:

$$f(t) = F^{-1}\{\dot{S}(\omega)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j[\omega t + \psi(\omega)]} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} 2S(\omega) \cos[\omega t + \psi(\omega)] d\omega,$$

$$\dot{S}_\phi(\omega) = 2S(\omega)1(\omega) = \begin{cases} 2S(\omega), & \omega > 0 \\ S(0), & \omega = 0 \\ 0, & \omega < 0 \end{cases},$$

$$\psi_\phi(\omega) = \begin{cases} \psi(\omega), & \omega \geq 0 \\ 0, & \omega < 0 \end{cases}, \quad W_\phi(\omega) = 2W(\omega)1(\omega),$$

где  $S_\phi(\omega)$ ,  $\psi_\phi(\omega)$ ,  $W_\phi(\omega)$  – физические амплитудный, фазовый спектр и энергетический спектры соответственно.

Спектральная плотность энергии (СПЭ) сигнала – физическая величина  $W(\omega) = dE/df$ , имеющая смысл удельной (отнесенной к единице полосы частот) энергии сигнала с единицей измерения джоуль на герц. Частотное распределение СПЭ:

$$W(\omega) = \dot{S}(\omega)\dot{S}^*(\omega) = |\dot{S}(\omega)|^2 = S^2(\omega)$$

Энергия сигнала – энергия, выделяемая сигналом на сопротивлении 1 Ом – может быть вычислена как по временному, так и по спектральному представлению, что подтверждается равенством Парсеваля (теоремой энергии)

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W(\omega) d\omega = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} S^2(\omega) d\omega.$$

ЭС и автокорреляционная функция связаны между собой преобразованиями Фурье:  $W(\omega) = F\{B(\tau)\}$ ,  $B(\tau) = F^{-1}\{W(\omega)\}$ . Восстановить сигнал  $f(t)$  по его энергетическому спектру невозможно, поскольку отсутствует информация о фазах микрогармоник, но это не уменьшает важность ЭС как характеристики сигнала.

*Корреляционный анализ детерминированных сигналов* – анализ сигналов во временной области с целью выявления и оценки их подобия (сходства), основанный на изучении корреляционных функций. *Корреляция* – соответствие, взаимозависимость, взаимосвязь явлений или процессов, количественная характеристика их подобия. Корреляционная функция – зависимость корреляции двух (в общем случае комплексных) сигналов  $\dot{f}_1(t)$  и  $\dot{f}_2(t)$  от временного сдвига между ними, определяемая выражениями:

– для сигналов конечной энергии

$$B_{1,2}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{f}_1(t) \dot{f}_2^*(t + \tau) dt ;$$

– для сигналов конечной средней мощности (в том числе случайных эргодических)

$$B_{1,2}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \dot{f}_1(t) \dot{f}_2^*(t + \tau) dt ;$$

– для периодических сигналов с периодом  $T$

$$B_{1,2}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \dot{f}_1(t) \dot{f}_2^*(t + \tau) dt .$$

Заметим, что для вещественных сигналов символы комплексности (точку) и комплексной сопряженности (звездочку) над функциями не ставят.

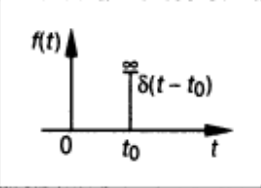
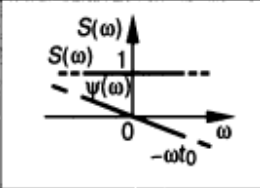
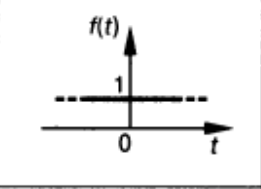
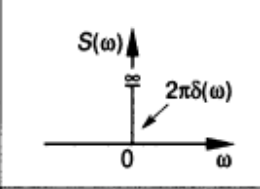
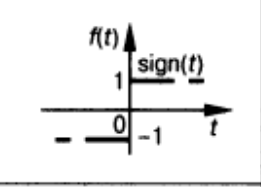
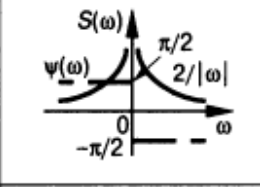
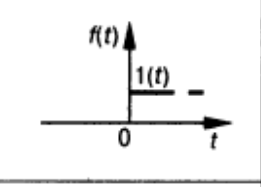
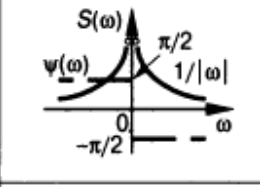
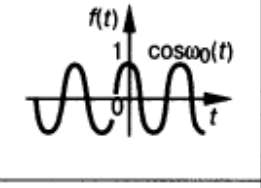
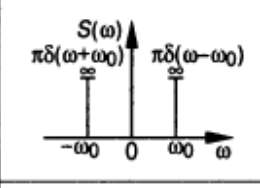
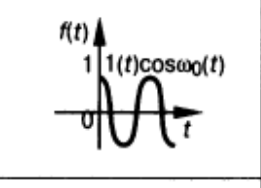
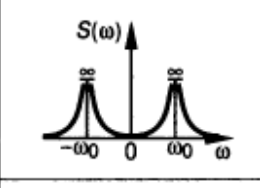

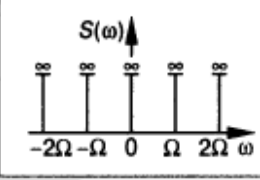
*Автокорреляционная функция (АКФ)* – корреляционная функция двух одинаковых сигналов (сигнала и его копии), определяемая по приведенным выше формулам при условии  $\dot{f}_1(t) = \dot{f}_2(t) = \dot{f}(t)$ .

*Взаимно корреляционная функция (ВКФ)* – корреляционная функция двух различных (в отличие от АКФ) сигналов, определяемая по приведенным выше формулам.

Спектры часто встречающихся сигналов с бесконечной энергией приведены в таблице 3.19.

Важное место в анализе и синтезе процессов в ЭРЭС занимают *теоремы спектрального анализа* (теоремы о спектрах, свойства преобразований Фурье), устанавливающие соответствие между эквивалентными математическими операциями во временной и частотной областях над сигналами и их спектрами. Это мощное средство теоретического спектрального анализа и синтеза, а также выявления и осмысления фундаментальных особенностей и свойств сигналов и цепей.

Таблица 3.19 – Спектры часто встречающихся сигналов с бесконечной энергией

Сигнал $f(t)$	Спектр (СПА) $\dot{S}(\omega) = S(\omega)e^{j\psi(\omega)}$		
$f(t) = \delta(t - t_0)$ 	$S(\omega) = 1 \cdot e^{-j\omega t_0}$		
$f(t) = 1$ 	$S(\omega) = 2\pi\delta(\omega)$		
$f(t) = \text{sign}(t)$ 	$S(\omega) = 2/j\omega$		
$f(t) = 1(t)$ 	$S(\omega) = \pi\delta(\omega) + 1/j\omega$		
$f(t) = \cos\omega_0(t)$ 	$S(\omega) = \pi[\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)]$		
$f(t) = 1(t)\cos\omega_0(t)$ 	$S(\omega) = (\pi/2)[\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)] + j\omega/(\omega_0^2 - \omega^2)$		
$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT)$ 	$S(\omega) = \Omega \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - n\Omega)$ $(\Omega = 2\pi/T)$		

### 3.4 Математические методы описания и представления систем

**Физические системы и их математические модели.** Системы, применяемые для обработки, преобразования и передачи сигналов, весьма разнообразны по принципам внутреннего устройства и внешним характеристикам. Для того чтобы их можно было сравнивать и классифицировать, необходимо рассмотреть исходные понятия [39].

Как было сказано выше, ЭРЭС независимо от своего назначения и уровня сложности представляет собой систему, т.е. совокупность физических объектов, между которыми существуют определенные взаимодействия. У системы можно выделить входы и выходы, а саму ТС представить моделью «черного ящика» (рисунок 3.27).

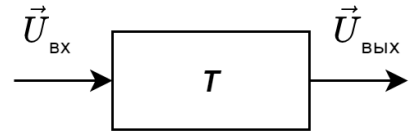


Рисунок 3.27 – Система как «черный ящик»

**Системные операторы.** В наиболее простом случае как входной сигнал  $u_{\text{ВХ}}(t)$ , так и выходной сигнал  $u_{\text{ВЫХ}}(t)$ , называемый также *откликом* или *выходной реакцией* системы, описывается одиночными функциями времени. В более общем случае входной сигнал представляется в виде  $m$ -мерного вектора:

$$\vec{U}_{\text{ВХ}}(t) = \{u_{\text{ВХ}1}(t), u_{\text{ВХ}2}(t), \dots, u_{\text{ВХ}m}(t)\},$$

а выходной сигнал – в виде  $n$ -мерного вектора:

$$\vec{U}_{\text{ВЫХ}}(t) = \{u_{\text{ВЫХ}1}(t), u_{\text{ВЫХ}2}(t), \dots, u_{\text{ВЫХ}n}(t)\}.$$

Закон связи между сигналами  $\vec{U}_{\text{ВХ}}(t)$  и  $\vec{U}_{\text{ВЫХ}}(t)$  задают системным оператором  $T$ , результатом воздействия которого на сигнал  $\vec{U}_{\text{ВХ}}$  служит сигнал  $\vec{U}_{\text{ВЫХ}}$ :

$$\vec{U}_{\text{ВЫХ}}(t) = T\vec{U}_{\text{ВХ}}(t). \quad (3.4)$$

---

**Пример.** Предположим, что некоторая система преобразует одномерный входной сигнал по закону  $u_{\text{ВЫХ}}(t) = 15 du_{\text{ВХ}}(t)/dt$ .

В данном случае системный оператор может быть записан так:

$$T \equiv 15 \frac{d}{dt}.$$

Из этого выражения непосредственно вытекает структурная схема системы, образованная каскадным соединением масштабного звена (идеального усилителя) и дифференциатора.

---

Чтобы полностью определить задачу, следует указать также область  $D_{\text{ВХ}}$  некоторого функционального пространства, которая называется *областью допустимых входных воздействий*. Задание этой области описывает характер входных сигналов,

которые, как отмечалось выше, могут быть непрерывными или дискретными, детерминированными или случайными. Подобным же образом должна быть указана область  $D_{\text{ВЫХ}}$  допустимых выходных сигналов.

Математической моделью системы называют совокупность системного оператора  $T$  и двух областей допустимых сигналов  $D_{\text{ВХ}}, D_{\text{ВЫХ}}$ .

Классификацию систем проводят на основании существенных свойств их математических моделей.

**Стационарные и нестационарные системы.** Принято говорить, что система стационарна, если её выходная реакция не зависит от того, в какой момент времени поступает входной сигнал. Если  $T$  – оператор стационарной системы, то из равенства (3.4) следует, что

$$\bar{U}_{\text{ВЫХ}}(t \pm t_0) = T\bar{U}_{\text{ВХ}}(t \pm t_0) \quad (3.5)$$

при любом значении  $t_0$ . Стационарные системы называют также системами с постоянными во времени параметрами.

Если же свойства системы не инвариантны относительно выбора начала отсчета времени, то такую систему называют *нестационарной* (системой с переменными во времени параметрами или параметрической системой).

**Линейные и нелинейные системы.** Важнейший принцип классификации систем основан на том, что различные системы по-разному ведут себя при подаче на вход суммы нескольких сигналов. Если оператор системы таков, что справедливы равенства

$$\begin{aligned} T(\bar{U}_{\text{ВХ1}} + \bar{U}_{\text{ВХ2}}) &= T\bar{U}_{\text{ВХ1}} + T\bar{U}_{\text{ВХ2}}, \\ T(\alpha\bar{U}_{\text{ВХ}}) &= \alpha T\bar{U}_{\text{ВХ}}, \end{aligned} \quad (3.6)$$

где  $\alpha$  – произвольное число, то система называется *линейной*. Условия (3.6) выражают фундаментальный принцип суперпозиции.

Если условия (3.6) не выполняются, то говорят, что система является *нелинейной*.

**Пример 1.** Некоторая система производит обработку входного сигнала

$$\text{по закону } u_{\text{ВЫХ}}(t) = \left( \frac{d}{dt} + \alpha \right) u_{\text{ВХ}}(t).$$

Непосредственной проверкой убеждаемся, что условия (3.6) выполняются. Таким образом, данная система линейна.

**Пример 2.** Некоторая система работает как идеальный квадратер в соответствии с алгоритмом  $u_{\text{ВЫХ}}(t) = u_{\text{ВХ}}^2(t)$ .

Подав на вход сумму двух сигналов  $u_{\text{ВХ1}} + u_{\text{ВХ2}}$ , на выходе получим

$$u_{\text{ВЫХ}} = u_{\text{ВХ1}}^2 + 2u_{\text{ВХ1}}u_{\text{ВХ2}} + u_{\text{ВХ2}}^2.$$

Наличие перекрестного слагаемого  $2u_{\text{ВХ1}}u_{\text{ВХ2}}$  указывает на то, что данная система нелинейна.

Строго говоря, все физические системы, с которыми имеет дело радиотехника, в той или иной степени нелинейны. Однако существует много систем, которые весьма точно описываются линейными моделями. Так, практически всегда можно пренебречь нелинейностью обычных резисторов, конденсаторов и некоторых индуктивных элементов.

Нелинейные радиотехнические устройства и системы содержат обычно полупроводниковые диоды и транзисторы, имеющие вольт-амперные характеристики (ВАХ) сложного вида.

Теория нелинейных систем оказывается, как правило, довольно сложной. Далеко не все результаты могут быть получены аналитическим путем. Однако именно с помощью нелинейных элементов осуществляются важнейшие преобразования радиотехнических сигналов.

Таким образом, линейные и нелинейные системы осуществляют в ЭРЭС следующие процессы [24]:

– *линейные* (линейное усиление и фильтрацию, дифференцирование, интегрирование, задержку сигнала), не сопровождающиеся трансформацией спектров (появлением на выходе цепи гармонических составляющих сигнала с частотами, отсутствующими на входе) и реализуемые в линейных цепях;

– *нелинейные* (модуляцию, детектирование, преобразование, умножение и деление частоты, нелинейное усиление, ограничение, генерирование колебаний и т.п.), сопровождающиеся трансформацией спектров и реализуемые лишь в нелинейных или параметрических цепях.

***Сосредоточенные и распределенные системы.*** Другой критерий классификации радиотехнических систем основан на сопоставлении физических размеров системы и рабочей длины волны, процесса, с которым эта система работает.

В процессе проектирования ЭРЭС необходимо принимать во внимание соотношение линейных геометрических размеров самой системы  $l$  или составляющих её частей и элементов с длинами волн  $\lambda$  электромагнитных процессов, протекающих в данной ТС, в связи с чем токи и напряжения в ней являются функциями не только времени, но и пространственных координат [24].

Если выполняется условие  $\lambda \gg l$ , то проектировщик имеет дело с *сосредоточенными системами*. В сосредоточенной электрической цепи всегда можно выделить физические области с преимущественной локализацией энергии электрического поля (конденсаторы) и магнитного поля (индуктивные элементы). Свойства сосредоточенных цепей слабо зависят от конфигурации соединительных проводников, поэтому для описания таких цепей принято использовать их абстрактные модели, называемые *принципиальными схемами*.

В радиотехнике сосредоточенные системы широко применяют вплоть до рабочих частот в несколько сотен мегагерц. Анализ и расчет сосредоточенных радиотехнических систем проводят с помощью законов Кирхгофа.

---

***Примерами*** таких систем являются *транзисторный усилитель звуковых частот (УЗЧ), интегральная микросхема операционного усилителя.*

*Линейные геометрические размеры электронных компонентов принципиальной электрической схемы УЗЧ во много раз меньше длин волн процессов, соответствующих диапазону звуковых частот (20 Гц – 20 кГц).*

---

Если выполняется обратное условие, т.е.  $\lambda \leq l$ , то проектировщик имеет дело с *распределенными системами*. В данном случае начинает работать *скин-эффект*, когда токопроводящие структуры и линии превращаются в излучатели электромагнитных волн.

Другими словами, на частотах в несколько тысяч мегагерц, т.е. в сверхвысоко-частотном (СВЧ) диапазоне, физические размеры большинства устройств оказываются сравнимыми с длиной волны передаваемых колебаний, так что становится необходимым учет конечного времени распространения сигнала. Обычные электрические цепи в этом диапазоне уже не могут использоваться и на смену им приходят *системы с распределенными параметрами* (или волновые системы). Так, вместо соединительных проводников применяются отрезки металлических труб – волноводы, вместо колебательных LC-контуров – их распределенные аналоги, называемые объёмными резонаторами.

---

*Другими примерами распределенных систем являются длинные линии, ферритовые вентили, антенны, антенные переключатели и т.д.*

---

**Импульсные, переходные и частотные характеристики линейных стационарных систем.** Справедливость принципа суперпозиции открывает прямой путь к систематическому решению задач о прохождении разнообразных сигналов через такие системы. Способ динамического представления [39] позволяет представлять сигналы в виде сумм элементарных импульсов. Если удастся тем или иным способом найти реакцию на выходе, возникающую под воздействием элементарного импульса на входе, то окончательным этапом решения задачи является суммирование таких реакций.

Анализ основан на временном представлении свойств сигналов и систем. В равной мере применим, а порой и гораздо более удобен анализ в частотной области, когда сигналы задаются рядами или интегралами Фурье. Свойства систем при этом описываются их частотными характеристиками, которые указывают закон преобразования элементарных гармонических сигналов.

**Импульсная характеристика.** Пусть некоторая линейная стационарная система описывается оператором  $T$ . Для простоты будем полагать, что входной и выходной сигналы одномерны. По определению импульсной характеристикой системы называется функция  $h(t)$ , являющаяся откликом системы на входной сигнал  $\delta(t)$ .

Это означает, что функция  $h(t)$  удовлетворяет уравнению

$$h(t) = T\delta(t).$$

Поскольку система стационарна, аналогичное уравнение будет и в случае, если входное воздействие смещено во времени на произвольную величину  $t_0$ :

$$h(t-t_0) = T\delta(t-t_0).$$

Следует ясно представить себе, что импульсная характеристика, так же как и порождающая её дельта-функция, есть результат разумной идеализации. С физической точки зрения импульсная характеристика приближенно отображает реакцию системы на входной импульсный сигнал произвольной формы с единичной площадью при условии, что длительность этого сигнала пренебрежимо мала по сравнению с характерным временным масштабом системы, например периодом ее собственных колебаний.

**Интеграл Дюамеля.** Зная импульсную характеристику линейной стационарной системы, можно формально решить любую задачу о прохождении детерминированного сигнала через такую систему. Входной сигнал всегда допускает представление в виде

$$u_{\text{вх}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u_{\text{вх}}(\tau)\delta(t-\tau)d\tau.$$

Отвечающая ему выходная реакция

$$u_{\text{вых}}(t) = Tu_{\text{вх}}(t) = T \int_{-\infty}^{\infty} u_{\text{вх}}(\tau)\delta(t-\tau)d\tau.$$

Так как интеграл есть предельное значение суммы, то линейный оператор  $T$  на основании принципа суперпозиции может быть внесен под знак интеграла. Далее, оператор  $T$  «действует» лишь на величины, зависящие от текущего времени  $t$ , но не от переменной интегрирования  $\tau$ . Поэтому

$$u_{\text{вых}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u_{\text{вх}}(\tau)T\delta(t-\tau)d\tau$$

или окончательно

$$u_{\text{вых}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u_{\text{вх}}(\tau)h(t-\tau)d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} u_{\text{вх}}(t-\tau)h(\tau)d\tau.$$

Эта формула, имеющая фундаментальное значение в теории линейных систем, называется *интегралом Дюамеля*. Из нее следует, что выходной сигнал линейной стационарной системы представляет собой свертку двух функций – входного сигнала и импульсной характеристики системы.

В более общем случае системы с  $m$  входами и  $n$  выходами следует ввести парциальные импульсные характеристики  $h_{ij}(t)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $j = 1, 2, \dots, m$ , каждая из которых отображает сигнал на  $i$ -м выходе при подаче на  $j$ -й вход дельта-функции. Совокупность функций  $h_{ij}(t)$  образует матрицу импульсных характеристик



$$h(t) = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1m} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{n1} & h_{n2} & \dots & h_{nm} \end{pmatrix}.$$

Формула интеграла Дюамеля в многомерном случае приобретает вид

$$\vec{U}_{\text{ВЫХ}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \vec{U}_{\text{ВХ}}(\tau) \mathbf{h}(t - \tau) d\tau,$$

где  $\vec{U}_{\text{ВЫХ}}$  –  $n$ -мерный вектор;  $\vec{U}_{\text{ВХ}}$  –  $m$ -мерный вектор.

При этом должны выполняться условия физической реализуемости:

1)  $h(t) = 0$  при  $t < 0$ , т.е. выходной сигнал не может возникнуть до момента появления импульса на входе;

2)  $\int_{-\infty}^{\infty} |h(t)| dt < \infty$ , т.е. система должна быть устойчивой.

**Переходная характеристика.** *Переходной характеристикой* линейной стационарной системы  $g(t)$  принято называть её выходную реакцию на воздействующий на вход сигнал, описываемый функцией Хевисайда  $\sigma(t)$ :

$$g(t) = T\sigma(t).$$

Поскольку система стационарна, переходная характеристика инвариантна относительно временного сдвига.

Между импульсной и переходной характеристиками существует связь. Так как  $\delta(t) = d\sigma/dt$ , то

$$h(t) = T \left[ \frac{d\sigma(t)}{dt} \right] = \frac{d}{dt} [T\sigma(t)] = \frac{dg}{dt}$$

или

$$g(t) = \int_{-\infty}^t h(\xi) d\xi.$$

**Частотный коэффициент передачи.** Частотным коэффициентом передачи системы называют собственное значение системного оператора  $T$ :

$$K(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-j\omega t} dt.$$

Данная формула устанавливает важный факт: частотный коэффициент передачи и импульсная характеристика линейной стационарной системы связаны между собой преобразованием Фурье. Поэтому всегда, зная функцию  $K(j\omega)$ , можно определить импульсную характеристику:

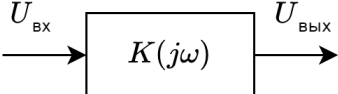
$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K(j\omega) e^{j\omega t} d\omega.$$

Мы подошли к важнейшему положению теории линейных стационарных систем – любую такую систему можно рассматривать либо во временной области с помощью её импульсной или переходной характеристики, либо в частотной области, задавая частотный коэффициент передачи. Оба подхода равноценны и выбор одного из них диктуется удобствами получения исходных данных о системе и простотой вычислений.

Для линейной системы с  $m$  входами и  $n$  выходами частотные свойства можно описать матрицей частотных коэффициентов передачи

$$K(j\omega) = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1m} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nm} \end{pmatrix}.$$

**Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики.** Функция  $K(j\omega)$  имеет простую интерпретацию: если на вход системы поступает гармонический сигнал с известной частотой  $\omega$  и комплексной амплитудой  $\vec{U}_{\text{ВХ}}$ , то комплексная амплитуда выходного сигнала имеет вид

$$\dot{U}_{\text{ВЫХ}} = K(j\omega) \dot{U}_{\text{ВХ}}.$$


Часто пользуются представлением частотного коэффициента передачи в показательной форме:

$$K(j\omega) = |K(j\omega)| \exp[j\varphi_K(\omega)].$$

Обе входящие сюда вещественные функции носят специальные названия:  $|K(j\omega)|$  – амплитудно-частотная характеристика,  $\varphi_K(\omega)$  – фазочастотная характеристика системы.

Частотный коэффициент передачи физически реализуемой системы должен удовлетворять критерию *Пэли – Винера*, т.е. быть таким, чтобы существовал интеграл

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\ln |K(j\omega)||}{1 + \omega^2} d\omega < \infty.$$

**Линейные динамические системы.** Линейными динамическими системами принято называть устройства, у которых выходной сигнал определяется не только величиной входного сигнала в рассматриваемый момент времени, но и предысторией этого сигнала. Иначе говоря, динамическая система обладает некоторой конечной или бесконечной памятью, от характера которой зависят особенности преобразования входного сигнала.

В общем случае речь идет о системах, для которых связь между одномерным входным и выходным сигналами устанавливается с помощью дифференциального уравнения

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n u_{\text{ВЫХ}}}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} u_{\text{ВЫХ}}}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{du_{\text{ВЫХ}}}{dt} + a_0 u_{\text{ВЫХ}} = \\ = b_m \frac{d^m u_{\text{ВХ}}}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} u_{\text{ВХ}}}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{du_{\text{ВХ}}}{dt} + b_0 u_{\text{ВХ}}. \end{aligned}$$

Именно такой оказывается динамическая связь между мгновенными значениями входного и выходного сигналов в электрической цепи с сосредоточенными параметрами. Если цепь линейна и стационарна, то все коэффициенты  $a_1, \dots, a_n$  и  $b_1, \dots, b_m$  являются постоянными вещественными числами. Порядок  $n$  этого уравнения принято называть *порядком динамической системы*.

**Спектральный метод.** Пусть на входе некоторой линейной стационарной системы действует детерминированный сигнал  $u_{\text{ВХ}}(t)$ , заданный обратным преобразованием Фурье:

$$u_{\text{ВХ}}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} U_{\text{ВХ}}(\omega) e^{j\omega t} d\omega.$$

Будем полагать, что известен частотный коэффициент передачи  $K(j\omega)$  системы. Как известно, комплексный сигнал вида  $\exp(j\omega t)$ , являясь собственной функцией системного оператора, создает на выходе элементарную реакцию  $K(j\omega)\exp(j\omega t)$ . Суммируя эти реакции, находим представление выходного сигнала:

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K(j\omega) U_{\text{ВХ}}(\omega) e^{j\omega t} d\omega.$$

Отсюда следует принцип спектрального метода, который заключается в том, что частотный коэффициент передачи системы служит множителем пропорциональности между спектральными плотностями сигналов на входе и выходе:

$$U_{\text{ВЫХ}}(\omega) = K(j\omega) U_{\text{ВХ}}(\omega).$$

Итак, анализ систем в частотной области отличается замечательной чертой – эффект преобразования сигнала в системе отображается алгебраической операцией умножения.

Следует отметить, что спектральный и временной подходы на основе интеграла Дюамеля полностью эквивалентны друг другу.

**Операторный метод.** К спектральному методу тесно примыкает широко распространенный операторный метод, базирующийся на представлении входных и выходных сигналов преобразованиями Лапласа.

Преобразование Лапласа позволяет путем стандартных процедур находить решения линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами.

Пусть дифференциальное уравнение

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n u_{\text{ВЫХ}}}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} u_{\text{ВЫХ}}}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{du_{\text{ВЫХ}}}{dt} + a_0 u_{\text{ВЫХ}} = \\ = b_m \frac{d^m u_{\text{ВХ}}}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} u_{\text{ВХ}}}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{du_{\text{ВХ}}}{dt} + b_0 u_{\text{ВХ}} \end{aligned}$$

устанавливает закон соответствия между сигналами на входе и выходе линейной стационарной системы. Наложим некоторые ограничения. Сделаем допущение, что входной сигнал  $u_{\text{ВХ}}(t) = 0$  при  $t < 0$ . Кроме того, исходя из специфики работы РТС, начальные условия выберем нулевыми:  $u_{\text{ВЫХ}}(0) = u'_{\text{ВЫХ}}(0) = \dots = u_{\text{ВЫХ}}^{(n-1)}(0) = 0$ . Наконец, примем, что область допустимых входных сигналов не содержит в себе функций, столь быстро нарастающих во времени, что для них не существует преобразование Лапласа.

Обозначим закон соответствия между оригиналами и изображениями следующим образом:  $u_{\text{ВХ}}(t) \leftrightarrow U_{\text{ВХ}}(p)$ ,  $u_{\text{ВЫХ}}(t) \leftrightarrow U_{\text{ВЫХ}}(p)$ . Вычислив преобразования Лапласа от обеих частей исходного дифференциального уравнения, получим

$$(a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0) U_{\text{ВЫХ}}(p) = (b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0) U_{\text{ВХ}}(p).$$

Важнейшей характеристикой, на которой основан операторный метод, является отношение изображений выходного и входного сигналов:

$$K(p) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(p)}{U_{\text{ВХ}}(p)} = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0},$$

называемое *передаточной функцией* или *операторным коэффициентом передачи* рассматриваемой системы.

Если эта функция известна, то поиск выходной реакции системы на заданное входное воздействие разбивается на три этапа:

- 1)  $u_{\text{ВХ}}(t) \rightarrow U_{\text{ВХ}}(p)$ ;
- 2)  $U_{\text{ВЫХ}}(p) = K(p) U_{\text{ВХ}}(p)$ ;
- 3)  $U_{\text{ВЫХ}}(p) \rightarrow u_{\text{ВЫХ}}(t)$ .

Коэффициент  $K(p)$  есть результат аналитического продолжения частотного коэффициента передачи  $K(j\omega)$  с мнимой оси  $j\omega$  на всю плоскость комплексных частот  $p = \sigma + j\omega$ . Функция  $K(p)$  аналитична на всей плоскости  $p$ , за исключением конечного числа точек  $p_1, p_2, \dots, p_n$ , являющихся корнями знаменателя в формуле  $K(p)$ . Данные точки, т.е. корни уравнения

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0 = 0,$$

называют *полюсами* передаточной функции  $K(p)$ , а корни уравнения

$$b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0 = 0$$

называют *нулями* данной передаточной функции.

**Методы описания дискретных систем.** Вкратце остановимся на методах описания дискретных систем.

*Дискретной* называется система, в структуре которой содержится хотя бы один элемент, выходной сигнал которого является дискретным [37].

Процесс преобразования непрерывного сигнала в дискретный называют *квантованием* сигнала. Различают три способа квантования: по уровню, по времени и смешанное (и по уровню, и по времени).

Любая импульсная система реагирует на значения внешнего воздействия только в равноотстоящие друг от друга дискретные моменты времени. Поэтому внешнее воздействие всегда может быть заменено так называемой *решетчатой функцией*, т.е. функцией, значения которой в дискретные, равноотстоящие моменты времени равны значениям какой-либо непрерывной функции, а между этими значениями значения решетчатой функции равны нулю.

Функциональными преобразованиями решетчатых функций являются дискретное преобразование Фурье (ДПФ) и дискретное преобразование Лапласа (ДПЛ). Их свойства аналогичны свойствам обычных преобразований Фурье и Лапласа для непрерывных функций. Более широкое распространение вместо ДПЛ получило Z-преобразование, которое по сути является производным преобразованием от ДПЛ и позволяет получать передаточные функции импульсных систем в дробно-рациональной форме [39].

## Выводы

Решение задачи синтеза ТС начинается с представления будущей ТС моделью «черного ящика» и внешнего проектирования, т.е. исследования входов и выходов в сочетании с функциональным анализом и синтезом. Для этого необходимо начать с исчерпывающего перечисления всех входов и выходов задуманной системы. Вслед за тем составляется полное техническое описание каждого входа и выхода. Таблица 3.6 содержит контрольный перечень свойств, которые могут понадобиться для такого описания. Некоторые группы входов и выходов могут также требовать коллективного описания, и здесь будет полезна таблица 3.6. Не предполагается, что до завершения этих частей задачи нельзя приступать к проектированию отдельных подсистем; полное описание некоторых входов и выходов может потребоваться лишь на позднейших стадиях планирования и проектирования. Это лишний раз подтверждает рекурсивность проектных процедур.

Перечисление всех входов и выходов со всеми их свойствами делается для того, чтобы по составленным перечням найти преобразователи известных типов для

выполнения требуемых функций. Если поиски неудачны, то такие перечни позволяют разбивать систему на все более мелкие подсистемы, пока не станет видно, что данное подмножество входов может быть преобразовано желательным способом.

Типы нужных преобразователей зависят от рода системы и применяемой технологии.

Для описания и представления систем, процессов, сообщений и сигналов имеется много средств и способов, к наиболее важным из которых относятся методы статистической теории связи и радиотехники для описания информационных свойств, ряды и интегралы Фурье для описания некоторых физических свойств, а также математика случайных процессов.

Приведем обобщенный алгоритм представления объекта проектирования моделью «черного ящика»

1. Определите и назовите целевую функцию (назначение) «черного ящика».
2. Определите количество входов «черного ящика».
3. Выделите полезные и вредные входы «черного ящика», среди них выявите главные и второстепенные, которыми нельзя пренебрегать в условиях данной задачи.
4. Определите количество выходов «черного ящика».
5. Выделите полезные и вредные выходы «черного ящика», среди них выявите главные и второстепенные, которыми нельзя пренебрегать в условиях данной задачи.
6. Проведите классификацию входов «черного ящика».
7. Проведите классификацию выходов «черного ящика».
8. Идентифицируйте природу физических связей «черного ящика» с окружающей средой.
9. Распределите входы и выходы «черного ящика» по категориям основных интерфейсов «ТС1–ТС2», «ТС–Окружающая среда», «ТС–Человек», «Человек–ПО–ТС».
10. Определите физические характеристики входных и выходных процессов «черного ящика», назовите их основные параметры (параметрический базис процессов: физические величины и их единицы измерения) и диапазон возможных значений для условий данной задачи.
11. Определите техническую функцию «черного ящика». Опишите, в чем заключается смысл преобразования главного входа в главный выход с точки зрения преобразования параметров процессов.
12. Соотнесите общие требования технического задания полученными по пунктам 1–11 сведениями. Убедитесь, что в ТЗ отражены требования ко всем характеристикам всех входных и выходных процессов «черного ящика». Если какое-то требование упущено, вернитесь на этап составления ТЗ, сформулируйте и дополните список недостающим требованием.
13. Сформулируйте приблизительный описательный образ взаимодействия «черного ящика» с окружающими условиями, отвечающий на следующие общие вопросы:
  - а) какое влияние оказывает окружающая среда на «черный ящик»?

- б) какое влияние оказывает «черный ящик» на окружающую среду?
  - в) какое влияние оказывает «черный ящик» на человека?
  - г) какое влияние оказывает человек на «черный ящик»?
  - д) как человек взаимодействует с «черным ящиком»? Опишите процесс/поведенческий алгоритм взаимодействия пользователя с «черным ящиком» в заданных условиях среды.
14. Определите, знания каких наук и дисциплин потребуются для разработки задачи исследования «черного ящика».
15. Разработайте математические модели процессов, которыми нельзя пренебрегать в проектных условиях.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое «черный ящик»?
2. Как соотносятся понятия технической системы и физической операции?
3. Какие вы знаете варианты представления технической системы моделью «черного ящика» в зависимости от количества его связей со средой? Какие из них представляются наиболее важными?
4. Для каких уровней иерархии описаний технической системы действует модель «черного ящика»? Ответ обоснуйте.
5. Как соотносятся целевая и техническая функции «черного ящика» всей системы?
6. Как выглядит формализованное описание технической функции системы?
7. Как выглядит иерархическое представление связей между функциями технической системы?
8. По каким основаниям можно классифицировать связи технической системы со средой?
9. Какие существуют свойства сообщений и сигналов?
10. Что такое избыточность языка?
11. Как связаны параметры размера алфавита, энтропия источника, эффективность и избыточность языка?
12. Можно ли представить канал передачи информации моделью «черного ящика»? Ответ обоснуйте.
13. Какие существуют свойства сигнального канала?
14. Что такое интерфейс?
15. Сколько и каких интерфейсов может быть у технической системы?
16. В чем заключается проблема внешней и внутренней совместимости?
17. Что такое человеко-машинный интерфейс?
18. Почему человеко-машинный интерфейс относят в особый тип интерфейсов?
19. Что такое эргатическая система?
20. Какие эргодизайнерские показатели вам известны?

21. Какие компоненты входят в функциональную схему человека-оператора в управляющей системе?
22. Какие особенности сравнительной характеристики человека и машины вам особо запомнились и почему?
23. Какие требования выставляются к интерфейсам?
24. Какова типология задач «черного ящика»?
25. Какое место занимает системотехника среди наук?
26. Какие смежные дисциплины радиотехники вы знаете?
27. Почему для системотехника важно знать смежные дисциплины радиотехники?
28. Какие типы и характеристики основных ЭРЭС вы знаете?
29. Какие вам известны математические методы описания и представления процессов в системах?
30. Какие вам известны математические методы описания и представления систем?
31. Как провести классификацию процессов?
32. Что такое параметрический базис математической модели физико-технического процесса?
33. Почему важно уметь определять параметрический базис модели?
34. В какие группы признаков объединяются демаскирующие признаки ЭРЭС?
35. Что такое радиосигнал?
36. Сколько и каких типов представления процессов вы знаете?
37. Для чего предназначен спектральный анализ сигналов?
38. По каким причинам важен корреляционный анализ процессов?
39. По каким основаниям проводится классификация физических систем с точки зрения их математических моделей?

## Упражнения

1. Для известных вам ЭРЭС опишите, в чем заключается их целевая функция с точки зрения общепризнанных категорий: материи, энергии и информации.
2. Для известных вам ЭРЭС сформулируйте их целевые и технические функции.
3. Для операций Коллера (см. приложение 6) подберите примеры ЭРЭС.
4. Пользуясь обобщенным алгоритмом представления объекта проектирования моделью «черного ящика», сформулируйте внешнюю проектную задачу для нескольких интересующих вас ЭРЭС.
5. Подберите примеры для каждой задачи из типологии задач «черного ящика».
6. Для известных вам ЭРЭС определите, какими их входами и выходами можно пренебречь, а какими нельзя с точки зрения качества их функционирования.
7. Разработайте математические модели реально существующих физических и технических процессов разной физической природы.



8. Определите, сколько целевых функций у вашего мобильного телефона. В чем заключаются соответствующие им технические функции? Какие из них главные, вспомогательные, дополнительные?

9. Представьте ТС, рассмотренные в п. 3.2.6, моделью «черного ящика»; составьте перечень входов и выходов; исследуйте их, определите их свойства, характеристики и проведите классификацию. Составьте дескриптивную модель целевой и технической функций для каждой системы.

10. Выберите интересующую вас сферу или отрасль (искусство, наука, образование, оборона, медицина, спорт, промышленность, транспорт, энергетика и т.д.) и составьте перечень ЭРЭС, удовлетворяющих потребности людей данной области. Выберите интересующее вас ЭРЭС, относящееся к данной отрасли. Проведите его исследование согласно алгоритму анализа «черного ящика» (определите целевую функцию (назначение) и техническую функцию). Недостаток знания (границу знания и субъективного незнания) выражайте вопросом и фиксируйте его письменно для дальнейшего исследования. Сформулируйте требования к ЭРЭС на основе проведенного анализа входов и выходов «черного ящика», а также целевой и технической функций.

### **Список рекомендуемой литературы**

1. Зангер Г. Электронные системы. Теория и применение / Г. Зангер ; пер. с англ. Е.А. Афанасьевой, В.Л. Савина, О.А. Соболевой ; под ред. М.Д. Карасева. – М.: Мир, 1980. – 392 с.

2. Биккенин Р.Р. Теория электрической связи : учеб. пособие для студентов высш. учеб. зав. / Р.Р. Биккенин, М.Н. Чесноков. – М. : Академия, 2010. – 336 с.

### **Список литературы**

1. Холл А.Д. Опыт методологии для системотехники / А.Д. Холл ; пер. с англ. под ред. Г.Н. Поварова. – М. : Советское радио, 1975. – 448 с.

2. Перегудов Ф.И. Введение в системный анализ : учеб. пособие для вузов / Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасенко. – М. : Высш. шк., 1989. – 367 с.

3. Системная инженерия. Принципы и практика / А. Косяков, У. Свит [и др.] ; пер. с англ. под ред. В.К. Батоврина. – М. : ДМК Пресс, 2014. – 624 с.

4. Уилсон А. Управление и творчество при проектировании систем / А. Уилсон, М. Уилсон ; пер. с англ. под ред. О.А. Суханова. – М. : Сов. Радио, 1976. – 256 с.

5. Хубка В. Теория технических систем / В. Хубка; пер. с нем. В.В. Ачкасова, Н.И. Зук, Е.Б. Матвеевой ; под ред. К.А. Люшинского. – М. : Мир, 1987. – 209 с.

6. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества : учеб. пособие для студентов втузов / А.И. Половинкин. – М. : Машиностроение, 1988. – 368 с.

7. Техническое творчество: теория, методология, практика. Энциклопедический словарь-справочник / под ред. А.И. Половинкина, В.В. Попова. – М. : НПО «Информ-система», 1995. – 408 с.

8. Ревенков А.В. Теория и практика решения технических задач : учеб. пособие / А.В. Ревенков, Е.В. Резчикова. – М. : ФОРУМ, 2008. – 384 с.
9. Честнат Г. Техника больших систем (средства системотехники) / Г. Честнат ; пер. с англ. И.Н. Васильева, Е.Н. Дубровского, А.С. Манделя, В.Ю. Невраева ; под ред. О.И. Авена. – М. : Энергия, 1969. – 686 с.
10. Федоров В.К. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств / В.К. Федоров, Н.П. Сергеев, А.А. Кондрашин. – М. : Техносфера, 2005. – 504 с.
11. Дикарев В.И. Справочник изобретателя / В.И. Дикарев. – СПб. : Лань, 1999. – 352 с.
12. Физические явления и эффекты в технических системах / В.Л. Бурковский, Ю.Н. Глотова, Д.А. Ефремов [и др.]. – 2007.
13. Денисов В.С. Указатель физических эффектов в изобретательстве / В.С. Денисов.
14. Физические явления и эффекты в технических системах : учеб. пособие / В.Л. Бурковский, Ю.Н. Глотова, Д.А. Ефремов [и др.]. – Воронеж : ВГТУ, 2007. – 247 с.
15. Фаер С. ТРИЗ-профи: эффективные решения / С. Фаер. – 2005. – С. 128–137.
16. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Материя\\_\(Философия\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Материя_(Философия)).
17. Гуд Г.Х. Системотехника. Введение в проектирование больших систем / Г.Х. Гуд, Р.Э. Макол ; пер. с англ. К.Н. Трофимова, С.Е. Жорно, И.В. Соловьева ; под ред. Г.Н. Поварова. – М. : Сов. радио, 1962. – 390 с.
18. Томаси У. Электронные системы связи / У. Томаси. – М. : Техносфера, 2007. – 1360 с.
19. Халл Э. Инженерия требований / Э. Халл, К. Джексон, Дж. Дик; пер. с англ. А. Снастина ; под ред. В.К. Батоврина. – М. : ДМК Пресс, 2017. – 218 с.
20. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры : учеб. для вузов / К.И. Билибин, А.И. Власов, Л.В. Журавлева [и др.] ; под общ. ред. В.А. Шахнова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 568 с. – (Информатика в техническом университете).
21. Николенко В.Ю. Базовый курс системной инженерии : учеб. пособие / В.Ю. Николенко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М., 2018. – 330 с.
22. Диксон Дж. Проектирование систем: изобретательство, анализ и принятие решений / Дж. Диксон. – М. : Мир, 1969. – 442 с.
23. Теория технических систем : конспект лекций / сост. В.В. Дубинский, А.С. Игнатъев. – Сумы : СГУ, 2015. – 48 с.
24. Радиотехника: энциклопедия / под ред. Ю.Л. Мазора, Е.А. Мачусского, В.И. Правды. – М. : Издательский дом «Додэка-XXI», 2010. – 944 с.
25. Нефедов В.И. Основы радиоэлектроники и связи : учеб. пособие / В.И. Нефедов, А.С. Сигов ; под ред. В.И. Нефедова. – М. : Высш. шк., 2009. – 735 с.
26. Бакулев П.А. Радиолокационные системы : учеб. для вузов / П.А. Бакулев. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М. : Радиотехника, 2015. – 440 с.

27. Электроакустика и звуковое вещание : учеб. пособие для вузов / И.А. Алдошина, Э.И. Вологдин, А.П. Ефимов [и др.] ; под ред. Ю.А. Ковалгина. – М. : Горячая линия–Телеком, Радио и связь, 2007. – 872 с.
28. Эрастов В.Е. Измерительная техника и датчики : учеб. пособие / В.Е. Эрастов, Ю.К. Сидоров, В.Ф. Отчалко. – Томск : ТМЦДО, 1999. – 178 с.
29. Khaled N. Digital Twin Development and Deployment on the Cloud Developing Cloud-Friendly Dynamic Models Using Simulink®Simscape™ and Amazon AWS / N. Khaled, B. Pattel, A. Siddiqui. – Academic Press, 2020. – 584 p.
30. Болтон У. Карманный справочник инженера-метролога / У. Болтон. – М. : Издательский дом «Додэка-XXI», 2002. – 384 с.
31. Шибаев А.А. Схемо- и системотехника электронных средств : учеб. пособие / А.А. Шибаев. – Томск : Эль Контент, 2014. – 190 с.
32. Костиков В.Г., Парфёнов Е.М., Шахнов В.А. Источники электропитания электронных средств. Схемотехника и конструирование : учеб. для вузов / В.Г. Костиков, Е.М. Парфёнов, В.А. Шахнов. – 2-е изд. – М. : Горячая линия–Телеком, 2001. – 344 с.
33. Электронные приборы и устройства на их основе : Справочная книга / Ю.А. Быстров, С.А. Гамкредидзе, Е.Б. Иссерлин [и др.]. – М. : ИП РадиоСофт, 2002. – 656 с.
34. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Электронно-вычислительная\\_машина](https://ru.wikipedia.org/wiki/Электронно-вычислительная_машина).
35. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Аналоговый\\_компьютер](https://ru.wikipedia.org/wiki/Аналоговый_компьютер).
36. Бабич Н.П. Компьютерная схемотехника. Методы построения и проектирования : учеб. пособие / Н.П. Бабич, И.А. Жуков. – К. : МК-Пресс, 2004. – 576 с.
37. Коновалов Б.И. Теория автоматического управления : учеб. пособие / Б.И. Коновалов, Ю.М. Лебедев. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2003. – 205 с.
38. Радиоэлектронная борьба. От экспериментов прошлого до решающего фронта будущего / М.С. Барабанов, С.А. Денисенцев, В.Б. Кашин [и др.] ; под ред. Н.А. Колесова и И.Г. Насенкова. – М. : Центр анализа стратегий и технологий, 2015. – 248 с.
39. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы / С.И. Баскаков. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 2000. – 462 с.

## Список сокращений

АВМ	– аналоговая вычислительная машина
АМ	– амплитудная модуляция
АС	– акустическая система
АСУ	– автоматическая система управления
АЦП	– аналого-цифровой преобразователь
АЧХ	– амплитудно-частотная характеристика
БПЛА	– беспилотный летательный аппарат
ГОСТ	– государственный стандарт
ГПФ	– главная полезная функция
ДПЛ	– дискретное преобразование Лапласа
ДПФ	– дискретное преобразование Фурье
ЕСКД	– единая система конструкторской документации
ЕСПД	– единая система программной документации
ЖЦ	– жизненный цикл
ЗРТС	– законы развития технических систем
ИВК	– измерительно-вычислительный комплекс
ИВЭП	– источник вторичного электропитания
ИИ	– измерительная информация
ИКМ	– импульсно-кодовая модуляция
ИКР	– идеальный конечный результат
ИКС	– измерительно-контролирующая система
ИС	– измерительная система, интегральная система
ИИС	– информационно-измерительная система
ИУС	– измерительно-управляющая система
ИШИМ	– интегральная широтно-импульсная модуляция
КД	– конструкторская документация
ЛЭ	– логический элемент
МО	– Министерство обороны
МФУ	– многофункциональное устройство
МЭМС	– микроэлектромеханическая система
НИР	– научно-исследовательская работа
ОКР	– опытно-конструкторская работа
ОП	– объект проектирования
ПВ	– проводное вещание
ПВО	– противовоздушная оборона
ПО	– программное обеспечение

ПРО	– противоракетная оборона
ПТ	– технический проект
ПЭВМ	– персональная электронно-вычислительная машина
РЛС	– радиолокационная система
РО	– рабочий орган
РП	– рабочий проект
РПрУ	– радиоприемное устройство
РТ	– радиотехника
РТС	– радиотехнические системы, сигналы
РЭС	– радиоэлектронные средства
РЭУ	– радиоэлектронные устройства
САК	– система автоматического контроля
САПР	– система автоматизированного проектирования
СВЧ	– сверхвысокочастотный
СИ	– средства измерений
СМИ	– средства массовой информации
СТ	– список требований
СТД	– система технической диагностики
ТАУ	– теория автоматического управления
ТЗ	– техническое задание
ТО	– технический объект
ТП	– техническое предложение
ТР	– техническое решение
ТРИЗ	– теория решения изобретательских задач
ТС	– техническая система
ТТ	– технические требования
ТТТ	– тактико-технические требования
ТФ	– техническая функция
УГО	– условно-графическое обозначение
УЗЧ	– усилитель звуковых частот
УНЧ	– усилитель низких частот
УОИ	– устройство отображения информации
УПЧ	– усилитель промежуточной частоты
УФЭ	– устройство функциональной электроники
ФИМ	– фазоимпульсная модуляция
ФМ	– фазовая модуляция
ФПД	– физический принцип действия
ФС	– функциональная структура

ФТЭ	– физико-технический эффект
ФУ	– функциональный узел
ФЧХ	– фазочастотная характеристика
ФЭ	– физический эффект
ФЯ	– физической явление
ЦАП	– цифроаналоговое преобразование
ЦВМ	– цифровая вычислительная машина
ЦФ	– целевая функция
ЧИМ	– частотно-импульсная модуляция
ЧМ	– частотная модуляция
ЧЯ	– «черный ящик»
ШИМ	– широтно-импульсная модуляция
ЭВМ	– электронно-вычислительная машина
ЭКБ	– электронная компонентная база
ЭМВ	– электромагнитная волна
ЭП	– эскизный проект
ЭРЭС	– электронные и/или радиоэлектронные средства
ЭС	– электронные средства
ЭУ	– электронные устройства
CAD	– Computer Aided Design (автоматизированное конструкторское проектирование)
CAE	– Computer Aided Engineering (автоматизированные расчеты и анализ)
CALS	– Continuous Acquisition and Lifecycle Support (непрерывная поддержка производства и жизненного цикла)
CAM	– Computer Aided Manufacturing (автоматизированная технологическая подготовка производства)
CNC	– Computer Numerical Control (компьютерное числовое управление)
CPC	– Collaborative Product Commerce (совместный электронный бизнес)
CRM	– Customer Relationship Management (управление взаимоотношениями с заказчиками)
DoD	– Department of Defense – Enterprise Resource Planning (планирование и управление предприятием)
ERP	
GUI	– Graphic User Interface (графический интерфейс пользователя)
IEEE	– Institute of Electrical and Electronics Engineers (Институт инженеров электротехники и электроники)
INCOSE	– The International Council on Systems Engineering (Международный совет по системной инженерии)
KPI	– Key Performance Indicators (ключевые показатели эффективности)
KUR	– Key User Requirements (ключевые требования пользователя)

- MES – Manufacturing Execution System (производственная исполнительная система)
- MRP-2 – Manufacturing Requirement Planning (планирование производства)
- NASA – National Aeronautics and Space Administration (Национальное управление по авиации и исследованию космического пространства)
- PDM – Product Data Management (управление проектными данными)
- S&SM – Sales and Service Management (управление продажами и обслуживанием)
- SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition (диспетчерское управление производственными процессами)
- SCM – Supply Channel Management (управление последовательностью поставок)
- SysML – Systems Modeling Language (системный язык моделирования)
- TRL – Technology readiness levels (уровни готовности технологии)
- UML – Unified Modeling Language (унифицированный язык моделирования)

## Приложение 1

### Уровни готовности технологии (TRL)

TRL	Определение	Описание системы на физическом уровне	Описание системы на программном уровне	Описание результата
1	Открыты фундаментальные принципы	Получены научные знания, лежащие в основе концепций (приложений) аппаратных технологий	Научные знания обеспечивают фундаментальные свойства архитектуры программного обеспечения и математического формализма	Рецензируемая публикация исследования, лежащая в основе предлагаемой концепции (приложения)
2	Разработана концепция технологии и (или) область её использования	Начинается процесс изобретения, определено практическое применение, но на уровне гипотезы. Отсутствуют подтверждающие гипотезу экспериментальные доказательства или подробный системный анализ	Определено практическое применение, но оно является предположительным, нет экспериментальных доказательств или подробного анализа, подтверждающего это предположение. Определены основные свойства алгоритмов, представлений и концепций. Формализованы основные принципы. Проведен вычислительный или имитационный эксперимент	Документированное описание концепции, касающееся её осуществимости и потенциальных преимуществ
3	Аналитическое и экспериментальное подтверждение концепции	Аналитические исследования помещают технологию в соответствующий контекст, а лабораторные демонстрации, моделирование и симуляция подтверждают аналитические прогнозы	Разработка ограниченной функциональности для проверки критических свойств и прогнозов с использованием неинтегрированных программных компонентов	Документированные аналитические и экспериментальные результаты, подтверждающие прогнозы основных параметров
4	Проверка компонентов и (или) макетов в лабораторных условиях	Макет системы (компонентов) с низким уровнем точности создается и используется для демонстрации основных функций и оценки влияния среды, а связанные с этим прогнозы производительности определяются относительно конечных условий эксплуатации	Ключевые, функционально важные программные компоненты интегрированы и функционально проверены с целью установки функциональной совместимости и запуска разработки архитектуры. Определены соответствующие условия эксплуатации и прогнозируется производительность системы в этих условиях	Задokumentированные результаты испытаний, демонстрирующие согласие с аналитическими прогнозами. Задokumentированное определение соответствующих условий эксплуатации



Продолжение таблицы

TRL	Определение	Описание системы на физическом уровне	Описание системы на программном уровне	Описание результата
5	Проверка действия компонентов (или) макетов в соответствующих условиях	Создана система (компоненты) средней точности и эксплуатируется для демонстрации общей производительности в смоделированных условиях эксплуатации с реалистичными элементами, которые демонстрируют общую производительность в критических областях. Прогнозы производительности сделаны для последующих этапов разработки	Внедрение сквозных программных элементов и сопряжение с существующими системами (симуляциями) в соответствии с целевыми условиями эксплуатации. Комплексная программная система, протестированная в заданной среде, соответствует прогнозируемой производительности. Спрогнозированы характеристики условий эксплуатации. Разработаны реальные прототипы	Задokumentированные результаты испытаний, демонстрирующие согласие с аналитическими прогнозами. Документированное определение разномасштабных требований
6	Модель системы (подсистем) или демонстрация прототипа в условиях эксплуатации	Высокоточный прототип системы (компонентов), который адекватно решает все критические задачи, построен и испытан в соответствующей среде для демонстрации работы в критических условиях эксплуатации	Прототипные реализации программного обеспечения продемонстрированы в решении натуральных реалистичных задач. Частичная интеграция с существующими аппаратными (программными) системами. Доступна ограниченная документация. Полностью продемонстрирована техническая осуществимость	Задokumentированные результаты испытаний, демонстрирующие согласие с аналитическими прогнозами
7	Демонстрация прототипа системы в условиях эксплуатации	Инженерная разработка высокой точности, которая адекватно решает все критические проблемы масштабирования, создается и работает в соответствующей среде, чтобы продемонстрировать производительность в реальной операционной среде и на определенной платформе (наземная, бортовая или космическая)	Существует прототип программного обеспечения, в котором все ключевые функции доступны для демонстрации и тестирования. Хорошо интегрирован с действующими аппаратными (программными) системами. Демонстрирует операционную осуществимость. Большинство программных ошибок устранено. Доступна ограниченная документация	Задokumentированные результаты испытаний, демонстрирующие согласие с аналитическими прогнозами

Окончание таблицы

TRL	Определение	Описание системы на физическом уровне	Описание системы на программном уровне	Описание результата
8	Реальная система завершена и прошла демонстрационные испытания	Конечный продукт в его окончательной конфигурации успешно демонстрируется посредством испытаний и анализа для предполагаемых условий эксплуатации и платформы (наземной, воздушной или космической)	Все программное обеспечение тщательно отлажено и полностью интегрировано со всеми действующими аппаратными и программными системами. Подготовлена вся пользовательская документация, учебная документация и документация по техническому обслуживанию. Вся функциональность успешно продемонстрирована в смоделированных сценариях эксплуатации. Верификация и валидация системы завершены	Задokumentированные результаты испытаний, подтверждающие аналитические прогнозы
9	Функционирование реальной системы подтверждено успешным выполнением миссии	Конечный продукт успешно эксплуатируется в реальной миссии	Все программное обеспечение тщательно отлажено и полностью интегрировано со всеми действующими аппаратными (программными) системами. Разработан полный комплект проектной документации. Имеется постоянная инженерная поддержка программного обеспечения. Система успешно эксплуатируется в операционной среде	Документированные результаты работы системы

## Приложение 2

### Стадии разработки программ и программной документации

ГОСТ 19.102–77 устанавливает пять стадий разработки программ и программной документации для ЭВМ, комплексов и систем: техническое задание, эскизный проект, технический проект, рабочий проект, внедрение.

1. На стадии технического задания выполняют:

- постановку задачи;
- обоснование потребности в разработке программы;
- научно-исследовательские работы (в случае необходимости);
- выбор и обоснование критериев эффективности и качества разрабатываемой программы;

программы;

- разработку и утверждение технического задания.

2. На стадии эскизного проекта разрабатывают:

- структуру входных и выходных данных;
- методы решения задачи;
- общее описание алгоритма решения задачи;
- технико-экономическое обоснование;
- эскизный проект, который подают на утверждение.

3. На стадии технического проекта:

- уточняют структуру входных и выходных данных;
- определяют форму представления входных и выходных данных семантики и синтаксиса языка;

синтаксиса языка;

- достаточно определяют конфигурацию технических средств;

- утверждают технический проект.

4. На стадии рабочего проекта выполняют:

- программирование и отладку программы;
- разработку программных документов в соответствии с ГОСТ 19.107–77;
- разработку, согласование и утверждение методики исследований;
- предварительные государственные приёмосдаточные испытания;
- корректировку программы и программной документации по результатам испытаний.

испытаний.

5. На заключительной стадии внедрения:

- готовят и передают программу и программную документацию для сопровождения и (или) изготовления;

- оформляют и утверждают акт о передаче программы;

- передают программу в фонд алгоритмов и программ.

## Приложение 3

### Требования к содержанию и оформлению программных документов

#### 1. Общие требования к программным документам

Общие требования к оформлению программных документов устанавливает ГОСТ 19.105–78.

Программный документ может подаваться на различных типах носителей данных и состоять из следующих условных частей:

- титульной;
- информационной;
- основной;
- регистрации изменений.

Титульная часть состоит из листа утверждения и титульного листа согласно ГОСТ 19.104–78.

Информационная часть состоит из аннотации и содержания. В аннотации указывают сведения о назначении документа и сжатое изложение его основной части. Содержание состоит из перечня записей о структурных элементах основной части документа, в каждую из которых входят:

- обозначения структурного элемента (номер раздела, подраздела);
- наименование структурного элемента;
- адрес структурного элемента на носителе данных (например, номер страницы, номер файла).

Правила обозначения структурных элементов основной части документа и их адресации устанавливают стандарты ЕСПД для каждого типа носителя. Состав и структуру основной части программного документа устанавливают правила ЕСПД на соответствующие документы. О каждом изменении программного документа делают запись согласно ГОСТ 19.603–78.

#### 2. Описание языка

Требования к содержанию и оформлению программного документа по описанию языка (программирование, управление заданием, организация вычислительного процесса) устанавливает ГОСТ 19.506–79. При этом учитываются положения ГОСТ 19.105–78 «Общие требования к программным документам». Составление информационной части (аннотации и содержания) является обязательным.

Описание языка должно содержать следующие разделы.

1. *Общие сведения.* Указывают назначение и дают описание общих характеристик языка, его возможностей, основных сфер использования и т.д.

2. *Элементы языка.* Дают описание синтаксиса и семантики базовых и составляющих элементов языка.

3. *Способы структурирования программы.* Указывают способы вызова процедуры, передачи управления и другие элементы структурирования программы.

4. *Средства обмена данными.* Указывают описание языковых средств обмена данными (например, средства ввода-вывода, внутреннего обмена данными и т.д.)

5. *Встроенные элементы.* Дают описание встроенных в язык элементов (например, функции, классы и т.д.) и правила их использования.

6. *Средства отладки программ.* Указывают описание наличных средств отладки программ, семантику этих средств, рекомендаций относительно их использования.

В случае необходимости содержание разделов можно пояснять примерами. В приложениях к описанию языка можно указывать вспомогательные материалы (формализованные описания языковых средств, иллюстрации, таблицы, графики, формы бланков и т.д.).

### 3. Текст и описание программы

Структуру и оформление текста программы устанавливают в соответствии с ГОСТ 19.105–78 «Общие требования к программным документам». Составление информационной части (аннотации и содержания) является обязательным.

Основная часть документа должна состоять из текстов одного или нескольких разделов, которым дают наименование. Каждый из этих разделов реализуется одним из типов символической записи, например:

- символические записи исходным или промежуточными языками;
- символическое представление машинных кодов и т.д.

В символическую запись разделов рекомендуется включать комментарии, которые могут отображать, например, функциональное назначение, структуру (ГОСТ 19.401–78).

Описание программы должно содержать следующие разделы (ГОСТ 19.402–78).

1. *Общие сведения.* Указывают обозначение и наименование программы; программное обеспечение, необходимое для функционирования программы; язык программирования, которым написана программа.

2. *Функциональное назначение.* Указывают классы решаемых задач и (или) назначение программы и сведения о функциональных ограничениях программы.

3. *Описание логической структуры.* Указывают алгоритм программы, использованные методы, структуру программы с описанием функций составляющих частей и связи между ними. Описание логической структуры программы выполняют с учетом текста программы на исходном языке.

4. *Использованные технические средства.* Перечисляют типы ЭВМ и устройств, используемые для работы программы.

5. *Вызов и загрузка.* Указывают способ вызова программы с соответствующего носителя данных, входные точки программы. Допускается указывать адреса загрузки, сведения об использовании оперативной памяти, объем программы.

7. *Входные данные.* Указывают характер, организацию и предварительную подготовку входных данных, а также формат и способ кодирования входных данных.

8. *Выходные данные.* Указывают характер и организацию выходных данных, а также формат и способ кодирования выходных данных.

Допускается содержание разделов иллюстрировать пояснительными примерами, таблицами, схемами, графиками. В приложениях к описанию программы допускается указывать различные материалы, которые нецелесообразно указывать в описании программы.

#### **4. Пособие системного программиста**

Требования к содержанию и оформлению программного документа «Пособие системного программиста» устанавливает ГОСТ 19.563–79. При этом учитываются положения ГОСТ 19.105–78 «Общие требования к программным документам». Составление информационной части (аннотации и содержания) является обязательным.

Пособие системного программиста должно содержать следующие разделы.

1. *Общие сведения о программе.* Указывают назначение и функции программы и сведения о технических и программных средствах, которые обеспечивают выполнение этой программы.

2. *Структура программы.* Указывают сведения о структуре программы, её составные части и связи между ними и другими программами.

3. *Настройка программы.* Описывают действия по настройке программы на условия конкретного использования (настройка на состав технических средств, выбор функций и др.).

4. *Проверка программы.* Описывают способы проверки, позволяющие оценить работоспособность программы (контрольные примеры, методы прогона, результаты).

5. *Сообщения системному программисту.* Указывают тексты сообщений, выдаваемых в ходе выполнения настройки и т.п.

В приложениях к пособию можно указывать вспомогательные материалы (примеры, иллюстрации, таблицы, графики и т.д.).

#### **5. Пособие программиста**

Требования к содержанию и оформлению «Пособия программиста» устанавливает ГОСТ 19.504–79. При этом учитываются положения ГОСТ 19.105–78 «Общие требования к программным документам». Составление информационной части (аннотации и содержания) является обязательным.

Пособие программиста должно содержать следующие разделы.

1. *Назначение и условия использования программы.* Указывают назначение и функции, которые должна выполнять программа, и условия, необходимые для выполнения программы (объем оперативной памяти, требования к составу и параметрам периферийных устройств, программного обеспечения и т.д.).

2. *Характеристика программы.* Описывают основные характеристики и особенности программы (временные характеристики, режим работы, средства контроля и т.д.).

3. *Обращение к программе.* Описывают процедуры вызова программы (способы передачи управления и параметров данных и т.д.).

4. *Входные и выходные данные.* Представляют описание организации используемой входной и выходной информации.

5. *Сообщения.* Указывают пакеты сообщений, выдаваемые программисту или оператору в ходе выполнения программы, описывают их содержание и действия, которые необходимо выполнять по этим сообщениям.

В приложениях можно указывать вспомогательные материалы (примеры, иллюстрации, таблицы, графики и т.д.).

## **6. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению**

Порядок построения и оформления ТЗ на разработку программы или программного изделия устанавливает ГОСТ 19.201–78.

Техническое задание содержит следующие разделы.

1. *Вступление.* Указывают наименование, сжато характеризуют сферу использования программы (изделия) и объекта.

2. *Основания для разработки.* В этом разделе указывают:

– документ, на основании которого выполняется разработка;

– организации, утвердившие этот документ;

– наименование и (или) условное обозначение цели разработки.

3. *Назначение разработки.* Указывают функциональное и эксплуатационное назначение программы (изделия).

4. *Требования к программе или программному изделию.* Этот раздел состоит из следующих подразделов:

– требования к функциональным характеристикам и надежности;

– требования к составу и параметрам технических средств, их информационной и программной совместимости;

– условия эксплуатации, специальные требования.

5. *Требования к программной документации.* Указывают предварительный состав программной документации и в случае необходимости специальные требования к ней.

6. *Технико-экономические показатели.* В этом разделе указывают:

– ориентировочную экономическую эффективность;

– предусмотренную потребность на год;

– экономические преимущества в сравнении с лучшими образцами (аналогами).

7. *Стадии и этапы разработки.* Устанавливают необходимые стадии разработки, этапы и содержание работ (перечень программных документов, которые должны быть разработаны, согласованы и утверждены), а также термины разработки, определяют исполнителей.

8. *Порядок контроля и приёмки.* Указывают виды испытаний и общие требования к приемке работ.

В приложениях к ТЗ в случае необходимости приводят:

- перечень научно-исследовательских работ и других источников, обосновывающих создание программы;
- схемы алгоритмов, таблицы, описания, обоснования, расчеты и другие документы, которые могут быть использованы в разработке программы.



## Приложение 4

### Перечень электронных и радиоэлектронных средств

*Задание.* Провести исследование ТО: дать определение, определить целевую и техническую функции, провести классификацию, выяснить обобщенный алгоритм работы, найти СЭС, СЭП, выяснить ФПД, ТХ, предложить улучшение (ИКР), определить эволюционных предков (первого представителя выполнявшего ранее ту же функцию независимо от ФПД) ТС, построить генеалогическое дерево эволюции данного вида ТС (по ФПД, ТР и ТП).

Но-мер	Электронное / радио-электронное средство	Возможные уровни иерархии ЭРЭС	Сфера или область использования
1	Усилитель	Устройство, система	Музыка
2	Компрессор	Функциональный узел, устройство	Музыка
3	Лимитер	Функциональный узел, устройство	Музыка
4	Синтезатор	Устройство	Музыка
5	MIDI-клавиатура	Устройство	Музыка
6	Флейнджер	Функциональный узел, устройство	Музыка
7	Хорус	Устройство	Музыка
8	Дистошн	Устройство	Музыка
9	Овердрайв	Устройство	Музыка
10	Фильтр	Функциональный узел, устройство	Музыка
11	Эквалайзер	Функциональный узел, устройство	Музыка
12	Ревербератор	Устройство	Музыка
13	Дилей-эффект	Устройство	Музыка
14	Бит-крашер эффект	Устройство	Музыка
15	Цветомузыкальная установка	Устройство	Музыка
16	Микшер	Устройство	Музыка
17	Гитарная приставка звуковых эффектов	Устройство	Музыка
18	Лесли-эффект	Устройство	Музыка
19	Скретч-эффект	Устройство	Музыка
20	Коррелометр	Устройство	Музыка
21	Спектроанализатор	Устройство	Музыка
22	Электрогитара	Устройство	Музыка
23	Диджейский пульт	Устройство	Музыка

Продолжение таблицы

Но- мер	Электронное / радио- электронное средство	Возможные уровни иерархии ЭРЭС	Сфера или область использования
24	Шредер	Устройство	Оргтехника
25	Многофункциональ- ное устройство	Устройство	Оргтехника
26	Сканер	Устройство	Оргтехника
27	Ксерокс	Устройство	Оргтехника
28	Принтер	Устройство	Оргтехника
29	Факс	Устройство	Оргтехника
30	Цифровой телефон	Устройство	Оргтехника
31	Проектор	Устройство	Оргтехника
32	Компьютер	Система, устройство	Оргтехника
33	Телевизор	Устройство	Оргтехника
34	Монитор	Устройство	Оргтехника
35	Копир	Устройство	Оргтехника
36	Плоттер	Устройство	Оргтехника
37	Акустическая система	Система	Оргтехника
38	Лазерная указка	Устройство	Оргтехника
39	Фоторамка	Устройство	Оргтехника
40	Калькулятор	Устройство	Оргтехника
41	Клавиатура	Устройство	Оргтехника
42	Компьютерная мышь	Устройство	Оргтехника
43	Флеш-карта	Устройство	Оргтехника
44	Графический планшет	Устройство	Оргтехника
45	Диктофон	Устройство	Оргтехника
46	Компьютерный моноблок	Устройство	Оргтехника. Компьютерная техника
47	Характериограф	Устройство	Измерительная техника
48	Осциллограф	Устройство	Измерительная техника
49	Генератор	Устройство	Измерительная техника
50	Векторный анализатор цепей	Устройство	Измерительная техника
51	Спектрограф	Устройство	Наука. Измерительная техника
52	Спектроанализатор	Устройство	Наука. Измерительная техника
53	Психрометр	Устройство	Наука. Измерительная техника
54	Барометр	Устройство	Наука. Измерительная техника
55	Пирометр	Устройство	Наука. Измерительная техника
56	Манометр	Устройство	Наука. Измерительная техника

Продолжение таблицы

Но- мер	Электронное / радиоэлек- тронное средство	Возможные уровни иерархии ЭРЭС	Сфера или область использования
57	Шумомер	Устройство	Наука. Измерительная техника
58	Динамометр	Устройство	Наука. Измерительная техника
59	Радиометр	Устройство	Наука. Измерительная техника
60	Частотомер	Устройство	Наука. Измерительная техника
61	Амперметр	Устройство	Наука. Измерительная техника
62	Вольтметр	Устройство	Наука. Измерительная техника
63	Омметр	Устройство	Наука. Измерительная техника
64	Электронные весы	Устройство	Наука. Измерительная техника
65	Тепловизор	Устройство	Наука. Измерительная техника
66	3D-сканер	Устройство	Наука. Инженерия
67	3D-принтер	Устройство	Наука. Инженерия
68	Мультиметр	Устройство	Наука. Инженерия
69	Гирокомпас	Устройство	Транспорт. Авиа
70	Система предупреждения столкновений	Система	Транспорт. Авиа
71	Радар скорости	Устройство	Транспорт. Авто
72	Радиолокационная система	Система, комплекс	Транспорт. Авиа
73	Радионавигационная система	Система, комплекс	Транспорт. Авиа
74	Радиомаячная система	Система, комплекс	Транспорт. Авиа
75	Система посадки	Система	Транспорт. Авиа
76	Автоматизированная система управления воздушным движением	Система	Транспорт. Авиа
77	Радиовысотомер	Устройство	Транспорт. Авиа
78	Приводная радиостанция	Устройство	Транспорт. Авиа
79	Автомагнитола	Устройство	Транспорт. Авто
80	Автосигнализация	Устройство	Транспорт. Авто
81	Гироскутер	Устройство	Транспорт. Мото
82	Электроусилитель руля	Устройство, функциональный узел	Транспорт
83	Эхолот	Устройство	Транспорт. Морской и речной

Продолжение таблицы

Но- мер	Электронное / радиоэлек- тронное средство	Возможные уровни иерархии ЭРЭС	Сфера или область использования
84	Электронный тест на беременность	Устройство	Медицинская техника
85	Измеритель частоты пульса	Устройство	Медицинская техника
86	Тонометр	Устройство	Медицинская техника
87	Инфракрасный термометр	Устройство	Медицинская техника
88	Глюкометр	Устройство	Медицинская техника
89	Аппарат искусственной вентиляции легких	Устройство	Медицинская техника
90	Веновизор	Устройство	Медицинская техника
91	Массажное кресло	Устройство	Медицинская техника
92	Беговая дорожка	Устройство	Медицинская техника
93	Алкотестер	Устройство	Медицинская техника
94	Велотренажер	Устройство	Спорт
95	Шагомер	Устройство	Спорт
96	Телевизор	Устройство	Бытовая электроника
97	Смартфон	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
98	Умные часы	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
99	Фитнес-браслет	Устройство	Спорт, персональная носимая электроника
100	mp3-плеер	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
101	Радиоприемник	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
102	Детектор утечки газа	Устройство	Бытовая и персональная электроника
103	Сигнализация	Устройство	Бытовая и персональная электроника
104	Детектор радиации / счетчик Гейгера	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
105	Умный холодильник	Устройство	Бытовая и персональная электроника
106	Микроволновая печь	Устройство	Бытовая и персональная электроника
107	Веб-камера	Устройство	Бытовая и персональная электроника
108	Электронная книга	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
109	Умный выключатель света	Устройство	Бытовая электроника
110	Электронная няня	Устройство	Бытовая электроника

Продолжение таблицы

Но- мер	Электронное / радиоэлек- тронное средство	Возможные уровни иерар- хии ЭРЭС	Сфера или область использования
111	Домофон	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
112	Посудомоечная машина	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
113	Робопылесос	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
114	Кофеварка	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
115	Бойлер	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
116	Блок питания	Устройство	Бытовая электроника
117	Рация	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
118	Лазерный дальномер	Устройство	Измерения
119	Электронные часы	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
120	WiFi-роутер	Устройство	Бытовая электроника
121	Фотоаппарат	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
122	Видеокамера	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
123	Зарядное устройство	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
124	Станок с ЧПУ	Устройство	Производство
125	Видеорегиcтpатор	Устройство	Транспорт
126	Блютус-колонка	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
127	Тетрис	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
128	Тамагочи	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
129	Геймпад	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
130	Игровая приставка	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
131	Телевизионный пульт дистанционного управления	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
132	Ректенна	Устройство, функциональ- ный узел	Бытовая радиоэлектро- ника

## Окончание таблицы

Но- мер	Электронное / радиоэлек- тронное средство	Возможные уровни иерархии ЭРЭС	Сфера или область использования
133	Инвертор	Устройство	Производство
134	Источник бесперебойного электропитания	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
135	Инверторный кондиционер	Устройство	Бытовая электроника
136	Радиотелефон	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
137	Трансивер	Устройство	Радиолюбительская СВ- связь
138	Ноутбук	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
139	Пейджер	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
140	Твейджер	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
141	GPS-навигатор	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
142	Вейп	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
143	Пауэрбанк	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
144	3D-ручка	Устройство	Бытовая и персональная носимая электроника
145	POS-терминал	Устройство	Финансы
146	Электронная касса	Устройство	Финансы
147	Банкомат	Устройство	Финансы
148	Машинка для счета денежных купюр	Устройство	Финансы
149	Мультикасса/Онлайн касса	Устройство	Финансы
150	Сегвей	Устройство	Развлечения

**Приложение 5**  
**Пример оформления технического задания**

Министерство науки и высшего образования РФ

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры (КИПР)

УТВЕРЖДАЮ  
заведующий кафедрой КИПР  
\_\_\_\_\_ Н.Н. Кривин  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ**  
на бакалаврскую работу (дипломный проект)

Тема работы: блок управления поливом.

Стадия разработки: технический проект.

Исполнитель: студент группы 236-1 К.В. Петрова,  
оканчивающий университет по направлению подготовки 11.03.03  
«Конструирование и технология электронных средств»

Приказ ректора от \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_

Срок сдачи законченного проекта на кафедру «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Руководитель дипломного проекта  
доцент каф. КИПР, канд. техн. наук Чернышев А.А.

СОГЛАСОВАНО

Методист дипломного  
проектирования каф. КИПР  
профессор, д-р техн. наук

\_\_\_\_\_ Е.В. Масалов

Томск 2020

## **1 Наименование, шифр разработки, основание, исполнитель и сроки выполнения**

- 1.1 Наименование изделия – «Блок управления поливом».
- 1.2 Шифр разработки – КИПР.468313.001.
- 1.3 Основание для разработки – задание на дипломный проект, приказа №\_, ТУСУР, кафедра КИПР.
- 1.4 Исполнитель – студент гр. 236-1 Петрова К.В.
- 1.5 Сроки выполнения \_\_\_\_\_ 2020 г.

## **2 Цель выполнения разработки, назначение и область применения**

2.1 Цель выполнения разработки – создание конструкции блока управления поливом, относящегося к сегменту рынка с минимумом цен при минимальном числе исполняемых функций.

2.2 Назначение – автоматизированное управление работой насоса для полива растений в дачной или приусадебной теплице на основе контроля влажности воздуха.

2.3 Область применения – бытовой прибор для использования на дачных либо усадебных участках, находящихся в частной собственности.

## **3 Технические требования к изделию**

### **3.1 Состав изделия**

3.1.1 Блок управления поливом должен быть выполнен в виде отдельного малогабаритного прибора в герметичном пластиковом корпусе.

### **3.2 Требования назначения**

3.2.1 Блок должен обеспечивать автоматизированное орошение теплицы путем включения оросительного насоса при понижении измеренной фактической влажности ниже величины, заданной установленным положением ручного многопозиционного переключателя. Насос должен отключаться при восстановлении заданной (установленной переключателем) величины влажности.

3.2.2 Напряжение питания – сеть 220 В  $\pm 10\%$ , 50 Гц, 20 ВА.

3.2.3 Масса изделия не более 400 г.

### **3.3 Требования к конструкции изделия**

3.3.1 Изделие должно соответствовать климатическому исполнению и категории размещения УХЛ2 ГОСТ 15150-69 (умеренно-холодный макроклиматический район, эксплуатация под навесом, защита от вертикальных струй воды, допускается обрызгивание, попадание пыли).

3.3.2 Степень защиты IP54 по ГОСТ 14254-96.

3.3.3 Места подключения сетевого кабеля и кабеля управления насосом должны быть снабжены эластичными гермовводами.



3.3.4 Электрическая схема изделия должна быть смонтирована на жесткой двусторонней печатной плате класса точности проводящего рисунка не выше 2 по ГОСТ 23751-86.

3.3.5 На печатной плате должны быть предусмотрены клеммы или клеммные колодки для подключения внешних сетевых кабелей 220 В, 50 Гц.

3.3.6 Допускается использовать как компоненты для поверхностного монтажа, так и электрорадиоэлементы (ЭРЭ) с проволочными выводами.

3.3.7 При разработке изделия допускается использовать покупной корпус и при необходимости произвести его доработку.

### 3.4 Требования к надежности

3.4.1 Вероятность безотказной работы в течение 1000 ч не менее 0,92.

### 3.5 Требования электромагнитной совместимости

3.5.1 Изделие не должно вызывать электромагнитные помехи, мешающие нормальному функционированию других технических средств.

### 3.6 Требования эргономики, обитаемости и технической эстетики

3.6.1 Изделие должно соответствовать общим требованиям эргономики и технической эстетики по ГОСТ 20.39.108-85.

3.7 Требования к эксплуатации, хранению, удобству технического обслуживания и ремонта

3.7.1 Температура эксплуатации от +1 до +60 °С (с учетом нагрева корпуса изделия солнечными лучами), влажность 100% при температуре 25 °С.

3.7.2 При монтаже в теплице к блоку подводятся сетевой кабель и кабель управления оросительным насосом. Рекомендуется применение кабелей с двойной (шланговой) изоляцией.

3.7.3 При проведении монтажных работ должны соблюдаться общие требования безопасности, предъявляемые к монтажу электротехнических изделий.

### 3.8 Требования стандартизации и унификации

3.8.1 В изделии должны быть максимально использованы покупные составные части и типовые конструктивные решения.

### 3.9 Требования безопасности

3.9.1 Конструкция устройства должна соответствовать общим требованиям безопасности по ГОСТ 12.2.007.0-75.

### 3.10 Требования технологичности

3.10.1 В ходе проектирования должны быть проработаны следующие вопросы технологичности конструкции:

а) выбор вариантов установки ЭРЭ с определением габаритных и установочных размеров по ГОСТ 29137-91;

б) возможность применения ЭРЭ иностранного производства;

в) возможность замены ЭРЭ иностранного производства на отечественные аналоги;

г) определение необходимых диаметров монтажных и переходных отверстий исходя из условий качественной пайки; минимизация количества типоразмеров отверстий печатной платы;

д) выбор формы и размеров контактных площадок исходя из варианта монтажа выводов (планарный или в отверстие) с учетом необходимой площади для получения качественной пайки;

е) определение расстояния между элементами проводящего рисунка исходя из технологических ограничений (класса точности), электрической прочности и допустимых паразитных емкостей;

ж) формирование пользовательской библиотеки ЭРЭ проекта;

з) настройка программ САПР Solid Works и Altium Designer, автоматизированное формирование конструкторских и технологических документов;

и) выбор припоя, защитных покрытий и маркировки печатной платы и печатного узла изделия, корректировка конструкторских документов;

к) верификация и технологическая оценка качества разработки печатного узла.

#### **4 Технико-экономические требования**

4.1 Провести расчет стоимости покупных изделий, входящих в состав блока.

#### **5 Требования к документации**

5.1 Конструкторские документы разрабатываемого изделия должны соответствовать действующим стандартам ЕСКД.

5.2 Комплектность конструкторской документации, подлежащей разработке в рамках данного проекта.

5.2.1 Чертеж общего вида.

5.2.2 Спецификация.

5.2.3 Сборочный чертеж.

5.2.4 Схема электрическая принципиальная.

5.2.5 Перечень элементов.

5.2.6 Ведомость покупных изделий.

5.2.7 Ведомость технического проекта.

5.2.8 Спецификация печатного узла.

5.2.9 Сборочный чертеж печатного узла.

5.2.10 Чертеж печатной платы.

5.2.11 Чертеж составной части корпуса.

5.3 Перечень обязательных расчетов.

5.3.1 Расчет массы изделия.

5.3.2 Расчет стоимости покупных изделий (п. 4.1 настоящего ТЗ).

5.3.3 Расчет надежности изделия.

## 6 Порядок выполнения и приёмки этапов разработки

6.1 Срок сдачи полностью укомплектованного и оформленного проекта \_\_\_\_\_ 2020 г.

6.2 На экспертизу и последующую защиту проекта представляется пояснительная записка с комплектом конструкторских документов на изделие согласно п. 5.2 настоящего ТЗ.

6.3 Материалы проекта проверяются на соответствие настоящему ТЗ, ОС ТУСУР 01, стандартам ЕСКД (в частности, ГОСТ 2.106, ГОСТ 2.109, ГОСТ 2.413, ГОСТ 2.417, ГОСТ 2.702), ГОСТ 23751-86, ГОСТ 29137-91.

6.4 Приемка (оценка) проекта проводится с учетом качества разработанных конструкторских документов и степени сформированности практических навыков работы с системами Altium Designer и Компас-3D.

## 7 Источники разработки

7.1 Настоящее ТЗ разработано на основе следующих документов и информационных материалов.

7.2 Контроллеры влажности. URL: <https://radiostorage.net/4680-kontroller-vlazhnosti-v-teplice-skhema-808h5v6-lm3914.html>.

7.3 ГОСТ 17516.1-90 Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам;

7.4 ГОСТ 15543.1-89 Изделия электротехнические и другие технические изделия. Общие требования в части стойкости к климатическим внешним воздействующим факторам.

7.5 Кобрин Ю.П. Информационные технологии проектирования радиоэлектронных средств: учебное пособие к курсовому и дипломному проектированию для студентов очного и заочного обучения. – 2016.

Разработка инициативная,  
тема предложена студентом

Руководитель дипломного проекта  
доцент кафедры КИПР  
канд. техн. наук  
\_\_\_\_\_ А.А. Чернышев

Задание принял к исполнению:  
студент группы 236-1  
\_\_\_\_\_ К.В. Петрова  
\_\_\_\_\_ 2020 г.

## Приложение 6

### Характеристика и отличительные признаки операций Коллера

1. **Излучение (испускание) – поглощение.** Излучение будем соотносить с *источником* энергии, вещества или информации, поглощение – со *стоком* (местом впадения) энергии, вещества или информации (сигналов). Эти две основные операции, противоположные друг другу, представляют собой необходимое условие для создания или ликвидации потока (вещества, энергии или информации). Источники и стоки могут быть природные и искусственные (например, источники – солнце, топливо, генераторы, датчики; стоки – звукопоглощающее покрытие, заземление, нагрузка и т.п.). Источниками являются также все естественные источники энергии, вещества или сигналов. В технических системах стоком в большинстве случаев служит природная окружающая среда. Для практического конструирования ТО обе эти операции, по мнению Р. Коллера, обычно имеют сравнительно небольшое значение.

2. **Проводимость – изолирование.** Для возникновения потока, кроме наличия источника и стока, требуется, чтобы между ними было *проводящее пространство*, обеспечивающее движение или распространение потока от источника к стоку (здесь не имеется в виду специальная организация потока, например с помощью трубопровода).

Примеры проводящего пространства: воздушное пространство, электролит и т.п.: примеры изолирования: непрозрачные шторы, изолятор, стенка и т.п.

3. **Сбор (концентрация) – рассеяние.** Основная операция «сбор» служит для того, чтобы поток (ресурсы) энергии, вещества и сигналов, распространяющийся по всем направлениям (рассредоточенный в пространстве или движущийся широким фронтом), заставить протекать в одном направлении или сосредоточиться (сфокусироваться) в одной точке. Операцию «сбор» осуществляет, например, параболическая антенна, фокусирующая линза и т.п.

Операция «рассеяние» служит для того, чтобы имеющийся сконцентрированный или упорядоченный поток рассеять, распространить по всем направлениям или направить более широким фронтом. Операцию «рассеяние» осуществляет, например, антенна радиопередатчика, наконечник пневматического распылителя, рассеивающая линза и т.п.

Отметим различия между операциями «сбор–рассеяние» и «излучение–поглощение». Операции «излучение» и «поглощение» соответствуют первому (начальному) и последнему (конечному) участкам в потоке энергии, вещества или информации. До и после этих участков, можно сказать, нет организованного потока. Операции «сбор» и «рассеяние» соответствуют промежуточным участкам потока; до и после этих участков также существует организованный поток.

4. **Проведение (несвободное движение) – непроведение (свободное движение).** Операция «проведение» обеспечивает движение сконцентрированного потока по заданному пути (траектории) с помощью технических средств, например трубопровода, электропровода, шарнира. Непроведение означает, что на естественное

направление движения и распространения потока ТО не оказывает никакого влияния (свободно падающая струя воды, летящая пуля, световой луч, поток электронов). Проведение – это движение, ограниченное связями; непроведение – свободное движение.

**5. Преобразование – обратное преобразование.** Это наиболее распространённые основные операции, противоположные друг другу, обеспечивающие изменение *свойств* энергии, вещества и сигналов.

Под преобразованием энергии понимается превращение одного вида энергии в другой, которое происходит, например, в электродвигателе или двигателе внутреннего сгорания. К различным видам энергии относятся тепловая, кинетическая, потенциальная, звуковая, оптическая и другие.

Под преобразованием вещества понимается его качественное изменение, добавление или исчезновение определённых свойств вещества (например, изменение агрегатного состояния, нормальная проводимость – сверхпроводимость, немагнитное – магнитное вещество и т.п.).

Под преобразованием сигналов следует понимать операции, при которых одна физическая входная величина превращается в другую выходную физическую величину.

**6. Увеличение – уменьшение плотности потока.** Эти основные операции изменяют состояние потока, т.е. значения какой-либо скалярной или векторной физической величины. При этом на входе и выходе имеем одну и ту же физическую величину. Примерами устройств реализации операций «увеличение» и «уменьшение» являются: система рычагов, зубчатые передачи, передачи с изменяемым крутящим моментом, электрические трансформаторы, механические и электрические усилители, вентили, задвижки, регулирующие площадь сечения потока.

**7. Изменение направления.** Эта основная операция обеспечивает изменение направления векторной физической величины, значение которой остается неизменным. Изменение направления осуществляют коленчатые равноплечные рычаги, передачи с коническими шестернями, зеркала и отражательные пластины (рефлекторы), изогнутые трубопроводы, волноводы или световоды и т.п.

Заметим, что для реализации операций «изменение направления» и «проведение» в отдельных случаях могут использоваться одинаковые физические эффекты и соответственно одинаковые конструктивные элементы. Например, волновод может применяться для проведения пучка радиоволн и для изменения его направления; такую же двойную функцию может иметь световод или резиновый шланг с жидкостью. Это объясняется тем, что конструктивные элементы имеют не одно, а несколько свойств.

**8. Выравнивание – колебание.** Основная операция «выравнивание» преобразует колеблющийся (пульсирующий или нестационарный) поток в стационарный (электрические выпрямители, муфты свободного хода, обратные запорные клапаны и т.п.). Операция «колебание» производит обратное преобразование (кривошипный механизм, преобразующий равномерное вращательное движение в колебательное, прерыватель, колебательный контур и т.п.).

9. **Связь – прерывание.** Основная операция «прерывание» аналогично выключателю прерывает (останавливает) поток энергии, вещества или информации и соответственно прекращает их передачу от одного пункта к другому. Операция «связь», напротив, восстанавливает (возобновляет) движение или передачу энергии, вещества и сигналов в потенциально существующем потоке. Примеры устройств, реализующих эти операции: выключатели, соединительные муфты, затворы, задвижки, запорные клапаны и т.п.

Следует заметить, что для реализации операций «связь–прерывание» и «увеличение–уменьшение» в отдельных случаях могут быть использованы одинаковые конструктивные (функциональные) элементы, которые обеспечивают реализацию двух основных операций (например, транзистор в режиме электронного ключа, задвижка на трубопроводе и т.д.).

10. **Соединение (композиция) – разъединение (декомпозиция).** Основные операции «соединение–разъединение» имеют отношение к *неоднородным* потокам (энергий, веществ и сигналов) с различными значениями физических величин (массой, плотностью, окраской, агрегатным состоянием, амплитудой, длиной волны, геометрической формой, размерами и т.д.). Примеры реализации операции «соединение»: смесители механических компонентов, частот, электрических сигналов, карбюраторы и насосы, соединяющие энергию и вещество, и т.п. Примеры устройств реализации операции «разъединение»: сепараторы, центрифуги, различные фильтры, спектроскопы, сортирующие устройства, гидравлические двигатели, или турбины, радиаторы водяного отопления, разъединяющие энергию и вещество, и т.п.

11. **Объединение (слияние) – разделение (разъединение).** Основные операции «объединение–разделение» обеспечивают соответственно объединение нескольких однородных потоков энергии, веществ или сигналов в один поток или, напротив, разделение одного потока на несколько *однородных* потоков (т.е. устройства, реализующие операции «объединение–разделение», взаимодействуют с такими потоками энергии, веществ и сигналов, в которых параметры потока, кроме количества энергии, вещества или сигналов, до и после устройств объединения–разделения остаются *неизменными*). Примеры устройств реализации операций «объединение–разделение»: тройники и разветвления в водопроводных, тепловых, газовых, электрических и измерительных сетях передачи с распределением энергии, вещества или сигналов; дифференциалы; устройства для сварки, пайки и резки материалов и т.п.

12. **Накопление – выдача.** Потоки энергии, веществ и информации могут накапливаться и при необходимости извлекаться из накопителя. Для этого существуют две основные операции – «накопление» и «выдача». Примеры устройств реализации этих операций:

*для потоков энергии* – механические, гидравлические, пневматические, электрические и тепловые аккумуляторы;

*для веществ* – резервуары, баки, газовые баллоны, бункеры, элеваторы и т.п.

*для сигналов* – перфокарты, магнитные ленты и диски, фотопленки и т.п.

13. **Отображение – обратное отображение.** Операция «отображение» применяется в том случае, когда реальный поток энергии, вещества или физических сигналов

на входе в процессе преобразования получает информационное отображение на выходе в графическом, числовом и другом виде, удобном для визуальной оценки, наблюдения или расчёта. Это может быть код, запись, изображение числового значения на цифровом индикаторе, показание на шкале прибора, изображение на экране дисплея или телевизора и т.д. Обратное отображение связано со случаями, когда на входе задаётся числовое значение или графическое изображение, а на выходе получается поток реального вещества или энергии.

**14. Фиксирование – расфиксирование.** Операция «фиксирование» связана с уменьшением числа свободы движения ТО, включая закрепление его в определённой точке пространства и уменьшение числа степеней свободы движения до нуля. Операцию «фиксирование» осуществляют приспособления и объекты, которые прикрепляют одни элементы ТО или системы к другим, поддерживают составные части ТО на определённом расстоянии друг от друга, фиксируют заданное положение объекта. Здесь имеется в виду не только уменьшение степеней свободы какого-либо элемента относительно другого, а закрепление его на строго определённом расстоянии. В последнем случае на входе имеется неопределённая координата (одна или несколько), а на выходе – координаты, представляющие для данного технического объекта определённое значение. Операция «расфиксирование» связана с увеличением числа степеней свободы перемещения или с уменьшением определённости положения в пространстве.

**15. Ускорение – замедление.** Это физические операции, изменяющие динамические характеристики протекания потока энергии, вещества или информации; их введение позволяет расширить описание и моделирование функционирования проектируемой ТС.

**16. Увеличение – уменьшение плотности потока.** Это физические операции, отражающие неоднородность потоков в пространстве, позволяющие учитывать вредные и использовать полезные свойства неоднородности. При моделировании ТС оценка неоднородности потоков энергии и вещества позволяет учесть их взаимодействие. Физические операции используются при функционально-физическом анализе ТС, а также при синтезе ФПД конструируемой системы.

Учебное издание

**Кривин** Николай Николаевич

**МЕТОДОЛОГИЯ СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ЭЛЕКТРОННЫХ И РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

Учебное пособие для бакалавриата, специалитета и магистратуры

В двух частях

Часть 1

Подписано в печать 26.07.2022. Формат 70×100/16. Усл. печ. л. 30,96.  
Тираж 150 экз. Заказ № 199.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники»

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.  
Тел. (3822) 533018.



**Н.Н. Кривин**

**МЕТОДОЛОГИЯ  
СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ЭЛЕКТРОННЫХ  
И РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ  
СРЕДСТВ**

**Часть 2**

**Н.Н. КРИВИН \* \* \* МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЭС 2**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

**Н.Н. Кривин**

**МЕТОДОЛОГИЯ СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ  
И РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

**Учебное пособие**

**В двух частях**

**Часть 2**

Томск  
Издательство ТУСУРа  
2022

УДК 658.512.22.011.56(075.8)  
ББК 30.2-5-05я73+32-02-05я73  
К820

Рецензенты:

**Русановский С.А.**, канд. техн. наук;  
**Губарев Ф.А.**, канд. техн. наук

Печатается по решению научно-методического совета ТУСУРа  
(протокол № 5 от 24.03.2021 г.)

**Кривин, Николай Николаевич**  
К820 Методология системотехнического проектирования электронных и радиоэлектронных средств. В 2 ч. Ч. 2 : учеб. пособие для бакалавриата, специалитета и магистратуры / Н.Н. Кривин. – Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2022. – 204 с.

ISBN 978-86889-941-6 (Ч. 2)

ISBN 978-5-86889-939-3

Изложена методология системотехнического проектирования технических средств, работа которых основана на принципах электроники и радиотехники.

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

Для студентов бакалавриата, специалитета и магистратуры образовательных организаций высшего образования конструкторского, радиотехнического, электронного и приборостроительного профилей, а также аспирантов, преподавателей, проектировщиков и разработчиков электроники, практических и научных работников.

УДК 658.512.22.011.56(075.8)

ББК 30.2-5-05я73+32-02-05я73

ISBN 978-5-86889-941-6 (Ч. 2)

ISBN 978-5-86889-939-3

© Кривин Н.Н., 2022

© Томск. гос. ун-т систем упр.  
и радиоэлектроники, 2022

## Оглавление

4 ДЕКОМПОЗИЦИЯ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ «ЧЕРНОГО ЯЩИКА». СТРУКТУРНЫЙ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ ОБЪЕКТА ПРОЕКТИРОВАНИЯ	
4.1 Постановка задачи.....	5
4.2 Основания декомпозиции «черного ящика».....	6
4.2.1 Анализ и синтез в исследовании систем.....	6
4.2.2 Компромиссы между полнотой и простотой анализа «черного ящика».....	7
4.2.3 Типы сложности в анализе «черного ящика».....	8
4.2.4 От модели «черного ящика» к структурной схеме системы.....	9
4.2.5 Основные физические операции.....	12
4.2.6 Основные математические операции.....	15
4.2.7 Основные логические операции.....	16
4.3 Модель состава системы.....	17
4.3.1 Компоненты модели состава системы.....	17
4.3.2 Классификация функциональных узлов электронных и радиоэлектронных средств.....	19
4.3.3 Условно-графические обозначения функциональных узлов на структурных электрических схемах электронных и радиоэлектронных средств.....	27
4.3.4 Пример разработки модели состава электронных и радиоэлектронных средств ..	34
4.4 Модели структуры системы.....	36
4.4.1 Понятие структуры системы.....	36
4.4.2 Отношения, свойства и структура системы.....	38
4.4.3 Способы соединения функциональных узлов.....	39
4.4.4 Пример разработки модели структуры электронных и радиоэлектронных средств.....	41
4.4.5 Структурные электрические схемы электронных и радиоэлектронных средств...	43
Выводы.....	95
Контрольные вопросы.....	96
Упражнения.....	97
Рекомендуемая литература.....	100
Список литературы.....	103
5 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ И РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ. СИСТЕМНЫЙ УРОВЕНЬ	
5.1 Постановка задачи.....	106
5.2 Требования и моделирование систем.....	108
5.3 Определение, цели и задачи моделирования электронных и радиоэлектронных средств на системном уровне.....	110
5.3.1 Значение моделирования.....	110
5.3.2 Структура стадии моделирования.....	113
5.3.3 Структурно-функциональное моделирование.....	118
5.4 Введение в моделирование сложных технических систем.....	120
5.4.1 Языки системного моделирования.....	120
5.4.2 Математическое моделирование систем.....	135
5.5 Краткий обзор САПР в области системотехники электронных и радиоэлектронных средств.....	138
5.5.1 Пакеты прикладных программ компьютерного математического моделирования электронных и радиоэлектронных средств.....	138
5.5.2 Пакеты прикладных программ компьютерного схемотехнического моделирования электронных и радиоэлектронных средств ..	140

5.5.3 Особенности технологии автоматизированного проектирования .....	153
Выводы .....	155
Контрольные вопросы .....	156
Упражнения .....	157
Рекомендуемая литература.....	157
Список литературы.....	158
<b>6 ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМОТЕХНИКИ ЭЛЕКТРОННЫХ И РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ</b>	
6.1 Факторы развития технических систем.....	160
6.2 Сферы применения системотехнического инженерного подхода .....	164
6.3 Образование для системотехников будущего .....	167
6.4 Перспективы развития теоретической системотехники .....	169
6.4.1 Организация комплексного теоретического исследования в системотехнике.....	169
6.4.2 Проблема построения системотехнической теории .....	182
Выводы .....	195
Контрольные вопросы .....	195
Упражнения .....	196
Рекомендуемая литература.....	197
Список литературы.....	198
Список сокращений.....	200

## 4 ДЕКОМПОЗИЦИЯ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ «ЧЕРНОГО ЯЩИКА». СТРУКТУРНЫЙ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ ОБЪЕКТА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Благо везде и повсюду зависит от соблюдения двух условий:  
правильного установления конечной цели и  
отыскания соответствующих средств,  
ведущих к конечной цели.

*Аристотель*

Прежде чем научиться изобретать новое,  
научись повторять существующее.

### 4.1 Постановка задачи

В данном разделе мы перейдем к описанию объекта проектирования на уровне функциональной структуры (ФС).



Дано: полное и подробное описание представления объекта проектирования в виде «чёрного ящика»; сформулированная проектная задача; условия проектной задачи в форме требований технического задания.

Требуется найти: совокупность вариантов структурных электрических схем проектируемого ЭРЭС; дополнительные требования к объекту проектирования, представленные в виде доработанного варианта технического задания.

Цель шага по декомпозиции модели типа «черный ящик» (ЧЯ) заключается в нахождении ответов на три главных вопроса.

1. Каков функциональный состав «черного ящика»?
2. Каковы связи между компонентами «черного ящика»?
3. Какова внутренняя структура «черного ящика»?

## 4.2 Основания декомпозиции «черного ящика»

### 4.2.1 Анализ и синтез в исследовании систем

Согласно определениям из системного анализа декомпозиция – это итеративная аналитическая операция разделения целого на части с сохранением признака подчиненности, принадлежности, в результате которой получаются иерархические структуры [1].

Задачу декомпозиции удастся решить в случае нахождения ответов на все нижеперечисленные вопросы.

1. Сколько функционально элементарных «черных ящиков» (ЧЯ) существует?
2. Каким образом выполняются операции разделения «черного ящика» как целого на части и как выполняются операции объединения частей в целое?
3. Сколько таких способов существует?
4. Почему операции разделения и объединения выполняются именно таким образом?

Важное значение аналитического метода состоит не только и не столько в том, что сложное целое разделяется на все менее сложные (и в конечном счете простые) части, а в том, что соединенные надлежащим образом эти части снова образуют единое целое. Момент агрегирования частей в целое является конечным этапом анализа, так как лишь после этого можно объяснить целое через его части – в виде структуры целого. При агрегировании следует помнить правило, что вклад любой части в общесистемный эффект зависит от вкладов других частей. Поэтому если заставить каждую часть функционировать наилучшим образом, то в целом эффект не будет наивысшим. Отобрав, например, лучший в мире карбюратор, двигатель, колеса и т.д., мы не только не получим самый лучший автомобиль, но вообще не сможем собрать машину, так как детали машин разных марок не подойдут друг к другу. Итак, при анализе неаддитивных систем следует делать акцент на рассмотрение не отдельных частей, а на их взаимодействия, что является существенно более трудной задачей. Так, управление неаддитивной системой окажется более эффективным, если управлять не действиями её частей отдельно, а взаимодействиями между ними.

Формализация описания любой системы или процесса есть способ упрощения их понимания. То же относится к самому системному анализу и к каждой из используемых в нём операций. К числу наиболее употребительных операций системного анализа принадлежат разделение целого на части и объединение частей в целое. Весьма важным фактом является то, что декомпозиция выполняется по содержательной модели проблеморазрешающей системы. Поэтому качество анализа прямо связано с полнотой используемой модели.

## 4.2.2 Компромиссы между полнотой и простотой анализа «черного ящика»

С количественной точки зрения требования к иерархической структуре сводятся к двум противоречивым принципам: полноты (проблема должна быть рассмотрена максимально всесторонне и подробно) и простоты (все дерево должно быть максимально компактным – «вширь» и «вглубь»). Компромиссы между ними вытекают из качественного требования – главной цели: свести сложный объект анализа к конечной совокупности простых подобъектов либо (если это не удастся) выяснить конкретную причину неустранимой сложности (рисунок 4.1).

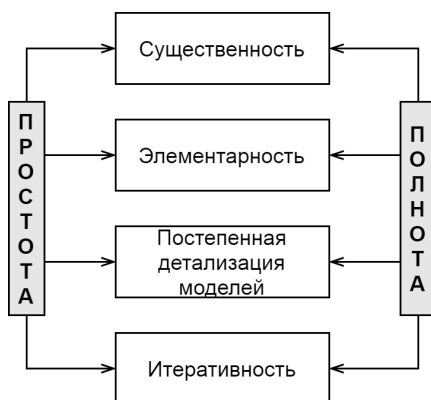


Рисунок 4.1 – Схема компромиссов между принципами простоты и полноты анализа

Для поиска баланса между противоречивыми требованиями полноты и простоты необходимо использовать принципы существенности, элементарности, постепенной детализации моделей и итеративности.

*Принцип существенности:* в модель-основание декомпозиции включаются только компоненты, существенные по отношению к цели анализа (релевантные).

*Принцип элементарности:* в случае необходимости должна быть возможность продолжения декомпозиции до принятия решения о её прекращении по данной ветви (разные ветви могут иметь различную длину). Такое решение принимается, когда декомпозиция приводит к получению результата (подцели, подфункции, подзадачи и т.п.), не требующего дальнейшего разложения, т.е. результата простого, понятного, реализуемого, обеспеченного, заведомо выполнимого, одним словом, элементарного. Понятие элементарности в системотехнике ЭРЭС базируется на понятии функционального узла, а в схемотехнике – на понятии электронного/радиоэлектронного элемента/компонента принципиальной электрической схемы, работа которого основана на одном или нескольких физических эффектах или явлениях.

*Принцип постепенной детализации моделей:* если на какой-то ветви дерева не достигается элементарность, то выдвигается предположение, что дальнейшая декомпозиция может все-таки довести анализ до получения элементарных фрагментов.



Возможность продолжения декомпозиции состоит во введении новых элементов в модель-основание и в продолжении декомпозиции по ним.

*Принцип итеративности* алгоритма декомпозиции придает ему вариабельность, возможность пользоваться моделями различной детальности на разных ветвях, углублять детализацию сколько угодно, если это потребуется.

### 4.2.3 Типы сложности в анализе «черного ящика»

В процессе декомпозиции работа специалиста-системотехника может быть осложнена тремя факторами. Соответствующие этим факторам типы сложности проектной ситуации приведены на рисунке 4.2.



Рисунок 4.2 – Типы сложности проектной ситуации

Сложность из-за неинформированности («невежества») заключается в том, что специалист (эксперт) признает недостаточность своей компетентности для дальнейшего анализа. В этом случае ему следует обратиться к эксперту другой квалификации (например, построение новых содержательных моделей требует знаний по иной специальности). Случай, когда декомпозиция заканчивается элементарными фрагментами на всех ветвях дерева, является простейшим. Не имеет значения, один или несколько экспертов довели анализ до конца, важно, что это оказалось возможным, следовательно, первоначальная сложность была вызвана не столько недостатком информации, сколько большой размерностью проблемы.

Сложность из-за непонимания заключается в отсутствии у проектировщика в настоящее время сведений или знаний, необходимых для продолжения процесса декомпозиции «черного ящика». В таком случае анализ не ликвидирует сложность, но локализует её, позволяя определить, каких сведений не хватает на данном шаге декомпозиции.

*Сложность из-за незнания* заключается в объективном и принципиальном отсутствии на момент декомпозиции «черного ящика» нужных системотехнику научных знаний, что дает ему право ставить перед учеными соответствующих отраслей наук задачи поиска требуемых знаний. В свою очередь наличие этого права обязывает проектировщика владеть продвинутой способностью формулировать и ставить междисциплинарные задачи.

Таким образом, можно заключить, что метод декомпозиции не дает новых знаний, а лишь «вытягивает» знания из экспертов, структурирует и организует их, обнажая нехватку знаний в виде «дыр» или пробелов в этой структуре. В итоге

обнаруженная нехватка конкретных знаний все-таки является новым знанием (раньше нам было неизвестно, что именно мы не знали), а по-иному скомбинированные фрагменты старых знаний также обладают новыми качествами.

#### 4.2.4 От модели «черного ящика» к структурной схеме системы

После того как модель системы типа «черный ящик» разработана, следующими задачами системотехника являются его декомпозиция на «черные ящики» более низкого уровня вплоть до перехода к «функциональным атомам», т.е. неделимым с функциональной точки зрения моделям; их обоснованный выбор; поиск способов связи этих «черных ящиков» друг с другом (рисунок 4.3).

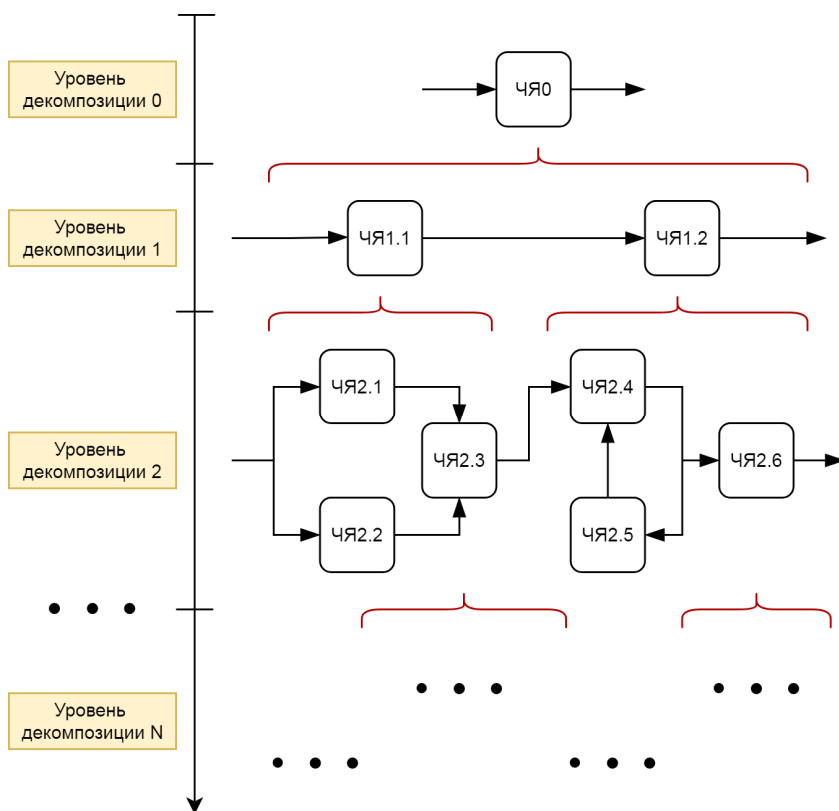


Рисунок 4.3 – Уровни декомпозиции исходного «черного ящика» на примере системы с одним входом и одним выходом (стрелками показаны направления процессов в системе). Уровень декомпозиции  $N$  соответствует уровню элементарных функциональных узлов

Если проанализировать данную схему, можно прийти к следующим выводам:

– каждый новый уровень декомпозиции увеличивает количество подсистем, т.е. «черных ящиков» (ЧЯ)  $n$ -го уровня декомпозиции;

– на последнем уровне декомпозиции все ЧЯ должны быть представлены функционально элементарными частями структуры системы, которые будем называть ФУ.

Далее необходимо найти ответы на следующие вопросы.

Сколько функционально элементарных ЧЯ существует? Чем это определяется?

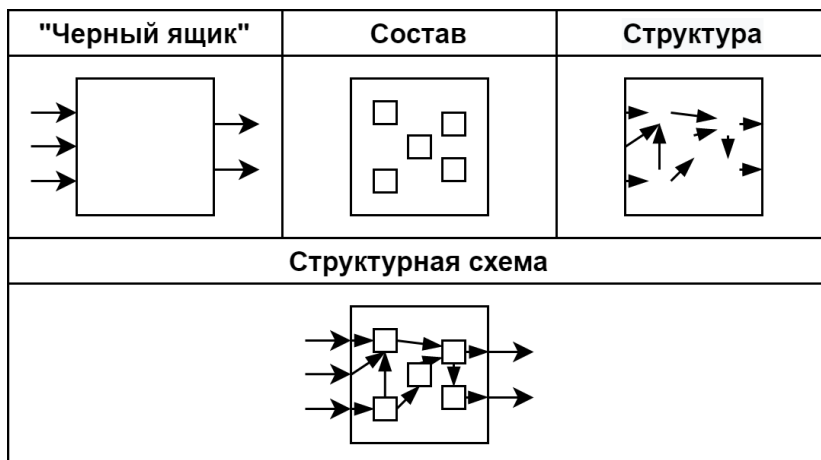
Каково количество ЧЯ каждого типа для ЧЯ0?

Сколько способов соединения ЧЯ друг с другом существует?

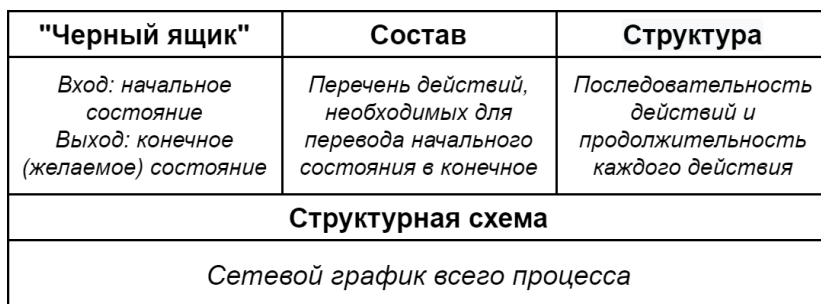
Как ЧЯ каждого уровня декомпозиции должны быть связаны друг с другом?

По каким правилам они должны соединяться?

В итоге последовательность разработки моделей представлена на рисунке 4.4.



*a*



*б*

Рисунок 4.4 – Типы моделей: *a* – статический вариант; *б* – динамический вариант

Как было указано в разделе 1, подавляющее большинство ТС организуется из нескольких составляющих (элементов, функциональных узлов, устройств, комплексов, систем) и может быть естественным образом разделено на части. Каждый элемент как самостоятельное ТС выполняет определенную функцию и реализует определенную физическую операцию (ФО), т.е. между элементами имеют место два вида связей и соответственно два вида их структурной организации [2].

Элементы, имея определенные функциональные связи друг с другом, образуют *конструктивную функциональную структуру* (КФС). КФС представляет собой ориентированный граф, вершинами которого являются наименования элементов, а ребрами – функции элементов.

Кроме функциональных связей, между элементами ТС имеются *потокосвязи*, т.е. элементы, реализуя определенные физические операции, создают поток преобразуемых или превращаемых веществ, энергии, сигналов или других факторов. Например, на вход источника вторичного электропитания подается переменное напряжение 220 В 50 Гц, а на выходе получается постоянное напряжение 12 В.

Такие потоки определенным образом объединяют и связывают элементы ТО и соответственно их ФО. В сложных ТО часто присутствует несколько взаимосвязанных потоков.

Взаимосвязанный набор ФО, реализующих один определенный поток преобразований вещества, энергии или сигналов, либо несколько взаимосвязанных потоков будем называть *потокосвязанной функциональной структурой* (ПФС). ПФС представляет собой граф, вершинами которого являются наименования элементов ТО или операций Коллера  $E$ , а ребрами – входные  $A_T$  и выходные  $C_T$  потоки (факторы).

Различают две разновидности ПФС: конкретизированную ПФС, у которой в вершинах графа указаны наименования элементов; абстрагированную ПФС, у которой в вершинах графа указаны наименования операций Коллера. Абстрагированную ПФС называют также *структурой физических операций*.

КФС и ПФС дополняют друг друга. При решении прикладных задач (конструирование, обучение и т.д.) используют или конструктивную ФС, или потокосвязанную ФС, или одновременно обе разновидности.

В потокосвязанной ФС каждый элемент реализует определенную ФО. Такая реализация происходит на основе одного или нескольких физико-технических эффектов (ФТЭ).

Под ФТЭ будем понимать различные приложения физических законов, закономерностей и следствий из них, физические эффекты и явления, которые могут быть использованы в технических устройствах. Как правило, в ФТЭ имеет место определенная причинно-следственная связь между «входом» и «выходом». ФТЭ должен иметь стандартное формализованное описание, удобное для технических приложений и машинной обработки.

Наиболее обобщенное качественное описание ФТЭ состоит из трех компонентов:

$$(A, B, C) \text{ или } Q = (A \rightarrow B \rightarrow C), \quad (4.1)$$

где  $A$  – входной поток вещества, энергии или сигналов;  $C$  – выходной поток;  $B$  – физический объект, обеспечивающий или осуществляющий преобразование  $A$  в  $C$ .

Для входного  $A$  и выходного  $C$  потоков можно указать носители потоков и их качественные и количественные характеристики. В таблице 4.1 приведены примеры

описания ФТЭ по формуле (4.1) для уровня элементов и функциональных узлов (ФУ).

Таблица 4.1 – Примеры описания физических эффектов

Наименование ФТЭ элемента или ФУ	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
Закон Джоуля–Ленца (элемент)	Электрический ток	Проводник	Теплота
Термоэлектронная эмиссия	Теплота (нагревание)	Оксидная суспензия	Поток электронов
Пьезоэлектрический эффект (элемент)	Деформация (сила)	Пьезокристалл	Электрическое поле
Усиление напряжения (ФУ)	Сигнал напряжением $U$	Усилитель с коэф. усиления $k$	Сигнал напряжением $kU$
Генерация гармонического сигнала (ФУ)	Напряжение питания	Генератор гармонического сигнала	Гармонический сигнал
Фильтрация нижних частот (ФУ)	Сигнал с произвольными спектральными характеристиками	Фильтр нижних частот	Сигнал со спектром в области нижних частот

#### 4.2.5 Основные физические операции

Важным шагом на пути к методу конструирования структуры систем явился вывод, что процессы в технических системах можно свести к конечному числу элементарных операций. Для определения этих основных операций важно представлять, что в технических системах могут быть только потоки энергий, материалов или сигналов, которые каким-либо образом передаются и/или изменяются (преобразуются) соответствующими системами [3].

В этой связи понятие «сигнал» следует трактовать как прохождение активной физической величины во времени. Причем должны рассматриваться все физические величины, связанные с энергией, или все составляющие энергии, например электрическое напряжение, электрический ток, сила, путь, давление, световой поток, звук и т.д. Активные сигналы представляют собой величины потоков, они могут передаваться из одного места в другое. В противоположность им пассивные сигналы не имеют энергии, они не могут передаваться, то есть они прежде преобразуются в активные сигналы. Примерами пассивных сигналов являются картины, формы, переменное электрическое сопротивление и т.д. В этой связи потоки сигналов в первую очередь следует рассматривать как потоки энергии, для конструирования сигнальных устройств содержание информации этих потоков имеет второстепенное значение. Под операцией следует понимать лишь сам процесс, при этом не представляет интереса, что во что должно быть преобразовано. Напротив, под функцией в первую очередь следует понимать связь причины – следствия между входной и выходной величиной, то есть что во что должно быть преобразовано.

Таким образом, под физической функцией следует понимать задание, какая физическая величина благодаря какому процессу в какую другую величину должна быть преобразована.

Запись в виде математических символов  $GA \Rightarrow GB$  позволяет выяснить, что, например, энергия вида  $A$  должна превращаться в энергию вида  $B$  в результате процесса «превращение». Стрелка означает то же самое, что и превращение, она указывает, в результате какого вида деятельности должен быть реализован этот процесс. Стрелку следует рассматривать как операнд функции, подобно тому как знак сложения (+) может быть операндом обычной математической функции, и рассматриваемый сам по себе он не дает никаких сведений о том, какие величины должны суммироваться друг с другом.

Вывод 12 основных физических операций определяется следующими условиями.

1. В технических системах могут изменяться или оставаться неизменными только свойства и состояния энергий, сигналов и веществ. Свойства и состояния энергий и сигналов или их составляющие, например сила, напряжение, электрический ток и т.д., ясно описываются путем указания параметров (единицы измерения, числового значения и направления, если речь идет о векторных величинах, и числового значения, если речь идет о скалярных величинах). Таким образом, у физических величин в технических системах может изменяться только единица измерения, числовое значение и направление, других возможностей не существует. Изменение единицы измерения физической величины обычно связано с изменением свойства. Изменение свойств также можно понимать как изменение качества энергии, материала, сигнала или их потоков. Изменение числового значения (количества) физической величины называется изменением состояния. Выражаясь иначе, под изменением состояния следует понимать изменение величины свойства (количества или качества). Отсюда вытекают три основные операции: преобразование, увеличение и изменение направления для энергии, материала и сигнала.

2. Энергия или ее составляющие, например сила, напряжение, электрический ток и т.д., сигналы и материалы, проходящие через технические системы, формально могут рассматриваться как реки с естественными потоками и аналогичными свойствами:

- существование потока предполагает наличие соответствующего источника и места впадения;
- между источником и местом впадения потоку требуется проводящее пространство;
- поток, расходящийся первоначально во все стороны, может сосредоточиваться (сводиться, собираться) на определенном прямом направлении;
- поток может направляться вдоль заданного пути;
- движение потока может прерываться и снова возобновляться;
- поток в определенной среде может продолжать поступательное движение в одном направлении или колебаться;
- поток в количественном отношении может разделяться или соединяться;

– поток, который представляет собой комбинацию из двух или нескольких отдельных потоков, отличающихся физическими характеристиками, согласно этим характеристикам может разделяться;

– поток может накапливаться или выводиться.

Исходя из названных свойств потока и условия, что каждое изменение свойства, отличающееся в качественном отношении, должно соответствовать основной операции, выводятся, в частности, основные семь операций: сбор (концентрация), управление, прерывание, колебание, разделение, разъединение и накопление. Для создания потока формально необходим соответствующий источник и место впадения (следует напомнить о так называемом источнике направления у электрических систем), а также требуется проводимость пространства, находящегося между источником и местом впадения.

С 7 названными изменениями свойств потока и с операциями «излучение» и «проводимость», необходимыми для создания потока, получается 9 основных операций. Вместе с операциями «преобразование», «увеличение» и «изменение направления» получается 12 основных физических операций. Формально каждое изменение свойства, состояния или направления можно сделать обратным, то есть по теоретическим и практическим соображениям к каждой из этих основных операций целесообразно присоединять противоположную операцию, например преобразование – обратное преобразование, увеличение – уменьшение, а изменение направления – последующее изменение направления, которому соответствует переход к первоначальному направлению.

Примерами использования операций «преобразование» и обратное «преобразование» могут служить электрический генератор или электродвигатель. Зубчатая передача представляет превосходный пример реализации операций «увеличение» и «уменьшение» значения векторной физической величины (число оборотов или крутящий момент) и для изменения направления вектора (угловая скорость).

Каждая основная операция имеет вход и выход. Сообразно этому соответствующие операционные символы имеют две соединительные черты (двухполюсник). Многими из названных основных операций можно управлять посредством вспомогательной величины. Согласно трехполюснику управляемые основные операции должны обозначаться символом с тремя соединительными чертами. Эта возможность управления операцией основывается на том, что они в большинстве случаев реализуются благодаря использованию физических эффектов, закон измерения которых представляет функцию не только одного, а двух или нескольких независимых параметров ( $y = f(x_1; x_2; x_3; \dots)$ ), используемых для управления.

Итак, основная операция может иметь один или несколько входов управления (может быть трехполюсником, четырехполюсником или многополюсником).

## 4.2.6 Основные математические операции

Аналогично основным физическим операциям существуют алгебраические операции [3]:

- сложение и вычитание;
- умножение и деление;
- возведение в квадрат и извлечение корня;
- интегрирование и дифференцирование.

Как у физических, так и у алгебраических основных операций имеются обратные операции. Поскольку основные алгебраические операции используются в технических системах, имеются устройства, которые выполняют только математические операции. Поэтому их, наряду с основными физическими операциями, целесообразно использовать для синтеза функций технических систем.

Совокупность этих операций и их символы показаны на рисунке 4.5. В качестве примеров технических устройств, в которых реализованы математические операции, могут служить известные механические настольные счетные машины, планиметры, аналоговые вычислительные машины и т.д.

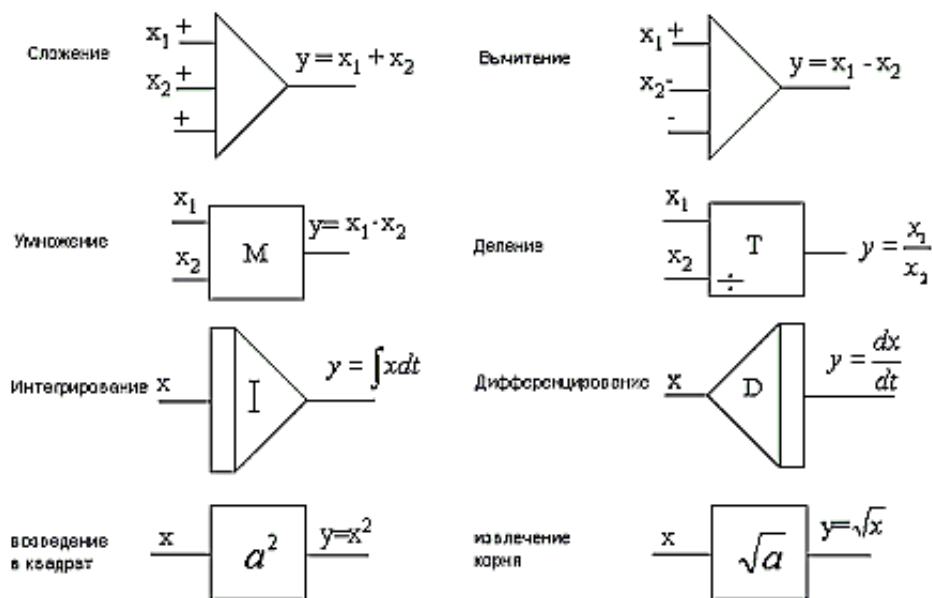


Рисунок 4.5 – Основные математические операции



## 4.2.7 Основные логические операции

Технические системы зачастую включают в себя не только основные физические или алгебраические, но и логические операции [3], например в безопасных схемах технических и пассажирских лифтов. Кроме того, для клавиатур (кодирующего или декодирующего устройства), а также для электронно-вычислительных машин или подобных систем почти исключительно необходимы элементы конструкций, которые могут производить логические операции. Таким операциям, например, соответствует отрицание, которое также называется логическим отрицанием или функцией НЕ, конъюнкция, называемая также функцией И или операцией И, а также дизъюнкция, которая также называется операцией ИЛИ. Эти операции и соответствующие им условные обозначения схем соединений показаны на рисунке 4.6.

При этом двум переменным на входе  $A$  и  $B$  с символом  $A$  соответствует переменная с отрицанием ( $\bar{A}$  не  $A$ ) (инверсированная переменная), уравнению  $C = AB$  (или  $C = A \wedge B$ ) в форме алгебраической схемы соответствует операция И, а уравнению  $C = A + B$  (или  $C = A \vee B$ ) в форме алгебраической схемы соответствует операция ИЛИ.

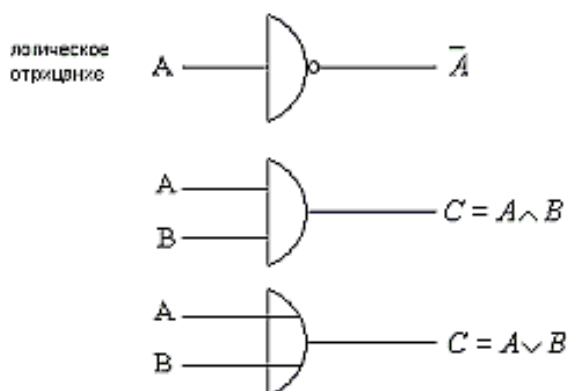


Рисунок 4.6 – Основные логические операции (Буля)

Таким образом, возможно представить все желаемые технические операции, реализуемые в виде машин, приборов и аппаратов, как объединение приведенных основных операций (синтез функций). Действительно также обратное: все операции в машинах, приборах и аппаратах можно свести к основным физическим, алгебраическим и логическим операциям (анализ функций).

## 4.3 Модель состава системы

### 4.3.1 Компоненты модели состава системы

Внешне целостный и обособленный «черный ящик» обладает внутренней неоднородностью, что позволяет различать его составные части как подчиненные системы (подсистемы). Эти части в свою очередь могут быть разделены на другие составляющие, те – на третьи и т.д. Части системы, которые мы рассматриваем как неделимые, будем называть элементами. Такое разделение условно, так как согласно положениям системного подхода любой элемент может быть представлен как система с точки зрения других наук. При этом любой элемент также представим моделью «черного ящика».

---

*Например, то, что в системотехнике РЭС считается функционально неделимым элементом, с точки зрения схемотехники РЭС может быть разделено на ещё более мелкие компоненты, называемые электрорадиоэлементами (резистор, конденсатор, диод и т.д.), назначение которых заключается в преобразовании физических величин по соответствующим физическим законам. К примеру, преобразование тока в напряжение на резисторе происходит по закону Ома, преобразование тока в световой поток, излучаемый светодиодом, происходит благодаря законам квантовой механики и т.д.*

---

Неделимые элементы с функциональной точки зрения назовем функциональными узлами (ФУ). Части системы, состоящие более чем из одного элемента, назовем подсистемами. Среду, в которой предполагается функционирование ЧЯ и которая включает другие ТС, назовем надсистемой.

В результате получается модель состава системы, описывающая, из каких подсистем и элементов она состоит (рисунок 4.7).

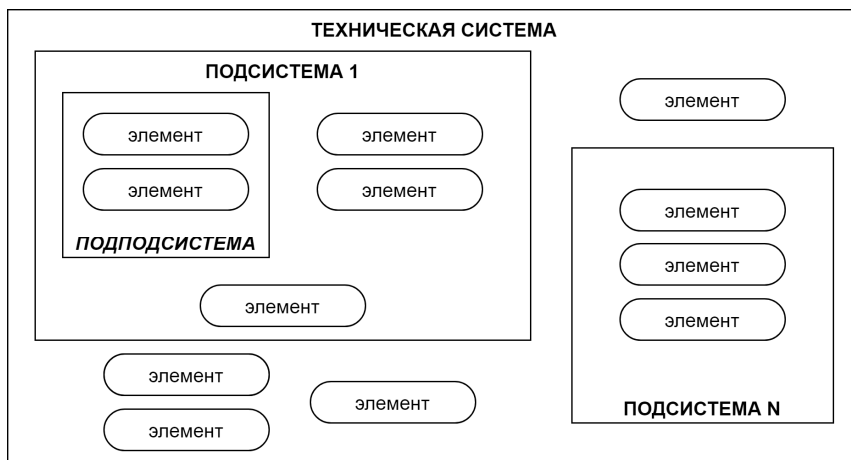


Рисунок 4.7 – Модель состава технической системы

Рассмотрим упрощенные примеры моделей состава для некоторых систем (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Примеры моделей состава некоторых систем

Система	Подсистемы	Элементы
Система цифрового телевидения	Подсистема передачи	Центральная телестудия Антенно-передающий центр
	Канал связи	Среда распространения радиоволн Спутники-ретрансляторы
	Приёмная подсистема	Местные телецентры Телевизоры потребителей
Радиолокационная система обзора лётного поля	Передающая подсистема	Задающий генератор Модулятор Усилитель мощности
	Антенная подсистема	Элементы конструкции апертуры антенны Электромеханический привод
	Среда распространения зондирующего сигнала	Радиолокационные цели Гидрометеоры Посторонние объекты
	Приёмная подсистема	Усилитель радиочастотный Гетеродин Фильтр промежуточной частоты Детектор Фильтр нижних частот Решающее устройство Устройство отображения информации
Семья	Члены семьи	Муж Жена Предки Потомки Другие родственники
	Имущество семьи	Общее жильё и хозяйство Личная собственность членов семьи
Отопительная система жилого дома	Источники тепла	Котельная или отвод от центральной теплотрассы
	Подсистема распределения и доставки тепла	Трубы Калориферы Вентили
	Подсистема эксплуатации	Службы эксплуатации и ремонта Персонал

При построении модели состава системы нужно помнить, что это нетривиальная задача в силу следующих факторов.

1. У разных экспертов (системотехников, схемотехников) существует разная степень знания системы. Кроме того, один и тот же эксперт в разных условиях может предложить разные модели.

2. Разные модели состава получаются вследствие того, что понятие элементарности можно определить по-разному. То, что с одной точки зрения является

элементом, с другой – оказывается подсистемой, которая может быть разделена на составляющие части.

3. Модель состава является целевой, и для различных целей один и тот же объект потребует разделить на разные части. Например, модель одной и той же радиостанции для военных и гражданских будет состоять из различных подсистем.

4. Модели состава различаются потому, что всякое деление целого на части, всякое деление системы на подсистемы является относительным. Например, звуковую карту персонального компьютера можно отнести к системному блоку либо к акустической системе. Другими словами, границы между подсистемами условны, относительны.

Это также относится и к границам между самой системой и надсистемой, включая окружающую среду.

Модель состава системы отображает, из каких частей (подсистем и элементов) состоит система. Главная трудность в построении модели состава заключается в том, что деление целостной системы на части является относительным, условным, зависящим от целей моделирования (это относится не только к границам между частями, но и к границам самой системы). Кроме того, относительным, как говорилось выше, является и определение самой малой части – функционального элемента.

Для упрощения работы с существующими подсистемами и элементами, составляющими ЧЯ, удобно все их многообразие свести к иерархии электронных и радиоэлектронных средств.

#### **4.3.2 Классификация функциональных узлов электронных и радиоэлектронных средств**

Требования полноты, выдвигаемые к модели состава технической системы, работающей на физико-технических принципах электроники, радиоэлектроники и радиотехники, приводят к необходимости определения, классификации, описания и характеристики функционально элементарных компонентов ЭРЭС как своеобразных «функциональных атомов» этих средств.

Под *функционально элементарными компонентами* понимаются такие средства, которые изменяют величину отдельного параметра или характеристики процесса и не разлагаются на более элементарные с функциональной точки зрения. Они соответствуют такому уровню разукрупнения РЭС, как *функциональный узел (ФУ)*.

---

*Например, усилитель есть функционально элементарное устройство, так как его невозможно разложить на более элементарные функциональные компоненты. Усилитель (однокаскадный) может быть разложен лишь на элементы принципиального уровня, выполняющие преобразование физических величин: электрорадиоэлементы (резисторы, конденсаторы, дроссели) и электронные приборы (транзисторы, операционные усилители), а также на цепи этих компонентов, соединённых последовательно или параллельно друг с другом со служебной целью – для обеспечения*

*рабочего режима главного, как правило, активного элемента ФУ. Многокаскадный усилитель может быть разложен лишь на отдельные элементарные каскады усилителей.*

*С другой стороны, преобразователь промежуточной частоты супергетеродинного приёмника не является функциональным узлом, так как он состоит из двух ФУ (гетеродина, т.е. генератора, и смесителя) и может быть на них разложен.*

---

Проведем классификацию функционально элементарных компонентов ЭРЭС. При представлении ФУ моделями «черного ящика» будем полагать, что рассматриваемые ФУ идеальны и работают в идеальных условиях (в отсутствие помех), т.е. на их входы попадает только полезный детерминированный сигнал (сигналы), а выходы не содержат помеховых, мешающих или нежелательных процессов, источником которых могут быть особенности функционирования реального ФУ.

Ввиду того что ФУ в общем случае представляют собой преобразователи процессов разнообразной природы, для их типизации необходимо основываться на классификации полезных процессов (см. рисунок 3.20). Манипуляция величиной каждого отдельно взятого параметра или определённой совокупности параметров процесса (процессов) порождает отдельный класс функциональных узлов. Кроме того, функциональный узел в общем случае может иметь несколько входов и выходов. Исходя из этих соображений, все ФУ можно классифицировать следующим образом.

По природе преобразуемых процессов ФУ можно разделить на преобразователи:

- процессов неэлектрической природы в процессы электрической природы (датчики, антенны и т.д.);
- процессов электрической природы в процессы неэлектрической природы (исполнительные, оконечные устройства и приводы – динамические головки громкоговорителей, электродвигатели, экраны мониторов, оптические индикаторы и т.д.);
- процессов электрической природы в процессы электрической природы (усилители, фильтры, генераторы и т.д.);
- процессов электрической природы в процессы электрической природы с промежуточным преобразованием процессов электрической природы в процессы неэлектрической природы и обратно (фильтр на ПАВ и т.д.).

По типу процессов все ФУ можно разделить на аналоговые, цифровые и смешанные; дискретные, импульсные, стохастические и случайные.

Аналоговые ФУ преобразуют аналоговый процесс с одними характеристиками в аналоговый процесс с другими характеристиками.

---

*Примерами аналоговых ФУ являются усилитель, пассивный и активный фильтры, генератор гармонических колебаний, аттенюатор и т.д.*

---

Цифровые ФУ работают с двоичными импульсными последовательностями и преобразуют цифровой процесс с одними характеристиками в цифровой процесс с другими характеристиками.

---

*Примерами цифровых ФУ являются цифровой фильтр, мультиплексор, демultipлексор, триггер, регистр, суммирующий и реверсивный счетчики, шифратор, дешифратор и т.д.*

---

Смешанные ФУ преобразуют аналоговый процесс в цифровой процесс либо наоборот.

---

*Примерами смешанных ФУ являются аналого-цифровой (АЦП) и цифро-аналоговый (ЦАП) преобразователи.*

---

Дискретные и импульсные ФУ работают с процессами, представляющими собой последовательности коротких импульсов, длительность которых не является информативным признаком в отличие от их амплитуды.

Стохастические и случайные ФУ представляют собой генераторы процессов случайной, стохастической или квазислучайной, хаотической природы.

По количеству входов и выходов согласно типологии задач «черного ящика» ФУ делятся на устройства:

- без входа<sup>1</sup> и с одним выходом (генератор, все типы датчиков);
- с одним входом и без выхода (с интерфейсным выходом – передающая антенна, головка громкоговорителя);
- с одним входом и одним выходом (усилитель, линия задержки, аттенюатор, детектор, интегратор, дифференциатор, логарифмирующее устройство, антилогарифмирующее устройство, делитель частоты, делитель);
- с двумя входами и одним выходом (сумматор, компаратор, смеситель, модулятор, решающее устройство, коррелометр; двухвходовый логический элемент И-НЕ);

---

<sup>1</sup> В данном случае фразу «без входа» не следует понимать буквально. Согласно закону сохранения материи и энергии невозможно, чтобы что-то бралось из ничего. Другими словами, процесс на выходе генератора получается как результат автоматического управления энергией, подводимой к нелинейному элементу генератора от постоянного источника электропитания. Однако в силу традиции и договоренности между специалистами согласно отечественным стандартам в УГО генератора принято указывать один выход и не указывать вход. К тому же, как правило, сам источник электропитания на электрических структурных схемах также не показывается. Что касается датчиков, то на СЭС они также обозначаются с одним выходом без входа, так как являются интерфейсами системы и преобразуют внешние по отношению к ней процессы неэлектрической или электрической природы в процессы электрической природы. Аналогичным образом обстоит дело с оконечными и исполнительными устройствами. Таким образом, на СЭС отображаются только те ФУ, которые выполняют преобразования процессов электрической природы в процессы той же природы.

– с несколькими входами и одним выходом (сумматор, решающее устройство, пороговое устройство; трёхвходовый логический элемент ИЛИ-НЕ, одновибратор, мультиплексор; электронный ключ);

– с одним входом и несколькими выходами (демультиплексор);

– с несколькими входами и несколькими выходами (аудиостереоусилитель; RS-триггер, D-триггер, двоично-десятичный реверсивный счетчик, дешифратор).

По *виду материи*, изменение физических свойств которой с течением времени и в пространстве называется процессом, все ФУ можно разделить на работающие:

– с физическими полями – датчик акселерометра, антенна радиотелескопа, ИК-датчик, СВЧ-волноводы;

– с упорядоченными потоками различных физических частиц (радиоактивные излучения, электрический ток, поток ионов и т.п.) – датчик радиации Гейгера, электрический усилитель, электрический фильтр.

По *соотношению линейных размеров* входящих в ФУ элементов и длины волны процесса различают:

– ФУ и цепи с сосредоточенными параметрами (длина волны много больше линейных размеров элементов) – НЧ-техника;

– ФУ с распределёнными параметрами (длина волны много меньше линейных размеров элементов) – длинные линии, СВЧ-техника, устройства технической электродинамики, антенно-фидерные устройства.

По *типу преобразуемого параметра процесса*, величина которого подлежит изменению, все ФУ, относящиеся к категориям «один вход», «один выход», «один вход – один выход», можно разделить на устройства, осуществляющие преобразование:

– амплитудно-временных параметров<sup>2</sup> (преобразователи амплитуды, фазы, формы процесса, динамического диапазона, длительности импульсов, периода) – усилитель, аттенюатор, компрессор, экспандер (расширитель динамического диапазона), амплитудный ограничитель, стабилизатор уровня, линия задержки, фазоинвертор, фазовращатель, дискретизатор, квантователь уровня;

---

<sup>2</sup> Необходимо отметить, что данная классификация не является строгой из-за однозначной связи между амплитудно-временными и спектральными параметрами процессов, определяемыми теорией Фурье. Другими словами, одно и то же устройство можно отнести к разным классификационным категориям. Поэтому мы дополнительно принимаем, что определяющим классификационным признаком является то, какому представлению процессов отдается предпочтение в рамках конкретной задачи. Так, например, амплитудный ограничитель изменяет форму сигналов при условии, что их амплитуда превосходит наперед заданный порог, следовательно, согласно теории Фурье он также изменяет спектр ограничиваемых сигналов. Поэтому амплитудный ограничитель можно отнести и к категории устройств, изменяющих амплитуду процесса, и к категории устройств, изменяющих спектральные свойства этого процесса. Однако назначение амплитудного ограничителя заключается в предохранении последующих за ним цепей от кратковременных всплесков процесса, что отражено в его названии. Поэтому мы относим этот ФУ к амплитудно-временным устройствам.

- спектральных параметров (ширины спектра, несущей частоты или центральной частоты спектра) – фильтр, генератор, умножитель частоты, модулятор, детектор (демодулятор), устройства, сужающие спектр, расширяющие спектр, монохроматор;
- пространственно-временных и спектрально-энергетических параметров (энергия, направление распространения и состояние поляризации ЭМВ) – антенна, рефлектор, поляризатор, волноводы и направляющие структуры электромагнитного поля, коммутаторы разветвлённых трактов СВЧ, замедляющие устройства, вентили, ответвители, нагрузки, циркуляторы, фазовращатели.

По *типу операций* с преобразуемым параметром процесса, величина которого подлежит изменению, ФУ, относящиеся к категориям «один вход – один выход» и «несколько входов – один выход» (а также относящиеся к категории «несколько входов – несколько выходов»), можно разделить на устройства, осуществляющие:

- базовые алгебраические операции с несколькими процессами (сумматоры, вычислители разности, вычислители произведения, делители (вычислители отношения), дифференциаторы, интеграторы, квадраторы (операция возведения в квадрат), ФУ, возводящие в произвольную степень, модуляторы, демодуляторы, логарифмирующие и антилогарифмирующие ФУ, экспоненцирующие ФУ, определители логарифма отношения (для двух переменных), вычислители автокорреляционной функции и взаимной корреляционной функции процессов, суммирующие и реверсивные логические счетчики);

- базовые логические функции (логические элементы НЕ, И, ИЛИ, а также их комбинации);

- основные и производные разрывные функциональные операции (сравнивающие устройства (компараторы); вентили; вычислители абсолютного значения; вычислители пределов; ФУ с зоной нечувствительности; ФУ, реализующие скачкообразные и окнообразные функции; ФУ, реализующие гистерезис);

- управление величиной параметра одного процесса по закону изменения величины параметра другого процесса (управляемые генераторы, усилители, фильтры; ограничители уровня, модуляторы; дискретизаторы; квантователи уровней сигналов; электронные ключи, логические мультиплексоры и демультимплексоры, шифраторы и дешифраторы (также относятся к категории «несколько входов – несколько выходов»));

- регулирование величины параметра процесса (регуляторы уровня);

- запись, хранение, сдвиг и вывод информации (триггеры, регистры).

По *местоположению функционального компонента* относительно среды и внутренней структуры ЧЯ различают:

- интерфейсные (периферийные) ФУ (датчики и органы управления параметрами ФУ – преобразователи процессов неэлектрической или электрической природы в процессы электрической природы; оконечные, приводные или исполнительные устройства – преобразователи процессов электрической природы в процессы электрической или неэлектрической природы);



– внутренние (непериферийные) ФУ (как правило, это преобразователи электрических процессов в электрические процессы, например усилитель, фильтр, генератор).

Также следует отметить такой особый класс ФУ, как *согласующие, или развязывающие* (их ещё называют *буферными*), назначение которых состоит в том, чтобы обеспечить независимый режим работы двух соседних, включаемых друг за другом ФУ, ФУ и источника сигнала, ФУ и нагрузки.

---

***Например, согласующим ФУ будет эмиттерный повторитель на биполярном транзисторе, включаемый между оконечным мощным усилительным каскадом и низкоомной нагрузкой.***

---

Если представить физические процессы как математические функции параметров от времени, то с ними можно совершать операции, аналогичные выполняемым с обыкновенными математическими объектами: складывать, вычитать, логарифмировать, возводить в степень, находить абсолютное значение и т.д. [3].

Приведем перечень технических характеристик избранных компонентов и функциональных узлов ЭРЭС, описанных выше (таблица 4.3) [4–7]. Знание их параметров и свойств позволяет системотехнику распределять исходные требования ТЗ по всей структурной электрической схеме, а следовательно, обеспечивать прослеживаемость этих требований и проверку их выполнимости.

Таблица 4.3 – Основные технические характеристики избранных компонентов структурных электрических схем

Название компонента	Технические характеристики
Усилители	Класс, тип и область применения усилителя, коэффициент усиления по напряжению, току и мощности, рабочая полоса частот, амплитудно-частотная характеристика, фазочастотная характеристика, входное и выходное сопротивление, динамический диапазон, амплитудная характеристика, коэффициент нелинейных искажений (коэффициент гармоник), вольт-амперные характеристики, коэффициент полезного действия, напряжение питания, потребляемый ток
Фильтры	Тип, вид и область применения фильтра, полоса пропускания, полоса подавления, крутизна наклона переходного участка амплитудно-частотной характеристики (или порядок фильтра), равномерность амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик, добротность <i>Для пассивных фильтров:</i> коэффициент затухания <i>Для активных фильтров:</i> коэффициент усиления, входное сопротивление, стабильность коэффициента передачи, допустимый фазовый сдвиг, диапазон частот
Генераторы	Тип и область применения генератора, форма и параметры генерируемого сигнала (период, длительность импульса, скважность, амплитуда, размах, ширина спектра), коэффициент стабильности, напряжение шумов, напряжение питания, потребляемый ток

Продолжение таблицы 4.3

Название компонента	Технические характеристики
Антенны	Тип и область применения антенны, форма диаграммы направленности, ширина диаграммы направленности, ширина полосы рабочих частот, коэффициент направленного действия, действующая высота (действующая длина, эффективная поверхность), коэффициент использования поверхности, коэффициент полезного действия, коэффициент усиления, множитель направленности, коэффициент стоячей волны по напряжению, интенсивность шумов, эффективная излучаемая мощность, сопротивление излучения и эффективность, импеданс, поляризация, массогабаритные показатели
Громкоговорители	Тип и область применения громкоговорителя, диаграмма направленности, номинальный импеданс (полное электрическое сопротивление), номинальная электрическая мощность, паспортная электрическая мощность, добротность, рабочий диапазон частот, амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики, неравномерность амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик в рабочем диапазоне частот, чувствительность, суммарный коэффициент гармоник, коэффициент полезного действия, массогабаритные показатели
Микрофоны	Тип и область применения микрофона, диаграмма направленности, коэффициент направленности, чувствительность (или индекс направленности), напряжение на номинальной нагрузке, стандартный уровень чувствительности, перепад чувствительности «фронт/тыл», зависимость чувствительности от частоты и направления звуковой волны, индекс направленности, уровень собственных помех, номинальный диапазон частот, амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики, неравномерность амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик, модуль полного электрического сопротивления, массогабаритные показатели
Дисплеи	Тип и область применения дисплея, разрешение, частота обновления экрана, качество цветопередачи, формат и размеры, яркость, контраст
Источники оптического излучения	Тип и область применения излучателя, сила света, яркость, постоянное прямое напряжение, максимально допустимый постоянный прямой ток, максимально допустимое обратное постоянное напряжение, максимально допустимое обратное импульсное напряжение, максимум спектрального распределения, ширина спектра излучения, световая характеристика, вольт-амперная характеристика, спектральная характеристика
Приёмники оптического излучения	Тип и область применения приемника излучения, спектральная характеристика чувствительности, энергетическая (световая) характеристика, пороговая характеристика, вольт-амперная характеристика, частотная характеристика, температурные характеристики, рабочее напряжение, максимально допустимое напряжение, мощность рассеяния, темновое сопротивление, дифференциальное сопротивление, темновой ток, коротковолновая (длинноволновая) граница спектральной чувствительности, динамический диапазон линейности, максимум спектральной чувствительности, единичная токовая чувствительность (плотность падающего потока), интегральная токовая и вольтовая чувствительность, удельная обнаружительная способность, пороговая чувствительность, инерционность прибора

Окончание таблицы 4.3

Название компонента	Технические характеристики
Индикаторы	Тип и область применения индикатора, эргономические параметры: допустимые расстояния наблюдения, внешняя освещенность, размеры знака (высота), угол обзора, яркость, контраст, коэффициент яркости рабочей поверхности, цвет свечения и спектральная характеристика; амплитудная характеристика, разрешающая способность, частотная характеристика, время реакции и релаксации, информационная емкость
Машины электрические	Тип и область применения машины, надежность, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности, срок службы, стоимость, простота конструкции, точность преобразования входных величин, быстродействие, стабильность характеристик, массогабаритные показатели
АЦП	Тип и область применения АЦП (последовательных приближений, параллельного преобразования, двойного интегрирования), число разрядов, нелинейность, дифференциальная нелинейность, погрешность в конечной точке шкалы, время преобразования, диапазон входного напряжения (тока), максимальное значение опорного напряжения
ЦАП	Тип и область применения ЦАП, число разрядов, нелинейность, дифференциальная нелинейность, погрешность в конечной точке шкалы, время установления, диапазон выходного напряжения (тока), максимальное значение опорного напряжения
Логические элементы	Тип логического элемента, тип логики; электрические параметры: напряжение питания, значения логических уровней, потребляемая мощность, время переключения, порог переключения, помехоустойчивость, нагрузочная способность, быстродействие; статические параметры: передаточная характеристика
Компараторы на ИС	Напряжение питания, напряжение смещения, входной ток, время задержки, коэффициент усиления
Переключатели и коммутаторы на ИС	Назначение и область применения переключателей и коммутаторов, сопротивление в открытом состоянии, ток коммутации, напряжение коммутации, время включения, ток утечки, напряжение питания, группа переключения
Линии задержки	Тип и область применения линии задержки, время задержки электрического сигнала, относительная точность задержки, полоса пропускания, затухание, входное и выходное сопротивление, относительный уровень искажений сигналов из-за отражения волн от неоднородностей
Компрессоры динамического диапазона сигнала	Тип и область применения компрессора, коэффициент компрессии, время атаки, время релиза, порог срабатывания, логарифмическая амплитудная характеристика, напряжение питания
Расширители динамического диапазона сигнала	Тип и область применения расширителя (экспандера), коэффициент расширения, время атаки, время релиза, порог срабатывания, экспоненциальная амплитудная характеристика, напряжение питания

Для изучения функциональных узлов можно порекомендовать алгоритм, представленный на рисунке 4.8.

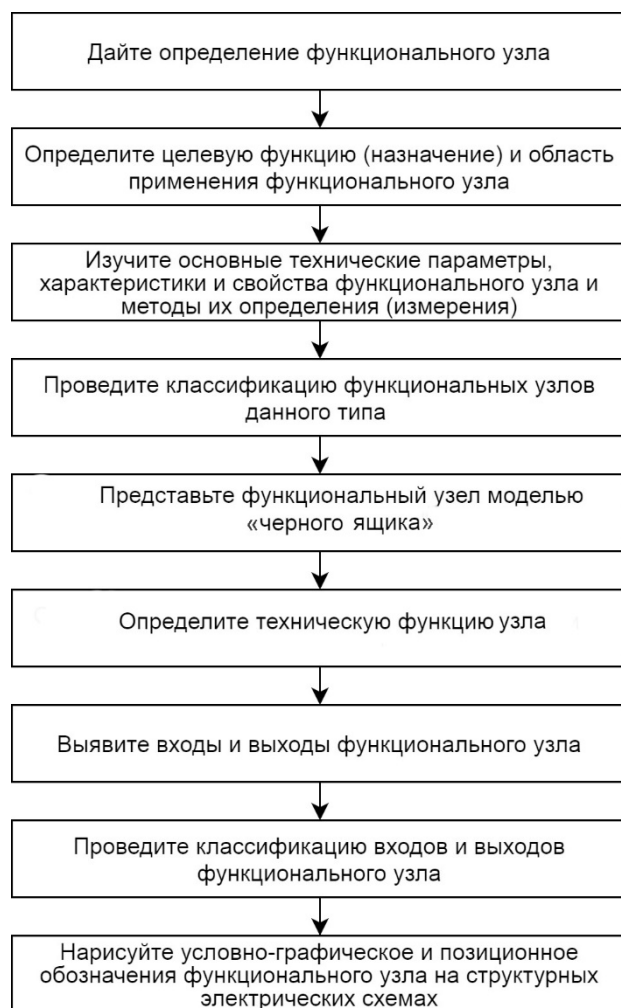


Рисунок 4.8 – Алгоритм изучения функциональных узлов

### 4.3.3 Условно-графические обозначения функциональных узлов на структурных электрических схемах электронных и радиоэлектронных средств

Изучение языка структурных электронных схем похоже на изучение иностранного языка: сначала мы запоминаем алфавит, затем – простейшие слова и правила, по которым строится предложение. Дальнейшее знание приходит только с интенсивной практикой [8]. Буквами алфавита структурных электронных схем являются условно-графические обозначения (УГО) их компонентов.

Функциональные узлы (компоненты) на СЭС изображают в виде квадратов, прямоугольников или треугольников [9]. Для большей наглядности внутри этих обозначений помещают различные знаки, придающие общим условно-

графическим обозначениям индивидуальность и мнемоничность. Кроме знаков внутри УГО, могут использоваться полные названия ФУ, аббревиатуры названий ФУ, графики зависимостей выходной и входной величин или математические выражения, описывающие математический смысл процессов преобразования (рисунок 4.9) [10].

Исторически сложилось, что в разных технических дисциплинах используются разные обозначения одних и тех же ФУ. Например, в теории автоматического управления и теории радиолокационных систем, где важна математическая суть преобразующей функции устройства, принято помещать внутрь квадратов математические выражения, а в дисциплине, изучающей телевизионные устройства, предпочитают использовать аббревиатуры названий ФУ. В свою очередь в схемах устройств связи используют УГО со знаковыми обозначениями внутри квадратов и прямоугольников (см. рисунок 4.9).

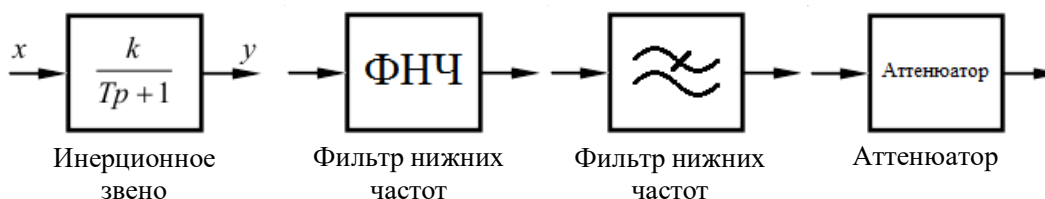


Рисунок 4.9 – Примеры условно-графических обозначений функциональных узлов

Кроме УГО, на СЭС используются позиционные обозначения [9].

Отличительным признаком генераторов является латинская буква  $G$ , которая является и буквенным кодом в позиционных обозначениях. Если нужно указать форму генерируемых колебаний, в квадрат помещают эпюры, упрощенно воспроизводящие осциллограммы этих колебаний. На рисунке 4.10 генератор синусоидальных колебаний –  $G2$ , пилообразных –  $G3$ , а прямоугольных –  $G4$ .

Чтобы отличить генераторы звуковой и радиочастоты от ФУ, вырабатывающих ток низкой частоты, вместо одного символа синусоиды изображают соответственно два ( $G5$  на рисунке 4.10) или три ( $G6$  на рисунке 4.10). Можно указать под обозначением формы колебаний значение частоты ( $G7$  на рисунке 4.10).

Возможность перестройки генератора по частоте показывают стрелкой, пересекающей либо само УГО ( $G8$  на рисунке 4.10; рядом со стрелкой в этом случае указана буква  $f$ ), либо символ формы колебаний ( $G9$  на рисунке 4.10). Генератор, стабилизированный кварцевым резонатором, выделяют на схемах символом пьезоэлектрического элемента ( $G10$  на рисунке 4.10), генератор шума ( $G11$  на рисунке 4.10) – буквами  $kT$  ( $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура).

Позиционное обозначение УГО усилителей – буквенный код  $A$ , знак усиления – небольшой равносторонний треугольник, вершина которого указывает направление передачи сигнала (рисунок 4.11,  $A1$ ). Такой же треугольник, но со стороной 12 мм ( $A2$  на рисунке 4.11) часто используют в качестве самостоятельного символа усилителей. Знаки, характеризующие вид усилителя или принцип его работы, разре-

шается указывать только в этом обозначении. Для примера на рисунке 4.11 (A3) приведено УГО магнитного усилителя (цепочка полуокружностей символизирует его обмотки).

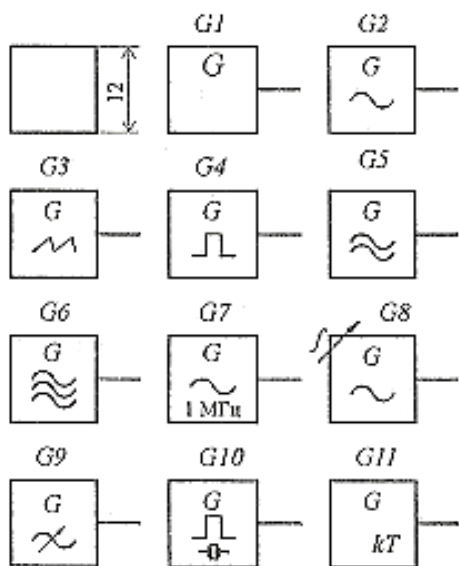


Рисунок 4.10 – Условно-графические обозначения генераторов

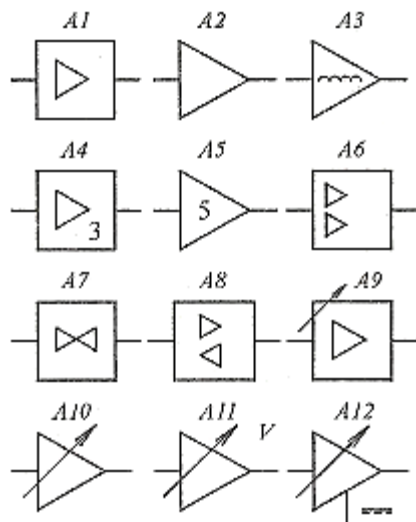


Рисунок 4.11 – Условно-графические обозначения усилителей

Стандарт предусматривает при необходимости возможность отображения в УГО усилителей числа каскадов, особенностей выходного каскада, способности передачи сигнала в обоих направлениях (такие усилители применяют, например, в переговорных устройствах), регулировки усиления и т.д. Число каскадов указывают соответствующими цифрами. На рисунке 4.11 A4 – трехкаскадный усилитель, A5 – пятикаскадный. Для обозначения двухтактного усилителя используют два знака усиления, помещая их один над другим (рисунок 4.11, A6). Такими же знаками, но направленными встречно, выделяют на схемах усилители, способные передавать сигнал в обоих направлениях, причем, если усилитель двухпроводный, их располагают на одной линии (A7 на рисунке 4.11), а если четырёхпроводный – разносят по вертикали (A8 на рисунке 4.11).

Регулируемые усилители обозначают любым из основных символов, пересекая его знаком регулирования – стрелкой (A9, A10 на рисунке 4.11). Рядом со стрелкой можно указать буквенное обозначение регулируемой величины. Например, усилитель с регулируемым выходным напряжением – A11. Если усиление регулируется электронным способом, УГО дополняют ещё одним (управляющим) выводом, рядом с которым указывают вид регулирующего сигнала. На рисунке 4.11 усилитель с внешним управлением постоянным током – A12.

Общее УГО частотных фильтров – квадрат с перечеркнутым символом синусоиды (буквенный код – Z). Такое УГО (рисунок 4.12, Z1) используют в тех случаях, когда важно показать именно наличие фильтра в цепи сигнала.

Более информативны остальные УГО, изображенные на рисунке 4.12. Здесь  $Z2$  и  $Z3$  – фильтры соответственно нижних и верхних частот,  $Z4$  и  $Z5$  – соответственно полосовой и режекторный фильтр. От символов фильтров следует отличать УГО подавителя радиочастотных помех  $Z6$ , в котором знаки синусоид перечеркнуты косым крестом.

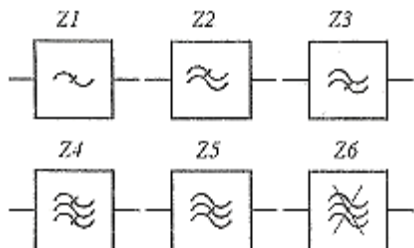


Рисунок 4.12 – Условно-графические обозначения фильтров частот

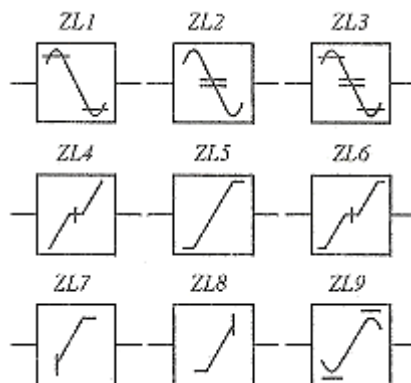


Рисунок 4.13 – Условно-графические обозначения ограничителей напряжения

Позиционные обозначения УГО устройств, предназначенных для ограничения сигнала, имеют буквенный код  $ZL$ . Работа этих устройств заключается в выделении части сигнала, лежащей ниже или выше определенного уровня или заключенного между ними. Уровни ограничения указывают отрезками горизонтальных прямых, пересекающих синусоиду – символ сигнала – в соответствующих местах. УГО ограничителей больших и малых напряжений, а также двустороннего ограничителя показаны на рисунке 4.13 ( $ZL1$ ,  $ZL2$  и  $ZL3$ ).

Устройства, предназначенные для ограничения минимальных и максимальных значений сигнала (или и тех и других), обозначают иначе. Знак такого ограничения – вертикальная черта, пересекающая наклонную линию (символ сигнала) с горизонтальными полочками (уровни ограничения) в середине (ограничитель минимума) или на концах (ограничители максимумов). Символ  $ZL4$ , изображенный на рисунке 4.13, обозначает ограничитель минимальных значений амплитуды,  $ZL5$  – максимальных,  $ZL6$  – и тех и других. Если необходимо показать ограничитель только максимальных положительных значений сигнала, знак ограничения изображают на нижнем конце наклонной линии ( $ZL7$  на рисунке 4.13), а если только отрицательных – на верхнем ( $ZL8$  на рисунке 4.13). Ограничения амплитуды без искажения формы сигнала (например, за счет действия системы автоматической регулировки усиления (АРУ)) показывают знаком синусоиды с горизонтальными черточками, не касающимися её ( $ZL9$  на рисунке 4.13).

Отличительный признак корректоров – две линии с полочками на концах (рисунке 4.14,  $A1$ ): наклонная символизирует искажение, а вертикальная – коррекцию искажения. Корректируемые параметры указывают общепринятыми

буквенными обозначениями физических величин, обозначениями единиц их измерения или специальными знаками. Например, частотный корректор выделяют буквой  $f$  (A2 на рисунке 4.14), фазовый – греческой буквой  $\varphi$  (A3), выравнитель времени задержки – обозначением  $\Delta t$  (A4), затухания – обозначением единицы его измерения  $dB$  (A5 на рисунке 4.14). Например, частотную коррекцию с подъемом АЧХ в области высших частот показывают дужкой четвертой четверти окружности (A6 на рисунке 4.14), а со спадом – первой (A7 на рисунке 4.14). Символ искажения в двух последних случаях не изображают.

В УГО устройств для сжатия динамического диапазона сигнала (т.е. нелинейного уменьшения разницы больших и малых амплитуд) – компрессоров (рисунок 4.14, A8) – используют предельно упрощенный график зависимости амплитуды выходного сигнала от амплитуды входного: наклонная линия символизирует сужение динамического диапазона. В экспандерах (расширителях динамического диапазона сигнала) решается обратная задача, поэтому график в их УГО (A9 на рисунке 4.14) имеет противоположный характер.

На основе квадрата построены УГО и таких функциональных частей устройств связи, как аттенюаторы, линии задержки, фазовращатели и т.п. (буквенный код – A). Отличительный признак УГО аттенюатора – вписанное в квадрат международное обозначение логарифмической единицы – децибела (рисунок 4.15, A1), фазовращателя – общепринятое обозначение угла – греческая буква  $\varphi$  (A4). Если необходимо указать на схеме величину вносимого устройством затухания или сдвига фаз, над линией выхода помещают соответствующую надпись (A2, A3, A5).

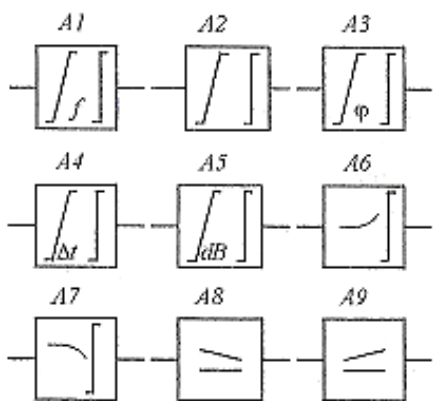


Рисунок 4.14 – Условно-графические обозначения корректоров

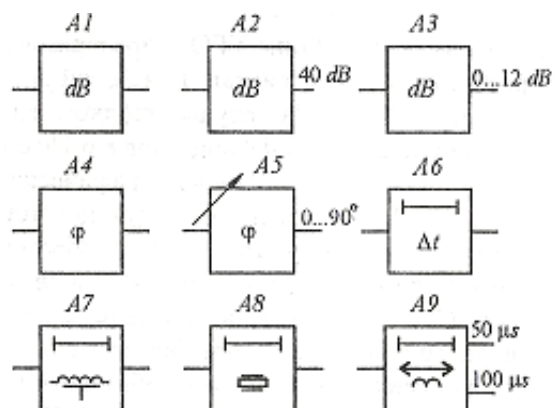


Рисунок 4.15 – Условно-графические обозначения устройств связи

Общее УГО линий задержки – квадрат с символом временной задержки, состоящим из отрезка горизонтальной прямой с засечками на концах и общепринятого обозначения временного интервала  $\Delta t$  (A6). В УГО конкретных устройств на месте этих букв можно изображать знаки, характеризующие их конструктивные особенности. Для примера на рисунке 4.15 показаны символы



электромагнитной линии задержки с распределенными параметрами (A7) и двух ультразвуковых: с пьезоэлектрическими (A8) и магнитострикционными (A9) преобразователями. У линий задержки может быть несколько выходов. В частности, наличие двух выводов у символа A9 говорит именно об этом. При необходимости время задержки указывают и у символов линий с одним выходом или внутри УГО вместо знака  $\Delta$ .

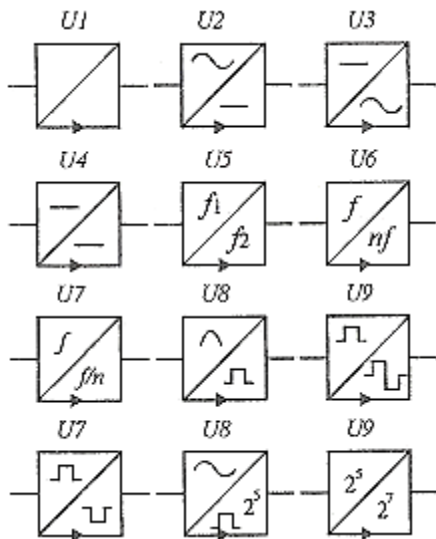


Рисунок 4.16 – Условно-графические обозначения преобразователей

преобразуется им в сигнал с частотой  $f_2$ ), умножителей  $U6$  и делителей  $U7$  частоты. Частоту выходного сигнала выражают через частоту входного с помощью коэффициентов  $n$  и  $1/n$  соответственно (где  $n$  – целое число).

Остальные УГО, изображенные на рисунке 4.16, символизируют следующие устройства:  $U8$  – формирователь прямоугольных импульсов,  $U9$  – преобразователь однополярных (в данном случае положительных) импульсов в двухполярные,  $U10$  – инвертор импульсов,  $U11$  – преобразователь переменного тока в сигналы пятизначного бинарного кода,  $U12$  – преобразователь сигналов пятизначного бинарного кода в сигналы семизначного (обозначение прямоугольного импульса в подобных случаях допускается не показывать).

Модуляторы, демодуляторы (детекторы), частотные дескрипторы и другие подобные устройства обозначают на схемах символами, показанными на рисунке 4.17 ( $U1$ ,  $U2$ ). Первый из них используют в качестве общего УГО, второй – в качестве основы для построения УГО конкретных устройств. Вместо букв  $A$  и  $B$  (над выводами) второго символа помещают знаки, характеризующие соответственно модулирующий и модулированный сигналы (для модуляторов) или модулированный и демодулированный (для демодуляторов), на месте буквы  $C$  – обозначение несущей частоты. Дополнительные знаки (например, символы звуковой и радиочастоты) указывают внутри УГО на месте букв  $a$ ,  $v$ ,  $c$ .

В технике связи широко применяют всевозможные преобразователи электрических величин в электрические (код – буква  $U$ ). Общее УГО этой группы устройств – квадрат, разделённый диагональю на две части, со стрелками на нижней стороне, указывающей направление преобразования (рисунок 4.16,  $U1$ ). В левом треугольнике помещают знаки, характеризующие преобразуемый сигнал, в правом – преобразованный. Таким образом, устройство  $U2$  – преобразователь переменного тока в постоянный (его ещё называют выпрямителем),  $U3$  – постоянного в переменный (инвертор),  $U4$  – постоянного тока в постоянный ток. Аналогично расшифровываются общие УГО преобразователя частоты  $U6$  (сигнал частотой  $f_1$

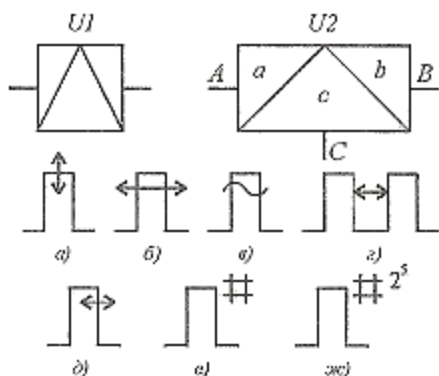


Рисунок 4.17 – Условно-графические обозначения устройств модуляции

За основу знаков вида модуляции при импульсной передаче принято упрощенное изображение прямоугольного импульса. Амплитудную модуляцию выделяют двунаправленной вертикальной стрелкой (рисунок 4.17,а), фазовую – такой же горизонтальной (рисунок 4.17,б), частотную – символом синусоиды (рисунок 4.17,в). Двухнаправленную стрелку используют также для обозначения временной (рисунок 4.17,г) и широтной (рисунок 4.17,д) модуляции. Признаком импульсно-кодовой модуляции служит знак в виде ячейки прямоугольной

сетки (рисунок 4.17,е), рядом с которым при необходимости указывают и сам код (для примера на рисунке 4.17,ж показано обозначение пятизначного бинарного кода).

Структурная электрическая схема определяет основные функциональные части изделия (установки), их назначение и взаимосвязи; она разрабатывается при проектировании (конструировании) изделия раньше схем других типов и используется при изучении структуры изделия и программы его работы, а также во время его эксплуатации.

Графическое построение схемы должно обеспечивать наилучшее представление о последовательности взаимодействия функциональных частей в изделии. На линиях взаимосвязей необходимо стрелками обозначать направление хода процессов, происходящих в изделии.

Системотехник должен уметь читать структурные электрические схемы различных ЭРЭС. Сначала необходимо изучить отдельные функциональные узлы и те преобразования, которые они осуществляют с процессами в системе, затем их УГО и позиционные обозначения. Приведем алгоритм, по которому рекомендуется читать структурные электрические схемы ЭРЭС.

1. Определить вход структурной электрической схемы ЭРЭС. По умолчанию вход СЭС слева. В некоторых случаях идентифицировать вход СЭС поможет знание типовых входов и интерфейсов, которыми для разных ЭРЭС могут являться все типы датчиков (преобразователей неэлектрических величин в электрические), а также надписи над разъемами и контактными клеммами, например антенна, микрофон, датчик давления и т.д.

2. Определить выход СЭС. По умолчанию выход СЭС справа. В некоторых случаях идентифицировать выход СЭС поможет знание типовых выходов, которыми для разных ЭРЭС могут являться все типы преобразователей электрических величин в неэлектрические или электрических величин в электрические, например динамик, монитор, антенна (в ретрансляторах) и т.д.

3. Определить типы сигналов, с которыми работает схема, а также их основные параметры (амплитудно-временная форма и гармонический спектр).

4. Двигаясь по схеме от главного входа к главному выходу и проходя последовательно функциональные узлы, идентифицировать их, определить их назначение и технические свойства, описать, с какими процессами они работают и каким образом эти процессы преобразуют, с какой целью какое преобразование осуществляется. Дать характеристику свойствам процессов на входе (входах) и выходе (выходах) каждого функционального узла.

5. Сформулировать общие свойства каждого функционального узла.

6. Проследить преобразование входного сигнала от блока к блоку от входа к выходу (как правило, слева направо).

7. Идентифицировать ЭРЭС.

8. Сформулировать общие технические характеристики СЭС ЭРЭС.

#### 4.3.4 Пример разработки модели состава электронных и радиоэлектронных средств

*Постановка задачи.* Разработать простую ТС, целевая функция которой совпадает с технической и состоит в преобразовании переменного гармонического напряжения  $U_{\sim}$  с амплитудным значением 310 В (действующее значение 220 В) и частотой 50 Гц в постоянное напряжение  $U_{=}$  амплитудой 5 В. Условия эксплуатации предполагают, что, помимо главного полезного процесса ( $U_{\sim}$ ), на входе системы может иметь место случайный помеховый процесс, амплитуда которого не превосходит 5 % амплитудного значения полезного процесса, а диапазон частот занимает полосу от 100 до 1000 Гц.

Определить функциональный состав структурной схемы будущей ТС.



*Решение.* ТС с такой целевой функцией называется источником вторичного электропитания или просто блоком питания. Анализ условия задачи приводит к выводу, что на входе ТС имеет место смесь двух процессов: полезного и вредного. Таким образом, в состав системы должен входить

компонент, пропускающий полезную составляющую смеси двух процессов и не пропускающий вредную составляющую этой смеси. Такой функциональный узел называется *электрическим фильтром*.

Чтобы определить тип фильтра, необходимо проанализировать взаимное расположение спектров полезного и вредного процессов на общей оси частот. Из условий задачи ясно, что спектры этих процессов разнесены и не пересекаются, причем спектр помехового процесса находится в области более верхних частот, чем спектр полезного процесса. Таким образом, в данной ситуации подойдет фильтр нижних частот, пропускающий низкочастотные компоненты спектра и блокирующий высокочастотные компоненты.

Сравним виды напряжений на входе и выходе ТС. На входе имеется переменное гармоническое напряжение, спектр которого содержит только одну составляющую

с частотой 50 Гц. На выходе имеется постоянное напряжение. Приходим к выводу, что требуется компонент, который сможет преобразовать входной процесс таким образом, чтобы в спектре процесса на выходе появилась составляющая постоянного напряжения. Данное преобразование называется нелинейным и может быть осуществлено с использованием вентильных электрических элементов, пропускающих переменный ток в одном направлении и не пропускающих в обратном. Функциональный узел, содержащий такие элементы, называется выпрямителем напряжения.

Особенность выпрямителей напряжения заключается в том, что они не абсолютно выпрямляют напряжение, а делают его импульсным, хоть и одной полярности. Таким образом, возникает задача сглаживания импульсного напряжения.

В спектре импульсного процесса содержится множество спектральных составляющих, из которых полезной для нас является только одна – постоянная. Постоянная составляющая напряжения находится в самом начале низкочастотной области спектра импульсного процесса, а все посторонние спектральные составляющие находятся выше. Таким образом, необходим функциональный узел, который удалит из спектра все лишние составляющие, кроме нужной по условию задачи. Следовательно, необходим второй фильтр нижних частот (ФНЧ).

Особенность схемотехники фильтров нижних частот заключается в том, что невозможно абсолютно полностью убрать верхнечастотные спектральные составляющие импульсного процесса без существенного усложнения ФНЧ и увеличения его массогабаритных показателей. Для уменьшения остаточных пульсаций напряжения после фильтрации это напряжение необходимо стабилизировать. Такой функциональный узел называется стабилизатором напряжения.

Сравним амплитуды напряжений на входе и выходе ТС: амплитуда напряжения на выходе в 62 раза меньше амплитуды входного напряжения. Следовательно, необходим компонент, который будет уменьшать напряжение по амплитуде. Таким преобразователем является трансформатор, преобразующий входное переменное напряжение в выходное переменное напряжение.

В итоге мы установили, что для выполнения условия задачи модель состава блока питания должна включать в себя пять компонентов: два ФНЧ, трансформатор, стабилизатор напряжения, выпрямитель напряжения.

Следует обратить внимание на то, что при разработке модели состава ТС порядок соединения функциональных узлов не учитывается. Это выполняется при создании модели структуры ТС на основе модели её состава. При разработке модели состава могут остаться неучтенными некоторые функциональные узлы. Однако их нехватка станет очевидна на этапе разработки модели структуры ТС, т.е. при соединении функциональных узлов между собой. Это является демонстрацией известного в системном анализе свойства эмерджентности систем.

## 4.4 Модели структуры системы

### 4.4.1 Понятие структуры системы

При изучении процессов функционирования внимание исследователя концентрируется на тех свойствах, особенностях поведения и характеристиках системы, которые меняются во времени. При анализе структур, напротив, интересуются свойствами и характеристиками системы, не зависящими от времени и сохраняющимися постоянными на всем промежутке функционирования или достаточно длительной его части.

Однако структурные и функциональные свойства тесно связаны между собой. Даже хорошо изучив законы функционирования отдельных элементов, но не зная структуры, нельзя представить систему как целое и, следовательно, понять, как она функционирует. С другой стороны, не зная хотя бы общих законов функционирования системы, невозможно определить её структуру. Таким образом, анализ функционирования и изучение структуры являются двумя взаимосвязанными, дополняющими друг друга стадиями исследования любой системы.

Хотя смысл понятия структуры представляется интуитивно ясным, дать ему удовлетворительное определение не так-то легко. Может быть, поэтому в литературе встречается большое число различных определений структуры. В качестве примера приведем некоторые наиболее типичные из них [11].

---

*Структура есть форма представления некоторого объекта в виде составных частей.*

*Структура – это множество все возможных отношений между подсистемами и элементами внутри системы.*

*Под структурой... понимается совокупность и взаимодействие её отдельных подсистем.*

*Под структурой... будем понимать совокупность элементов и связей между ними, которые определяются, исходя из распределения функций и целей, поставленных перед системой.*

*Структура системы – это то, что остается неизменным в системе при изменении ее состояния, при реализации различных форм поведения, при совершении системой операций и т.п.*

---

В совокупности данные определения достаточно хорошо отражают то главное, что присутствует в любой структуре: элементный состав, наличие связей, инвариантность (неизменность) во времени. В сущности, лишь последнее свойство позволяет разграничить понятия системы и структуры. Однако учесть только инвариантность структуры еще недостаточно. Поскольку структура – это часть системы, необходимо четко указать, какая именно часть, какие свойства и признаки системы являются структурными, а какие – нет. Ответы на эти вопросы, естественно, зависят от целей исследования системы, что также необходимо учитывать. Поэтому

далее под структурой будем понимать совокупность тех свойств системы, которые являются существенными с точки зрения проводимого исследования и обладают инвариантностью на всем интересующем системотехника интервале функционирования или на каждом непересекающемся подмножестве, на которые разбит интервал функционирования.

Из определения следует, что структура может включать в себя как общесистемные свойства (наличие элементов, существование связей между ними и т.п.), так и специальные, присущие только данной системе и связанные с особенностями её функционирования (специфика отношений между элементами, закономерности распределения информации, материальных и иных потоков и т.п.). Определение не требует безусловной инвариантности перечисленных свойств на всем интервале функционирования, что позволяет рассматривать также системы с переменной структурой. В зависимости от целей изучения системотехника должны интересоваться различными инвариантными во времени свойствами системы. Из определения следует, что для одной и той же системы можно построить различные структуры и между системой и её структурой отсутствует однозначное соответствие.

Формирование структуры является частью решения общей задачи построения системы, причем такой, которая не определяет заранее систему в целом, а лишь выявляет её конфигурацию. Следовательно, построение структуры – самостоятельная задача, предваряющая синтез системы в целом и облегчающая его проведение. Рассмотрим основные методы формализованного описания структурных свойств систем [11].

Таким образом, теперь, когда нам известен набор тех базовых функциональных «первокирпичиков», из которых складывается структура любых ЭРЭС, следующим логическим шагом является поиск ответа на три главных вопроса системотехники: какие ФУ соединять, каким образом и с какой целью?

Операцией, противоположной декомпозиции, является операция агрегирования, т.е. объединения нескольких элементов в целое. В самом общем виде агрегирование можно определить как установление отношений на заданном множестве элементов. При этом в системотехническом случае под элементами мы понимаем ФУ. Необходимость агрегирования может вызываться различными целями и сопровождаться разными обстоятельствами. Однако у всех ТС, являющихся результатами процесса агрегирования, есть одно общее свойство, получившее название эмерджентности. Это свойство присуще всем системам, и ввиду его важности остановимся на нём подробнее [1].

Объединённые и взаимодействующие элементы образуют систему, которая обладает не только внешней целостностью, обособленностью от окружающей среды, но и внутренней целостностью, единством. Если внешняя целостность отображается моделью «черного ящика», то внутренняя целостность связана со структурой системы. Наиболее яркое проявление внутренней целостности системы состоит в том, что свойства системы не являются только суммой свойств её составных частей. Система есть нечто большее, она в целом обладает такими свойствами, которых нет ни у одной её части, взятой в отдельности. Модель структуры подчеркивает главным

образом связанность элементов, их взаимодействие. Однако необходимо сделать акцент на том, что при объединении частей в целое возникает нечто качественно новое, чего не было и не могло быть без этого объединения.

В качестве демонстрации проявления этого свойства приведем пример М. Арбиба [1]. Пусть имеется некоторый цифровой автомат  $S$ , преобразующий любое целое число на его входе в число, на единицу большее входного (рисунок 4.18,а). Если соединить два таких автомата последовательно в кольцо (рисунок 4.18,б), то в полученной системе обнаружится новое свойство: она генерирует возрастающие последовательности на выходах  $A$  и  $B$ , причем одна из этих последовательностей состоит только из четных, другая – только из нечетных чисел.

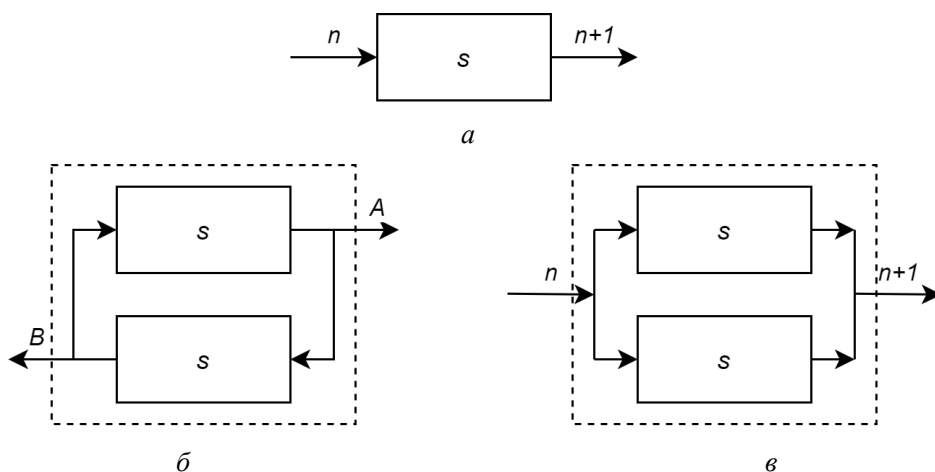


Рисунок 4.18 – Иллюстрация внутренней целостности систем (свойства эмерджентности)

Такое «внезапное» появление новых качеств у систем и дало основание присвоить этому свойству название *эмерджентности* (от англ. emergence – возникновение из ничего, внезапное появление, неожиданная случайность). Новые свойства возникают благодаря конкретным связям между конкретными элементами. Другие связи дадут другие свойства, не обязательно столь же очевидные. Например, параллельное соединение тех же автоматов (рисунок 4.18,в) ничего не изменяет в арифметическом отношении, но увеличивает надежность вычислений, если на выход поступает сигнал только от одного исправного автомата.

#### 4.4.2 Отношения, свойства и структура системы

Для того чтобы получить функционирующую ТС, иметь совокупность ФУ недостаточно, необходимо ещё правильно соединить все элементы между собой, или, выражаясь обобщенно, установить между элементами определенные связи – отношения. Совокупность необходимых и достаточных для достижения цели отношений между элементами называется *структурой системы*.

Когда мы рассматриваем некоторую совокупность ТО как систему, то из всех отношений важными, т.е. существенными для достижения цели, являются лишь некоторые. Точнее, в модель структуры (т.е. в список отношений) мы включаем только конечное число связей, которые, по нашему мнению, существенны по отношению к рассматриваемой цели.

В отношении участвуют не менее двух ТО, а свойством называется некий атрибут одного ТО. Свойство есть модель отношения. Говоря, что свойства какого-то ТО можно использовать в технической системе, мы имеем в виду установление некоторых отношений между данным ТО и другими частями системы, т.е. включение этих отношений в структуру системы.

Техническая система есть совокупность взаимосвязанных элементов, обособленная от среды и взаимодействующая с ней как целое. Модели «черного ящика», состава и структуры в совокупности охватывают понятие структурной схемы технической системы, которая также является моделью данной ТС. В литературе [12] встречаются термины «белый ящик», «прозрачный ящик», подчеркивая отличие этой модели от модели «черного ящика», а также термин «конструкция системы», который используется для обозначения материальной реализации структурной схемы ТС. В структурной схеме указываются все элементы системы, все связи между элементами внутри системы и связи определенных элементов с окружающей средой (интерфейсы, или входы и выходы системы).

Функционирование системы задается её структурой. Относительно замкнутая система с заданной структурой функционирует однозначно; функционирование полностью определяется структурой [13].

Функционирование не определяет структуру однозначно. Одна и та же функция может быть реализована различными структурами (свойство системотехнической инвариантности РЭС).

#### 4.4.3 Способы соединения функциональных узлов

Все многообразие структур существующих технических систем базируется на нескольких простых правилах соединения функциональных узлов друг с другом. Известно пять базовых способов соединения функциональных узлов между собой (рисунок 4.19): последовательное (*a*), параллельное (*b*), с обратной связью (*в*, « $\leftarrow$ » – отрицательная обратная связь, « $\rightarrow$ » – положительная связь), дивергентное (*г*), конвергентное (*д*). Знаком  $\Sigma$  отмечен сумматор. Комбинация этих пяти способов порождает бесконечное многообразие существующих структурных электрических схем.

В теории автоматического управления целевые функции «черных ящиков» описываются в терминологии передаточных функций. В данном случае, привлекая изложенный выше математический аппарат описания технических систем, передаточную функцию сложных структурных схем или их отдельных участков можно определить при помощи правил, проиллюстрированных на рисунке 4.20 [14].



Внутри функциональных узлов в правой части рисунка приводятся результирующие выражения для эквивалентных передаточных функций преобразованных блоков. Необходимо отметить, что для рисунок 4.20,в отрицательная обратная связь (знак «минус» на левом рисунке) соответствует знаку «плюс» в знаменателе эквивалентной передаточной функции в блоке справа.

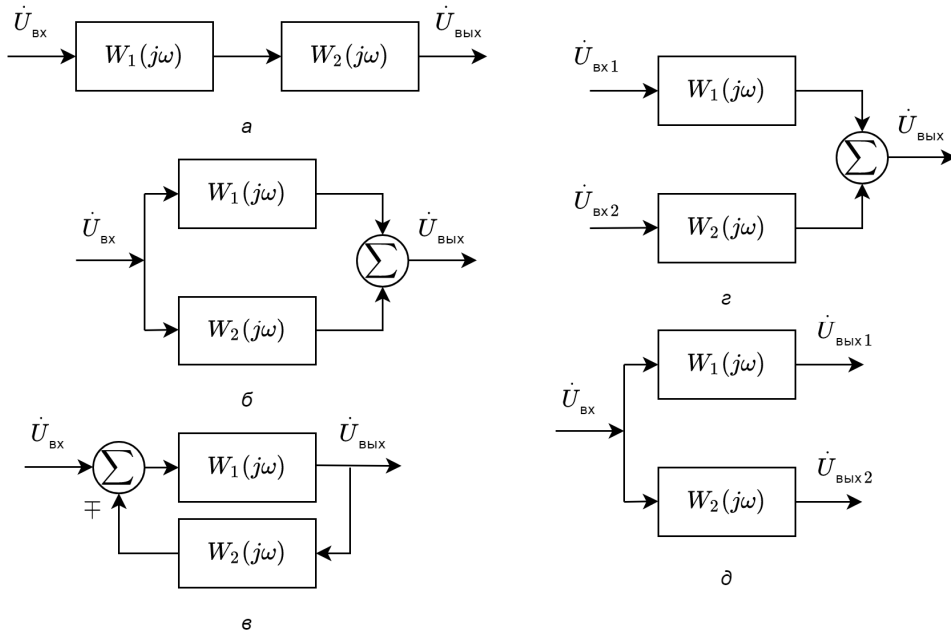


Рисунок 4.19 – Базовые способы соединения функциональных узлов

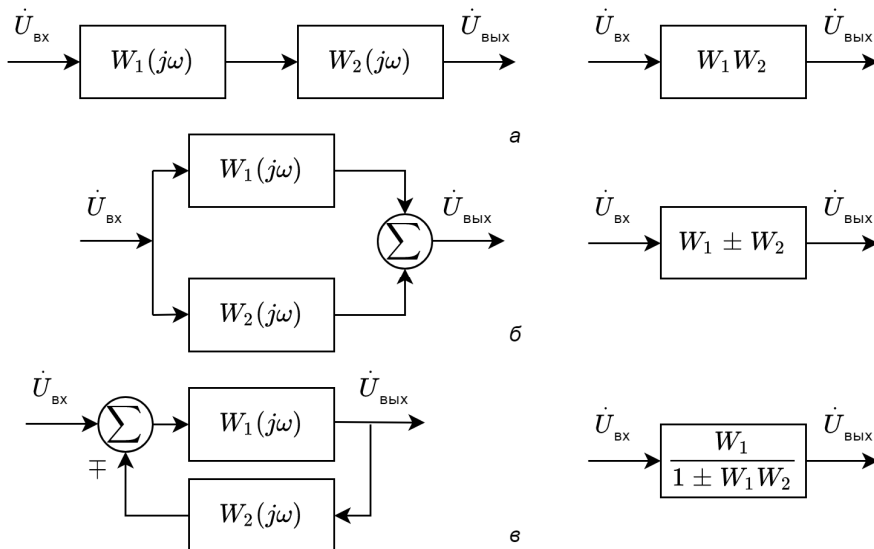


Рисунок 4.20 – Правила определения передаточной функции сложных цепей: а – объединение двух последовательно соединённых блоков; б – объединение двух параллельно соединённых блоков; в – исключение петли обратной связи

В качестве примера преобразования структурной электрической схемы рассмотрим следующую задачу: дана структурная электрическая схема устройства (рисунок 4.21,а). Требуется найти её эквивалентную передаточную функцию. Решим задачу, пользуясь правилами преобразования структурных схем (см. рисунок 4.20). Решение задачи приведено на рисунке 4.21,б.

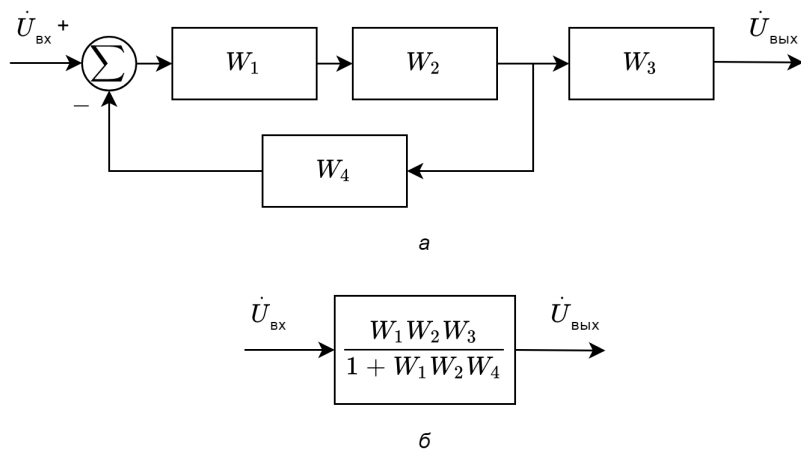


Рисунок 4.21 – Пример применения правил преобразования структурных схем: а – исходная структурная электрическая схема; б – функциональный узел с эквивалентной передаточной функцией

#### 4.4.4 Пример разработки модели структуры электронных и радиоэлектронных средств

Рассмотрим порядок разработки модели структуры блока питания на основе модели его состава, которую мы разработали в п. 4.3.4.

Мы выявили пять компонентов: два ФНЧ, трансформатор, стабилизатор напряжения и выпрямитель напряжения. Теперь необходимо установить, в каком порядке будут связаны друг с другом данные функциональные узлы. Решение этой задачи логично начать с анализа главного полезного выхода как конечного результата преобразования системой входного процесса.

Согласно условию задачи на нагрузке должно формироваться постоянное напряжение амплитудой 5 В. Среди всех выявленных функциональных узлов только стабилизатор напряжения будет иметь на выходе стабильное постоянное напряжение с минимальным процентом пульсаций. Таким образом, выход стабилизатора напряжения необходимо подключить непосредственно к нагрузке, а стабилизатор расположить в самой правой части структурной электрической схемы блока питания, если принять, что направление чтения схем в данном случае совпадает с направлением чтения обычных текстов: слева направо.

Перед стабилизатором напряжения должен стоять ФНЧ, так как его функция сглаживать пульсации напряжения после выпрямителя. Таким образом, остается

понять, в какой последовательности должны включаться второй ФНЧ и блок трансформатора.

Из условия задачи известно, что, помимо главного полезного процесса ( $U_{-}$ ), на входе системы может иметь место нерегулярный случайный стационарный помеховый процесс, амплитуда которого не превосходит 5 % амплитудного значения полезного процесса, а диапазон частот занимает полосу от 100 до 1000 Гц. Поэтому ясно, что источником помех является сеть переменного напряжения, следовательно, ФНЧ необходимо поставить перед блоком трансформатора, чтобы помехи не проникали в блок питания, а блок трансформатора надо соединить с выпрямителем напряжения.

Таким образом, мы синтезировали модель структуры блока питания, структурная электрическая схема которого приведена на рисунке 4.22.

В результате решения задачи декомпозиции системотехник должен получить структурную схему проектируемой ТС. Пример процесса последовательной декомпозиции до уровня ЭКБ показан на рисунке 4.22.

**Целевая функция ЧЯ:**  $f(\text{“}\approx 220 \text{ В} / 50 \text{ Гц}\text{”}) = \text{“}\approx 5 \text{ В} / 0 \text{ Гц}\text{”}$

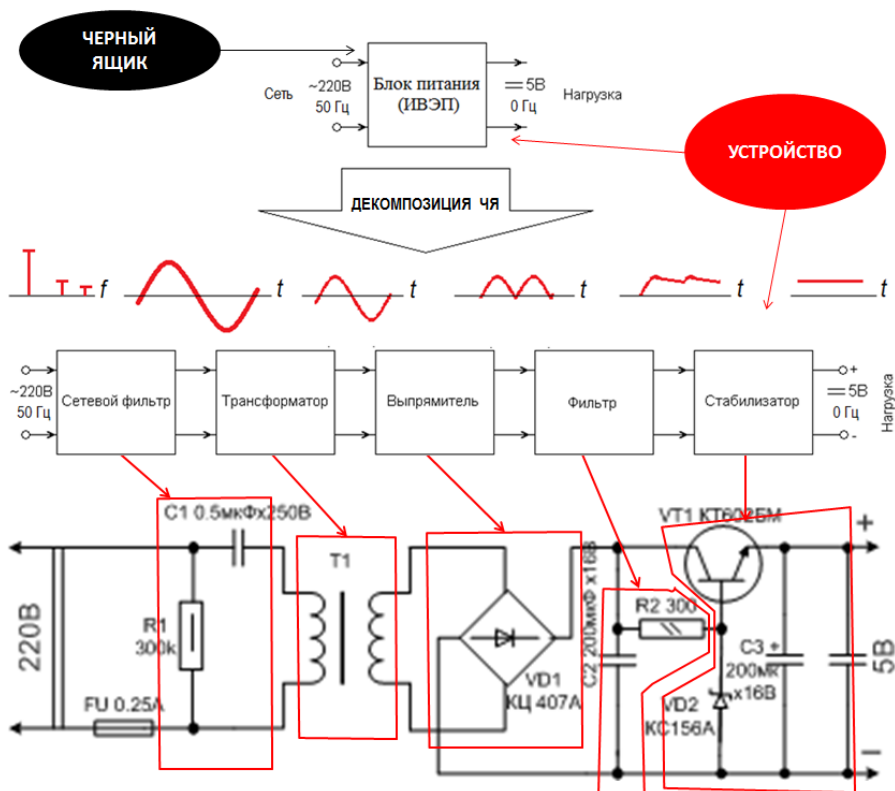


Рисунок 4.22 – Схема декомпозиции «черного ящика» блока питания

Однако решение данной задачи усложняется из-за существования свойства системотехнической инвариантности, которое заключается в том, что одна и та же ЦФ ТС может быть реализована множеством разных способов. Отсюда следует, что

декомпозиция целевой функции дает в общем случае несколько вариантов структурных схем, из которых проектировщику нужно выбрать самый подходящий для условий конкретной проектной задачи.

Далее с целью формирования у обучающихся представления о принципах декомпозиции ЧЯ и способности ориентироваться в существующем многообразии типовых структурных схем основных ЭРЭС рассмотрим структурные схемы и перспективы развития некоторых ТС.

#### 4.4.5 Структурные электрические схемы электронных и радиоэлектронных средств

На рисунке 4.23 приведена схема алгоритма изучения ЭРЭС на уровне систем и устройств.



Рисунок 4.23 – Алгоритм изучения ЭРЭС на уровне систем и устройств

В ходе исследования ТС, помимо учебных изданий, рекомендуется использовать как можно более широкий спектр источников информации: нормативную и техническую документацию, инструкции по технической эксплуатации от заводов-изготовителей, специальные технические справочники и энциклопедии, отраслевые журналы и специализированные периодические подписные издания.

### Системы радиосвязи

Аналоговые системы радиосвязи. Упрощенная структурная схема канала аналоговой системы радиосвязи с амплитудной модуляцией (АМ) несущего колебания представлена на рисунке 4.24.

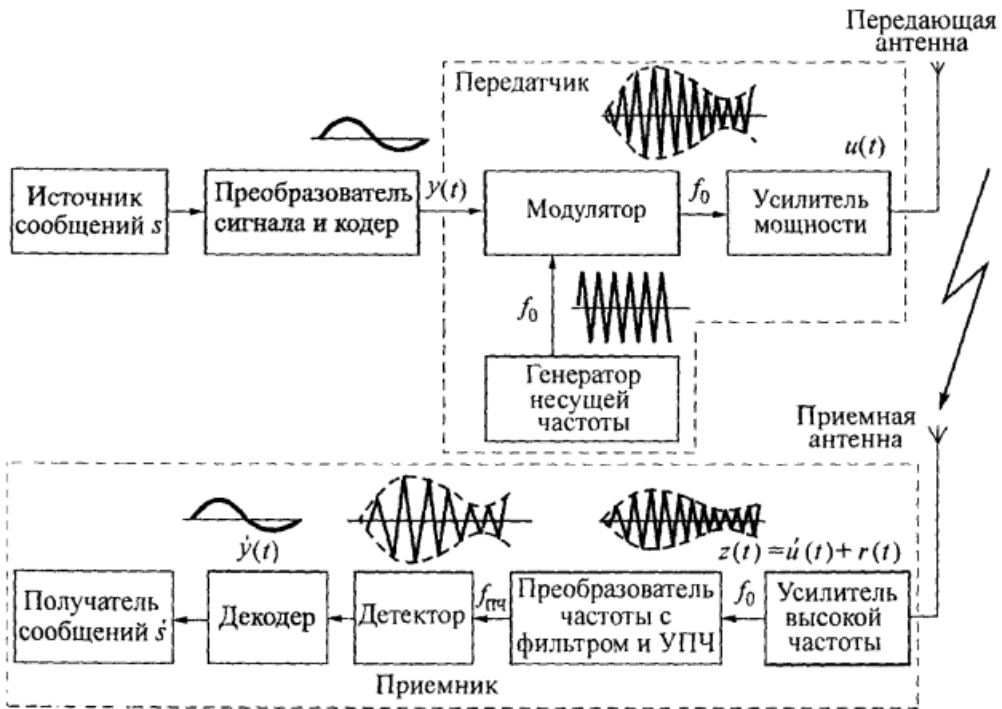


Рисунок 4.24 – Упрощённая структурная схема канала аналоговой системы радиосвязи

На структурной схеме для наглядности показаны эпюры сигналов в некоторых её характерных точках [7].

Одним из важных звеньев любой системы связи является источник сообщений, подлежащих передаче. Источник сообщений может быть аналоговым или дискретным. Выход аналогового источника может иметь любое значение из непрерывного диапазона амплитуд, тогда как выход источника дискретной информации – значения из конечного множества амплитуд. При использовании цифровой (дискретной) связи источники аналоговой информации преобразуются в источники

цифровой информации посредством *дискретизации, квантования и оцифровки*. Многие устройства для ввода данных в компьютер осуществляют подобные операции. Например, звуковая карта компьютера оцифровывает сигнал с микрофона, сканер дискретизирует сигнал, поступающий с фотоэлемента, и т.д.

В общем случае исходное сообщение  $s = s(t)$  не является электрическим, может иметь любую физическую природу (подвижное изображение, звуковое колебание и т.п.), поэтому его необходимо преобразовать в электрический (первичный) сигнал  $y(t)$  с помощью электрофизического *преобразователя сигнала*, который часто совмещают с *кодирующим устройством – кодером*. Источником сообщения при телефонной передаче является говорящий, при телевизионной – передаваемое изображение и т.д. При передаче речи и музыки преобразователем сигнала и кодером служит микрофон; при передаче изображения – передающие телевизионные трубки или специальные матрицы.

Передаваемый (первичный) сигнал является низкочастотным. Однако термин «низкочастотный» здесь достаточно условен, в частности телевизионный сигнал имеет спектр с полосой порядка 0–6 МГц. Поэтому в ряде случаев первичный сигнал непосредственно передают по линии связи. Так поступают, например, в обычной городской телефонной сети. Для передачи на большие расстояния первичный сигнал преобразуют в высокочастотный.

Необходимым условием преобразования сообщения в электрический сигнал является то, что оно должно быть обратимым. Тогда по выходному сигналу можно восстановить входной первичный сигнал, т.е. получить всю информацию, содержащуюся в переданном сообщении. В противном случае часть информации будет потеряна при передаче сигнала.

Передающее устройство включает в себя, кроме преобразователя сигнала, *передатчик* (содержащий *модулятор, генератор несущей частоты и усилитель мощности*) и *передающую антенну*. Для передачи сообщения отражающий его сигнал необходимо предварительно ввести в несущее высокочастотное электромагнитное колебание. Это осуществляется в модуляторе передатчика. Несущее колебание вырабатывается *генератором несущей частоты*. В последние годы в качестве генераторов несущих частот используют так называемые *синтезаторы частот*. Кстати, отметим, что генераторы формируют когерентное несущее колебание, имеющее стабильные параметры. В частности, положение начальной фазы колебаний в течение длительного времени настолько постоянно, что приемные устройства используют это свойство и извлекают из него пользу. Без свойства когерентности несущего колебания не могли бы успешно функционировать мощные радиотехнические системы связи.

Модулированное ВЧ-колебание относят к *вторичным сигналам* и называют *радиосигналом*. Без модуляции НЧ-сигналы, отражающие сообщения разных отправителей, мешали бы друг другу из-за перекрытия их спектров. Модуляция позволяет отвести каждому отправителю сообщений индивидуальную полосу частот в соответствующем диапазоне волн. Образно говоря, модулятор «записывает»

передаваемое сообщение в изменениях параметров несущего колебания (радиоволны). ВЧ-колебания излучаются антенной в пространство, где распространяются в направлении приемника.

ВЧ-сигналы, улавливаемые приемной антенной, поступают в приемник, структура которого является зеркальным отражением структуры передатчика. Сигнал проходит через узлы, в обратном порядке осуществляющие преобразования, т.е. обратные по отношению к тем, что проводились в передатчике. Приемная антенна улавливает очень малую долю энергии, излученной передающей антенной. Поэтому принятые антенной модулированные колебания после отфильтровывания их с помощью селективных (избирательных) цепей от помех и сигналов других радиостанций (цепи фильтрации на рисунке 4.24 для упрощения не показаны) подают на усилитель высокой частоты (УВЧ), обычно являющийся малошумящим усилителем. УВЧ, помимо усиления, селективирует (выделяет) полезный сигнал от совокупности многих радиосигналов и помех, одновременно поступающих на приемную антенну.

Важно отметить, что на всех этапах прохождения сигнала, несущего информацию от источника к приемнику, на него воздействуют помехи (шумы). Задачей приёмника является выделение полезного сигнала из смеси разных процессов. Поэтому приемное устройство один из наиболее ответственных и сложных элементов системы связи.

Усиление радиосигналов осуществляется и в последующих каскадах приемника. При этом непосредственное усиление сигнала используется крайне редко. Дело в том, что при переходе на прием другой станции требуется перестраивать избирательный усилитель, сохраняя высокую частотную селекцию (избирательность), т.е. выделять полезный сигнал из других сигналов и помех. Эта сама по себе нелегкая проблема становится чрезвычайно важной, когда требуется большое усиление и, следовательно, применение нескольких усилительных каскадов. Задача существенно упрощается, если в приёмнике используется *преобразователь частоты*, в котором разные несущие частоты сигналов, поступающих на вход его смесителя, преобразуются (точнее, переносятся) с помощью вспомогательного многочастотного генератора (гетеродина) в сигналы с одинаковой более низкой несущей частотой, называемой *промежуточной*. На выходе преобразователя частоты включают фильтр, который выделяет полезный сигнал. При этом дальнейшее усиление информационных сигналов происходит на одной частоте без перестройки схем в усилителе промежуточной частоты (УПЧ), который производит основное усиление в приемнике и улучшает селекцию по частоте полезного сигнала. Такой приемник называется *супергетеродинным*.

*Детектор*, или *демодулятор*, осуществляет процесс, обратный модуляции, – выделяет из принятого, усиленного и преобразованного модулированного ВЧ-колебания передаваемый сигнал. Основная задача детектирования – по возможности полное восстановление информации, содержащейся в модулирующем сигнале (искаженном при передаче помехой), поступившем с преобразователя частоты. Поэтому главное требование к детектору – точное воспроизведение формы передаваемого сигнала, чтобы он поступал к получателю неискаженным.

*Получатель сообщений* приемника преобразует электрический НЧ-сигнал детектора в форму информации, удобную для получателя. Как правило, источник первичных сообщений и оконечное устройство в структурную схему системы радиосвязи не включают.

**Цифровые (дискретные) системы радиосвязи.** Под *дискретной системой связи* понимают систему, в которой и передаваемый, и принимаемый сигнал является последовательностью дискретных символов. Типичным примером такой системы является телеграф, где и сообщение, и сигнал является последовательностью точек, тире и промежутков между ними. Импульсные методы модуляции интенсивно развивались с начала 40-х гг. XX в. в связи с развитием радиолокации, однако импульсно-кодовая модуляция (ИКМ) не находила широкого практического применения ввиду громоздкости цифрового оборудования до появления в 1959 г. компьютеров второго поколения, использующих в качестве активной элементной базы транзисторы [7].

Чаще всего кодирование здесь сводится к записи номера уровня в двоичной системе счисления, т.е. в случае применения ИКМ дискретные значения непрерывного сигнала передаются в виде кодовых комбинаций «1» и «0», иначе говоря, двоичным кодом. В дальнейшем будем рассматривать в основном цифровые системы, в которых непрерывное сообщение преобразовано в последовательность кодовых комбинаций, составленных из двоичных символов. Начало связано с ИКМ, а именно с системами цифровой телефонии на основе кабельных (медных) сетей связи, применяемых для передачи голоса.

В качестве переносчика первичного сигнала в цифровых системах радиосвязи используют периодическую последовательность видео- и радиоимпульсов. Упрощенная структурная схема современного радиоканала цифровой (дискретной) системы связи показана на рисунке 4.25, где для наглядности и лучшего понимания изображены эпюры сигналов в ряде ее характерных точек. В подобных системах вместо генераторов несущих частот используют синтезаторы частот.

Непрерывные сообщения можно передавать по дискретным (цифровым) радиоканалам. Для этого их преобразуют в цифровую форму с помощью операций дискретизации по времени, квантования по уровню и кодирования или оцифровки.

Методы дискретизации и квантования в последнее время стали называть *форматированием* и *кодированием* источника.

Процесс форматирования преобразовывает исходную информацию в цифровую форму, обеспечивая таким образом совместимость информации и функций обработки сигналов с системой цифровой связи. С этого момента передаваемый первичный сигнал представляется цифровым кодом или потоком битов – некоей последовательностью стандартных импульсов («единиц») и пауз («нулей») обычно одинаковой длительности. Помимо форматирования применяется сжатие данных, и этот процесс относят к кодированию источника.

Кодирование источника (source coding) – преобразование аналогового сигнала в цифровой для аналоговых источников и удаление избыточности в передаваемой информации. В передающем устройстве цифровой системы радиосвязи кодирование



передаваемого сигнала выполняется современной цифровой логической микросхемой, называемой *кодером*.

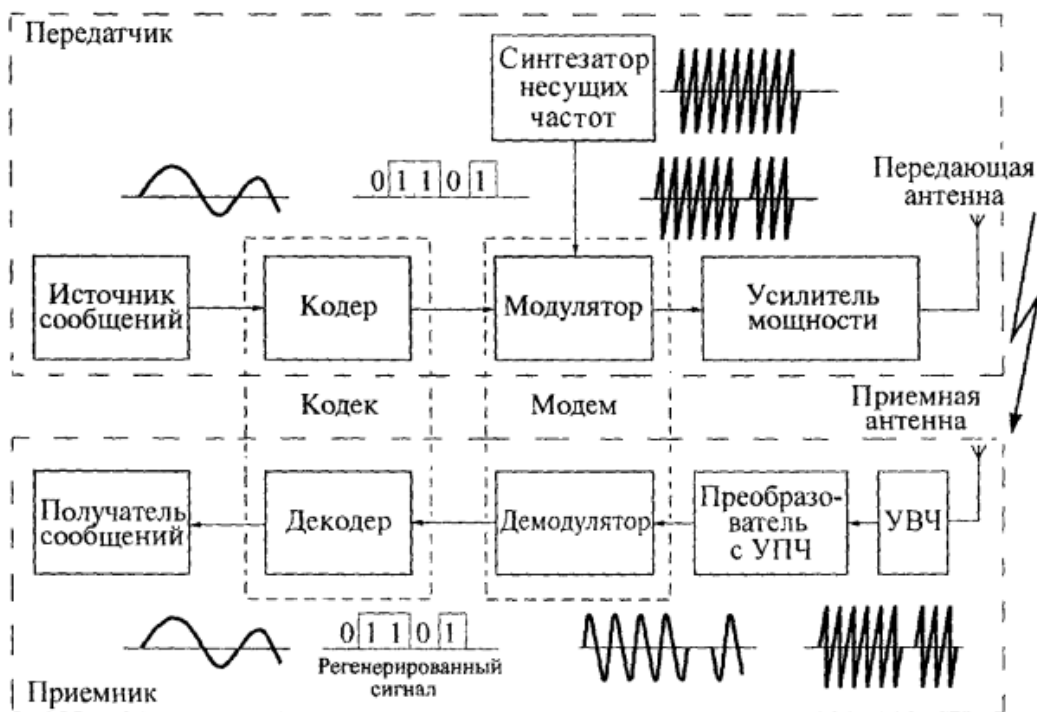


Рисунок 4.25 – Упрощённая структурная схема радиоканала цифровой системы связи

Следующий этап передачи сообщений – *помехоустойчивое кодирование*. Идея помехоустойчивого кодирования заключается в том, что к передаваемому сообщению добавляют избыточные неинформативные символы. Эти избыточные символы связаны определенными математическими соотношениями с символами сообщения. Цель внесения избыточности – сделать кодированные сообщения как можно больше отличающимися друг от друга, чтобы обеспечить исправление на приемной стороне всех или некоторых ошибок, возникших в процессе передачи. После применения помехоустойчивого кода сообщение поступает в модулятор. Цифровое сообщение в модуляторе радиопередатчика преобразуется в аналоговый модулированный сигнал, занимающий заданную полосу частот. Для этого несущее колебание модулируют полученной в кодере импульсной последовательностью. Чаще всего в цифровых системах связи используют ИКМ.

Итак, в цифровой системе передачи информации превращение сообщения в радиосигнал осуществляется тремя операциями: преобразованием, кодированием и модуляцией (в аналоговой системе двумя – преобразованием и модуляцией). Отметим, что кодирование определяет математическую сторону, а модуляция – физическую сторону превращения сообщения в радиосигнал. По существу, кодирование

представляет преобразование передаваемого сообщения в последовательность кодовых символов, а модуляция – преобразование этих символов в сигналы, пригодные для передачи по цифровому каналу. Фактически, с помощью кодирования и модуляции источник сообщений согласуется с каналом связи.

В приемнике после усиления на радиочастоте в УВЧ, преобразования частоты и усиления в преобразователе с УПЧ из сигнала промежуточной частоты (принятого вторичного сигнала) с помощью демодулятора извлекается и регенерируется (восстанавливается) последовательность кодовых символов (первичный сигнал). Затем производится декодирование их в *декодере*. Процесс *декодирования* состоит в восстановлении переданного сообщения по принимаемым кодовым символам. С выхода декодера восстановленный аналоговый сигнал поступает к *получателю сообщений*.

### Радиоприемные устройства

**Обобщенная структурная схема**, отражающая основные функции РПрУ, показана на рисунке 4.26. Она содержит шесть функциональных узлов-трактов [7]:

- антенну (А);
- усилительно-преобразовательный тракт (УТ);
- информационный тракт (ИТ);
- тракт адаптации, управления и контроля (ТАУК);
- гетеродинный тракт (ГТ);
- опорный генератор (ОГ).

Электромагнитные волны (ЭВ) принимаются антенной и в виде радиосигнала поступают в усилительно-преобразовательный тракт.

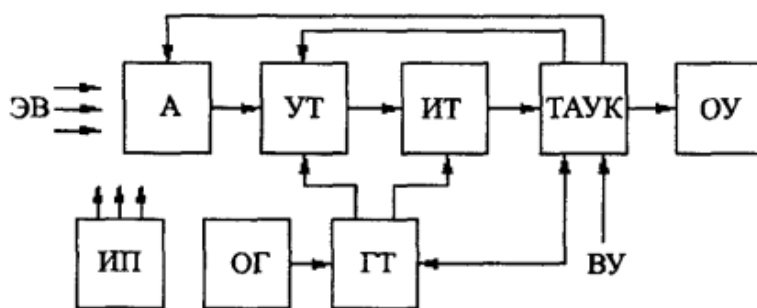


Рисунок 4.26 – Обобщенная структурная схема приемника

УТ производит выделение полезного сигнала из совокупности поступающих от антенны сигналов и помех, не совпадающих с ним по частоте, и усиление этого сигнала до уровня, необходимого для нормальной работы следующих каскадов. Хотя в УТ с сигналом производятся определенные нелинейные операции (усиление по высокой частоте, смещение спектра, ограничение амплитуды и др.), в принимаемую информацию указанный тракт существенных искажений не вносит и в этом смысле его можно считать практически линейным.

В информационном тракте осуществляется основная обработка принятого радиосигнала с целью выделения содержащейся в нем информации (демодуляция и ослабление мешающего воздействия помех). Важнейшей задачей приемника является выделение информации с максимальной достоверностью – так называемый *оптимальный прием*. Для этого в состав ИТ включают оптимальный фильтр, цепи последетекторной обработки, следящие системы частотной и фазовой автоматической подстройки, используемые для детектирования сигнала, а также для его поиска и сопровождения по частоте, фазе и временной задержке.

Гетеродинный тракт преобразует частоту собственного или внешнего ОГ и формирует сетку частот, необходимую для работы преобразователей частоты в УТ, следящих систем и устройств обработки сигнала в ИТ. Обычно это синтезатор частот, обеспечивающий работу всего приемника.

С помощью ТАУК осуществляют ручное, дистанционное и автоматизированное управление режимом работы приемного устройства (включение и выключение, поиск и выбор сигнала, адаптацию к изменяющимся условиям работы и т.д.). При этом качество его работы отражается на соответствующих индикаторах. Для внешнего управления (ВУ) приемником ТАУК подводятся соответствующие сигналы управления.

Дальнейшее преобразование сигнала зависит от особенностей применения РПрУ. Если, например, приемник предназначен для многоканальной радиосвязи, то продетектированный и усиленный сигнал подводится к оконечному устройству (ОУ), в котором происходит разделение сигналов по отдельным каналам и, если требуется, дополнительная их обработка. В оконечном устройстве энергия выделяемого сигнала используется для получения требуемого выходного эффекта – акустического (телефон, громкоговоритель), оптического (кинескоп, дисплей), механического (печатающее устройство или электромеханический привод).

Источник питания (ИП) обеспечивает постоянным током все узлы приемника. В ИП может осуществляться преобразование (повышение или понижение) напряжения, выпрямление, фильтрация, стабилизация.

Структурная схема на рисунке 4.26 является наиболее общей, однако в конкретных РПрУ отдельные связи между трактами и даже некоторые тракты могут отсутствовать или выполнять ограниченный набор функций, при этом упрощение структурной схемы приемного устройства и ограничение некоторых функций отдельных трактов снижают полноту реализации возможностей радиоприема.

По особенностям построения схем РПрУ можно условно разделить на две основные группы: приемники прямого усиления и супергетеродинные приемники (рисунок 4.27). Первые делят на приемники прямого усиления без регенерации и приемники прямого усиления с регенерацией. Иногда создают свержегенеративные приемники. Более полная классификация РПрУ по способу построения линейного тракта приведена на рисунке 4.28.

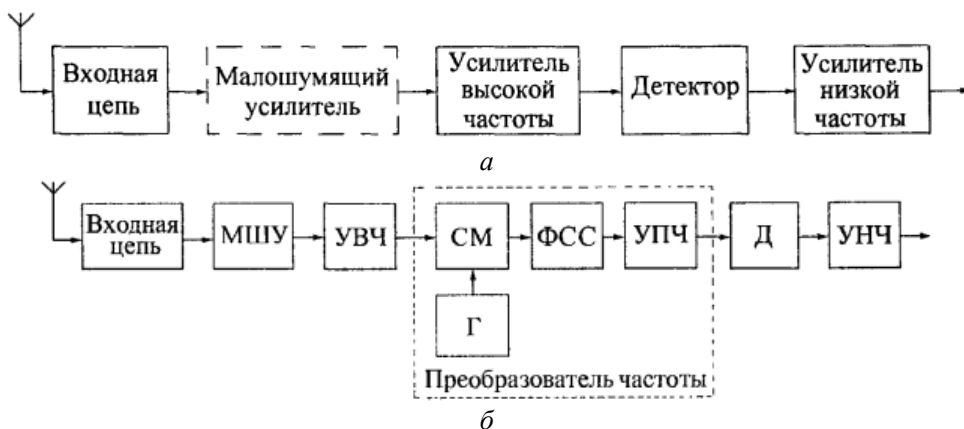


Рисунок 4.27 – Структурные схемы радиоприемных устройств:  
 а – прямого усиления; б – супергетеродинного

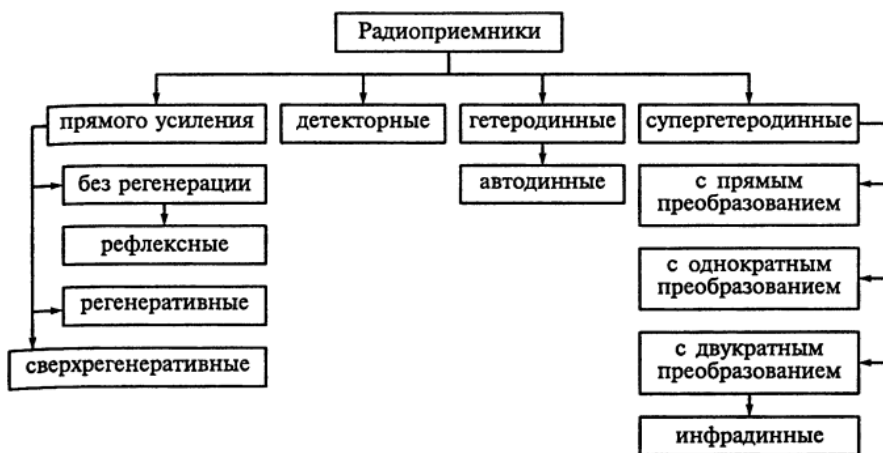


Рисунок 4.28 – Классификация радиоприемных устройств по способу построения линейного тракта приемника

**Тенденции и перспективы развития радиоприемных устройств.** В современной технике радиоприема достигнут значительный прогресс, обусловленный интенсивным внедрением аналоговой и цифровой микросхемотехники. Имеющиеся сейчас микросхемы дают возможность разрабатывать приемники с высокой чувствительностью, лучшей избирательностью по зеркальному каналу, меньшими частотными и нелинейными искажениями, а также позволяют решить ряд проблем принципиально новыми путями. В частности, микропроцессоры обеспечивают оптимальное качество приёма в условиях помех, управление автопоиском, электронную память десятков радиостанций, коммутацию программ, работу таймера, включающего и выключающего приёмник по заданной программе, т.е. программное управление. Используется цифровая настройка (нажатием цифровых кнопок) и обзорная: приёмник «просматривает» диапазон до получения команды «стоп», после чего фиксирует настройку и следит за станцией, обеспечивая в случае

необходимости нужную подстройку усиления и частоты с помощью автоматической регулировки уровня (АРУ) и автоподстройки частоты гетеродина (АПЧ), переключение тракта усилителя промежуточной частоты на более узкую полосу при появлении помехи по соседнему каналу, переключает регулятор тембра [7].

Развивается цифровое радиовещание. Цифровая система передачи звука работает в системах спутниковой связи и спутникового радиовещания, а также используется для цифровой звукозаписи. Цифровое вещание может обеспечить практически неискаженное воспроизведение звука: полосу воспроизводимых частот 5–20 000 Гц, коэффициент нелинейных искажений менее 90 дБ, практически полное отсутствие внешних помех, а также осуществить стереофоническое вещание. Недостатком линий цифрового вещания является широкая полоса частот – порядка 8 МГц, занимаемая одной радиостанцией, что определяет диапазоны несущих частот цифрового вещания. Цифровое радиовещание позволяет просто реализовать вывод информации на дисплей, режим повтора, запоминание сообщений и т.д.

В последнее время приемники с цифровой обработкой принимаемого сигнала в основном строились по смешанной схеме, в которой на цифровых микросхемах реализованы лишь отдельные узлы: детекторы, фильтры, синтезаторы частоты и т.д. В новейших и перспективных разработках приёмников используют в основном цифровую технику. Упрощённая структурная схема современного цифрового SDR-приемника (software defined radio, программно определяемое радио) показана на рисунке 4.29 [7, 15].

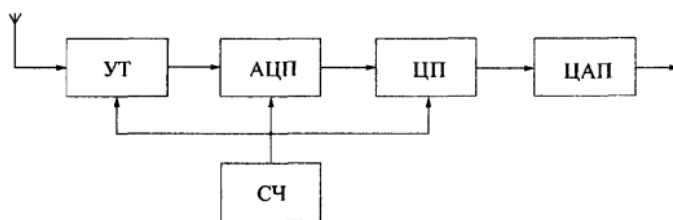


Рисунок 4.29 – Упрощённая структурная схема цифрового SDR-приемника

Усилительный тракт (УТ) приемника выполнен на аналоговых элементах и производит предварительную частотную фильтрацию принятого сигнала, усиление и преобразование его частоты. АЦП преобразует аналоговый сигнал в цифровой код, который подается на цифровой приемник.

Последний представляет собой цифровой процессор (ЦП), осуществляющий цифровую обработку принятого сигнала по заданному алгоритму. Такой алгоритм включает поиск сигнала по диапазону, дополнительное преобразование частоты, фильтрацию, детектирование и т.д. Если необходим сигнал в аналоговой форме, то на выходе приёмника включается ЦАП. Перестройка приемника по различным каналам производится с помощью синтезатора частоты (СЧ). Управление работой и регулировку новейших приёмников выполняют с помощью микропроцессоров.

Сейчас все большее внимание уделяется использованию в бытовой радиоаппаратуре систем управления и оповещения человеческим голосом (голосовой интерфейс). Использование команд оператора подтверждается синтезированным человеческим голосом. Сигнал управления превращается в цифровую форму и поступает в микропроцессор управления. Решение многих проблем ближайшего периода развития приемников будет зависеть в основном от разработки новых интегральных схем, а также от внедрения цифровой техники во все узлы радиосистем.

### Радиопередающие устройства

**Обобщенная структурная схема.** Структурная схема современного передатчика (рисунок 4.30) состоит:

- из источника кодированного сообщения, которое требуется передать;
- задающего генератора частоты (ЗГ), создающего высокостабильное гармоническое колебание сравнительно низкой частоты;
- синтезатора сетки несущих частот;
- модулятора;
- усилителя мощности (УМ), который увеличивает мощность промодулированной несущей за счет внешнего источника энергии;
- выходной (согласующей) цепи и антенны.

Источник питания и рамку обычно не показывают на структурных электрических схемах.

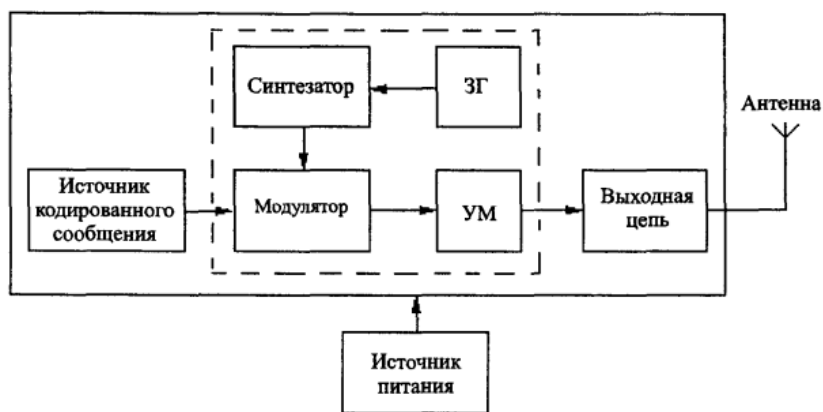


Рисунок 4.30 – Обобщенная структурная схема современного передатчика

**Тенденции и перспективы развития радиопередающих устройств.** Большинство каскадов современных передатчиков выполняют только на цифровых и аналоговых микросхемах. Электронные (мощные усилительные лампы) и дискретные полупроводниковые приборы (в основном полевые транзисторы) используют лишь в выходных каскадах усилителей передатчиков большой и сверхбольшой мощности.

Если передатчик работает на одной фиксированной частоте, задающий генератор содержит соединенные последовательно маломощный высокостабильный кварцевый автогенератор и несколько усилительных каскадов. Когда число рабочих частот передатчика не более десяти, в тракте возбуждителя используют несколько кварцевых автогенераторов или один автогенератор с переключающимися кварцевыми резонаторами. В настоящее время в качестве задающих генераторов возбуждителя в основном применяют цифровые синтезаторы частот. Высокостабильные задающие генераторы на основе синтезаторов частот могут работать в диапазоне 100–200 МГц. Изготовление передатчиков с кварцами на более высокие частоты связано с серьезными технологическими проблемами.

Применение умножителей частоты в трактах радиопередатчиков позволяет и в диапазоне СВЧ 1–100 ГГц получать колебания, стабильность которых теоретически определяется кварцевым резонатором задающего генератора. В передатчиках низкочастотного диапазона обычно используются транзисторные умножители частоты, однако с увеличением несущей частоты и переходом в область СВЧ параметры транзисторных умножителей частоты и усилителей мощности заметно ухудшаются. Поэтому в выходных каскадах передатчиков выгодно применять варакторные умножители частоты. Наиболее важными показателями умножителей частоты, применяемых в радиопередающих устройствах, являются коэффициент умножения, выходная колебательная мощность, коэффициент гармоник и КПД.

Требуемые уровни выходной мощности передатчиков современных систем передачи информации в некоторых случаях на три-пять порядков превышают максимальную мощность, генерируемую электронными приборами. Этот разрыв между мощностью радиопередатчика и мощностью единичного генератора стал особенно ощутим при переходе к полупроводниковым приборам.

Вместе с тем необходимая мощность СВЧ-передатчиков в непрерывном режиме работы достигает нескольких киловатт. Но даже в СВЧ-передатчиках мощностью в десятки ватт мощность полупроводникового прибора во многих случаях оказывается меньше в несколько раз. В этих случаях требуемые уровни выходной мощности передатчиков получают методами сложения мощностей нескольких идентичных полупроводниковых узлов выходных каскадов.

Известны три основных способа суммирования мощностей однотипных генераторов (рисунок 4.31):

- с помощью многополюсных сумматоров;
- путем сложения сигналов в пространстве с помощью фазированных антенных решеток (ФАР);
- в общем резонаторе.

При первом способе к специальному многополюсному сумматору параллельно подключают большое число однотипных синхронизированных через делитель мощности входного сигнала генераторов (или усилителей мощности), мощность сигналов которых поступает в общий выходной сигнал, связанный с нагрузкой (рисунок 4.31,а). Однако при этом ухудшается устойчивость усилительных каскадов, а выходная мощность передатчика оказывается заметно ниже их суммарной

мощности. Повышение выходной мощности передатчика в нагрузке и взаимную развязку генераторов (усилителей) обеспечивают мостовыми схемами сложения мощностей. В таких сумматорах каждый активный прибор работает самостоятельно на оптимальную для него нагрузку, а режимы работы всех каскадов не зависят друг от друга. При этом повышается надежность работы передатчика, поскольку выход из строя одного из нескольких усилительных каскадов лишь снижает мощность в передающей антенне.

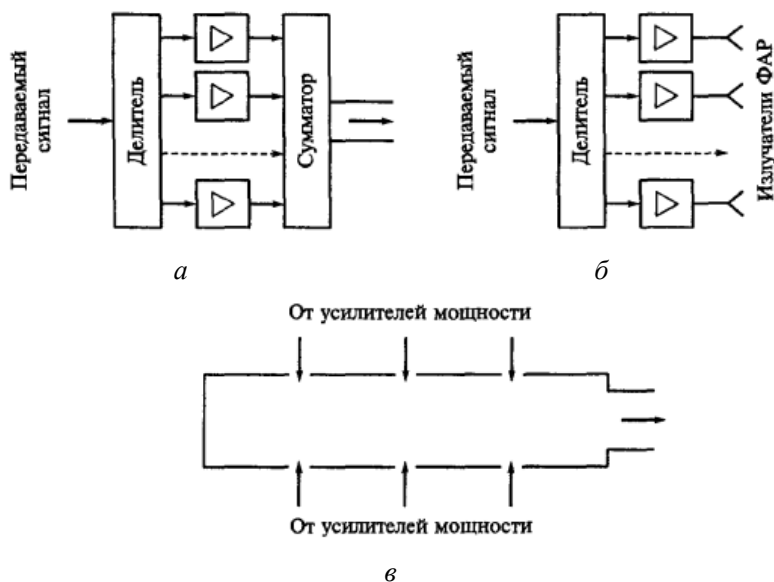


Рисунок 4.31 – Методы суммирования мощностей в передатчиках радиосистем:  
*а* – с помощью многополюсных сумматоров; *б* – путем сложения сигналов с помощью ФАР; *в* – в общем резонаторе

При втором способе сложение мощностей колебаний происходит в пространстве с помощью ФАР, состоящей из большого числа определенным образом ориентированных элементарных излучателей, каждый из которых возбуждается от самостоятельного усилителя мощности или генератора (рисунок 4.31,б). Все сигналы, подводимые к излучателям, идентичны, за исключением значений начальных фаз, связанных между собой определенным законом. Излучатели располагают так, чтобы электромагнитная связь между ними была слабой. Если сигналы излучателей сформированы соответствующим образом, то мощность, излучаемая ФАР, складывается в пространстве и практически равна сумме мощностей всех усилителей мощности. При этом возникает задача по стабилизации и синхронному управлению фронтом фаз ряда сигналов одинаковой структуры.

При третьем способе суммирования сигналы усилителей мощности (генераторов) подводятся к общей колебательной системе (в СВЧ-диапазоне это объёмный резонатор), где и происходит их сложение (рисунок 4.31,в).



Первый способ сложения мощностей позволяет увеличить мощность радиопередатчика по отношению к мощности одного усилительного прибора на 15–20 дБ, второй – на 30–40 дБ, третий – на 10–15 дБ. Все способы существенно повышают:

1) надежность радиопередатчика, поскольку отказ одного из усилителей мощности приводит только к снижению суммарной выходной мощности;

2) устойчивость работы усилительного тракта, так как сумматоры улучшают развязку между каскадами.

При суммировании мощностей улучшаются условия охлаждения полупроводниковых приборов, располагаемых на большой поверхности.

### Радиолокационные системы

**Структурная схема и принцип работы.** На рисунке 4.32,*а* показана структурная схема активной РЛС, способной обнаруживать объекты и измерять дальность их расположения от пункта обнаружения. Основными устройствами импульсной РЛС являются: генератор импульсов, передатчик, состоящий из генератора несущей частоты и модулятора, антенный переключатель (АП), остронаправленная антенна, приемник и измеритель. Принцип действия импульсной РЛС поясняется с помощью упрощенных временных диаграмм, показанных на рисунке 4.32,*б*.

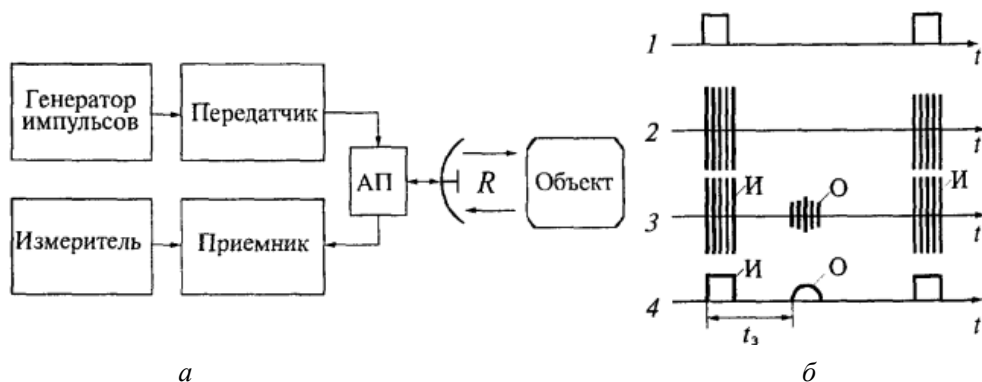


Рисунок 4.32 – Импульсная радиолокационная система:

*а* – структурная схема; *б* – упрощенные временные диаграммы

Генератор импульсов вырабатывает достаточно короткие (доли или единицы микросекунд) импульсы (1 на рисунке 4.32,*б*), которые определяют частоту посылок радиосигналов РЛС. Эти импульсы поступают на передатчик и измеритель. В передатчике с помощью модулятора из несущего колебания формируются высокочастотные импульсы 2 (осуществляется импульсная модуляция), называемые *радиоимпульсами*, которые излучаются в окружающее пространство. Антенный переключатель подключает антенну к передатчику во время излучения радиоимпульсов и к приемнику в интервалах между ними.

Отражённые от объекта и уловленные антенной РЛС радиоимпульсы 3 попадают в приемник. Отраженные радиоимпульсы располагаются в интервалах между

излученными импульсами (соответственно О и И на рисунке 4.32,б), небольшая часть мощности которых через антенный переключатель также проникает в приемник. После усиления и детектирования в приемнике отраженные импульсы 4 поступают в измеритель. Сравнение в измерителе отраженного импульса с его излученной копией, поступающей от генератора импульсов, позволяет получить информацию об объекте. В частности, дальность до обнаруженного объекта определяется по времени задержки излученного сигнала в соответствии с формулой  $R = ct_s / 2$ .

Работают РЛС обычно в диапазонах метровых, дециметровых, сантиметровых и миллиметровых волн, так как в этом случае удается создать узкие (игольчатые) диаграммы направленности при приемлемых габаритных размерах антенн.

В настоящее время принцип действия множества РЛС основан на эффекте Доплера (в 1842 г. К. Допплером установлена зависимость частоты звуковых и световых колебаний от взаимного движения источника и наблюдателя).

**Перспективы развития.** Развитие современных РЛС зависит от прогресса науки и техники. К основным перспективным направлениям развития РЛС относятся совершенствование антенных систем, приемопередающих устройств, систем первичной, вторичной и третичной обработки информации и помехозащиты, систем автоматического распознавания целей, средств отображения информации.

Современные антенные системы представляют собой активные и полуактивные приемопередающие фазированные антенные решетки с одно- и двухмерным управлением, многодиапазонные приемопередающие ФАР, цифровые ФАР и адаптивные ФАР. Применение ФАР позволяет отказаться от инерционных механических устройств (редукторов), управляющих ориентацией диаграммы направленности антенны, в пользу режима электронного сканирования пространства антенным лучом.

Совершенствование приемопередающих модулей заключается в использовании цифровых формирователей ансамблей сигналов, твердотельных генераторов и усилителей, заменяющих массивные и габаритные электровакуумные приборы. Это приводит к существенному уменьшению массогабаритных показателей аппаратуры РЛС. Активно осваивается терагерцовый диапазон электромагнитных волн, приближенный к оптическому диапазону. В перспективных РЛС теперь сочетается работа в классическом радиодиапазоне с работой в околооптическом диапазоне в режиме реального времени. Начало существованию подобных РЛС положила новая научно-техническая отрасль радиолокации, называемая радиофотоникой.

В системах обработки информации и помехозащиты активно используются быстродействующие программируемые сигнальные и оптоэлектронные процессоры, применяются нейрокомпьютерные технологии.

В целом рабочее место диспетчера или оператора РЛС в настоящее время является автоматизированным. Активно внедряются системы искусственного интеллекта, помогающие оператору принимать решения в особо сложных помеховых условиях.

Совершенствуются и дополнительные подсистемы РЛС. Так, для автоматического свертывания и развертывания антенной системы используются робототехнические устройства. В военных РЛС используется аппаратура защиты от высокоточного оружия (ВТО): система увода ВТО, система поражения ВТО, система выключения и увода, системы снижения заметности в видимом, ИК и радиодиапазонах. Для обработки радиолокационных изображений используются быстродействующие и высокопроизводительные спецпроцессоры для адаптивного управления в реальном масштабе времени. В качестве источников электропитания используются нетрадиционные источники питания, бестрансформаторные источники питания. В современные РЛС встраиваются автоматизированные системы контроля (диагностики), поиска повреждений и восстановления работоспособности. Работа РЛС синхронизируется с работой надсистемы, которой является спутниковая радионавигационная система, что позволяет улучшить достоверность и точность предоставляемой информации.

### Информационно-измерительные системы

**Структурная электрическая схема.** В самом общем случае можно считать, что ИС состоит из трёх основных подсистем (рисунок 4.33) [16]:

– преобразователя неэлектрической или электрической физической величины в электрическую величину. Ядром этого преобразователя является датчик, который выдает сигнал, количественно связанный с измеряемой величиной. Такие элементы получают информацию об измеряемом объекте и преобразуют её в вид, доступный остальным частям ИС, с целью получения количественного значения измеряемой величины;

– преобразователя сигнала, который получает сигнал от датчика и преобразует его в соответствии с требованиями блока отображения информации ИС или блока системы управления. Преобразователь сигналов может состоять в свою очередь из трех компонентов: формирователя сигналов, который преобразует сигнал от датчика в физический вид, удобный для отображения; сигнального процессора, который улучшает качество сигнала, например усиливает его, и передатчика сигнала для передачи этого сигнала на некоторое расстояние до устройства отображения;

– устройства отображения информации – средства, на котором отображается выходная информация ИС. Этот компонент получает информацию от преобразователя сигналов и представляет её в виде, который человек может идентифицировать, например в виде стрелочного указателя, перемещающегося по шкале.



Рисунок 4.33 – Общий вид измерительной системы

Датчик – это устройство, которое, подвергаясь воздействию физической измеряемой величины, выдает эквивалентный сигнал, обычно электрической природы (заряд, ток, напряжение или импеданс), являющийся функцией измеряемой величины [17]:

$$s = F(m),$$

где  $s$  – выходная величина датчика;  $m$  – входная величина (рисунок 4.34).

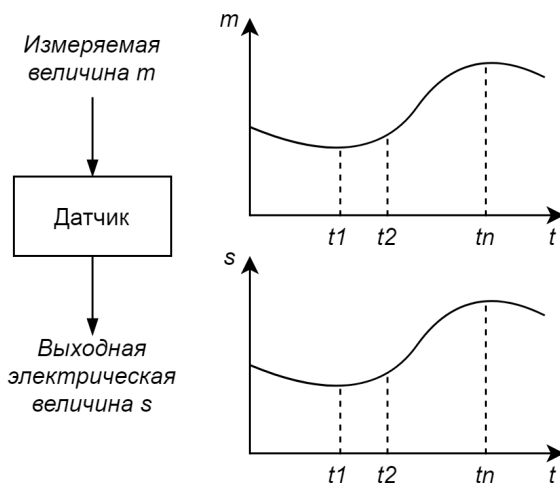


Рисунок 4.34 – Пример изменения во времени измеряемой величины  $m$  и соответствующей реакции  $s$  датчика

Измерив значение  $s$ , можно определить значение  $m$  (рисунок 4.35). Соотношение  $s = F(m)$  выражает в общей теоретической форме физические законы, положенные в основу работы датчиков. Выраженные численно, эти законы определяют выбор конструкций (геометрии, размеров) и материалов для изготовления датчиков, допустимые характеристики окружающей среды, при которых они могут работать, и условия применения. Для всех датчиков характеристика преобразования – соотношение  $s = F(m)$  – в численной форме определяется экспериментально в результате градуировки, при проведении которой для ряда точно известных значений  $m$  измеряют соответствующие значения  $s$ , что позволяет построить градуировочную кривую (рисунок 4.35,а). Из этой кривой для всех полученных в результате измерения значений  $s$  можно найти соответствующие значения искомой величины  $m$  (рисунок 4.35,б).

Для удобства измерений датчик стараются построить или, по крайней мере, использовать таким образом, чтобы существовала линейная зависимость между малыми приращениями выходной  $\Delta s$  и входной  $\Delta m$  величин:

$$\Delta s = S \Delta m,$$

где  $S$  – чувствительность датчика.

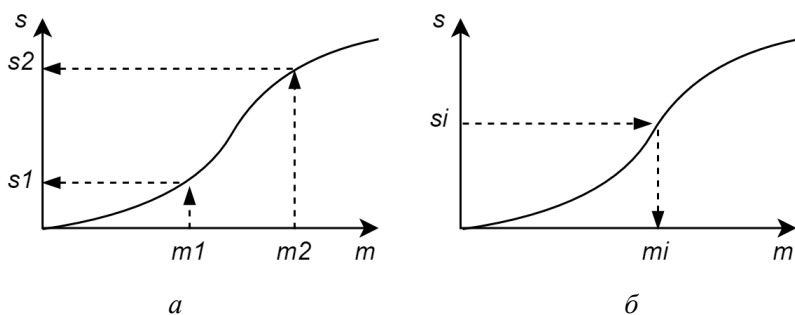


Рисунок 4.35 – Градуировочные характеристики датчика:

$a$  – получение градуировочной кривой по известным значениям измеряемой величины  $m$ ;  $b$  – использование градуировочной кривой для определения  $m$

Датчик в зависимости от вида сигнала на его выходе может быть активным – генератором, выдающим заряд, напряжение или ток, либо пассивным, с выходным сопротивлением, индуктивностью или емкостью, изменяющимися соответственно входной величине. Отсюда датчики подразделяются на генераторные и параметрические.

Различие между активными и пассивными датчиками обусловлено их эквивалентными электрическими схемами, отражающими фундаментальные отличия в природе используемых в датчиках физических явлений.

Электрический сигнал в широком смысле – это материальный носитель информации, в узком – переменная составляющая тока или напряжения, которая несет информацию, связанную с измеряемой величиной; амплитуда и частота сигнала должны быть непосредственно связаны с амплитудой и частотой измеряемой величины. Активный датчик является источником электрического сигнала, а измерение изменений параметров импеданса пассивного датчика производится косвенно, по изменению тока или напряжения в результате его обязательного включения в схему с внешним источником питания. Электрическая схема, непосредственно связанная с пассивным датчиком, формирует его сигнал, таким образом, совокупность датчика и этой электрической схемы является источником электрического сигнала.

Принцип действия активного датчика основан на том или ином физическом явлении, обеспечивающем преобразование измеряемой величины в электрическую форму энергии. Наиболее важные из этих физических явлений указаны в таблице 4.4.

Таблица 4.5 показывает виды физических величин входных и выходных сигналов для основных типов датчиков [16, 18].

В таблице 4.6 представлена классификация преобразователей по виду их входных и выходных сигналов [16, 18].

ИС, в основу которых входит микропроцессор, также называют программируемыми приборами [16]. Они служат для выполнения основных операций по обработке принимаемого сигнала. В простых приборах ИС может включать несколько датчиков, каждый из которых подсоединен к соответствующему преобразователю

сигналов. Оператор снимает показания каждого датчика, которые затем обрабатываются для получения значения измеряемой величины.

Таблица 4.4 – Физические эффекты, используемые для построения активных датчиков

Измеряемая величина	Используемый эффект	Выходная величина
Температура	Термоэлектрический эффект	Напряжение
Поток оптического излучения	Пироэлектрический эффект	Заряд
	Внешний фотоэффект	Ток
	Внутренний фотоэффект в полупроводнике с <i>p-n</i> -переходом	Напряжение
	Фотоэлектромагнитный эффект	Напряжение
Сила, давление, ускорение	Пьезоэлектрический эффект	Заряд
Скорость	Электромагнитная индукция	Напряжение
Перемещение	Эффект Холла	Напряжение

Таблица 4.5 – Виды физических величин входных и выходных сигналов для основных типов датчиков

Входной сигнал	Выходной сигнал
Ускорение	Заряд
Переменная разность потенциалов	Ультразвуковые волны
Угловое перемещение	Угловое перемещение
	Разница потенциалов
	Емкость
	Импульсы
Угловое положение	Импульсы
Угловая скорость	Импульсы/ЭДС переменного тока
Плотность	Частота
Перемещение	Емкость
	Индуктивность
	Разность индуктивности
	Разность потенциалов
	Давление
Расход жидкости	Импульсы/ЭДС переменного тока
	Давление
Скорость потока жидкости	Сопротивление
Сила	Заряд
	Перемещение
	Частота
	Сопротивление
Интенсивность света	Ток
	Разность потенциалов
	Сопротивление
Уровень жидкости	Емкость
Водородный показатель pH	Разница потенциалов

Окончание таблицы 4.5

Входной сигнал	Выходной сигнал
Давление	Емкость
	Заряд
	Перемещение
Деформация	Сопротивление
Температура	ЭДС
	Сопротивление
Вибрация	Заряд

Таблица 4.6 – Преобразователи сигналов

Входной сигнал	Выходной сигнал
Переменный ток или напряжение	Постоянный ток или напряжение
Переменное напряжение	Пропорционально уменьшенное переменное напряжение
	Модулированное напряжение
Аналоговый сигнал	Цифровой сигнал
	Выбранное и хранящееся значение
Угловое перемещение	Усиленное угловое перемещение
	Линейное перемещение
Емкость	Емкость/сопротивление/индуктивность
	Разность потенциалов
Заряд	Разность потенциалов
Ток	Масштабированный ток
Сигнал постоянного тока	Модулированный сигнал
Цифровой сигнал	Аналоговый сигнал
Перемещение	Усиленное перемещение
ЭДС	Линейное или угловое перемещение
Частоты	Частоты, полоса частот
Индуктивность	Емкость/сопротивление/индуктивность
	Разность потенциалов
Входы, многочисленные	Выбранный сигнал
Нелинейная разность потенциалов	Линейная разность потенциалов
Разность потенциалов	Линейное или угловое перемещение
	Усиленная разность потенциалов
	Пропорционально уменьшенная разность потенциалов
	Масштабированная разность потенциалов
Мощность	Масштабированная мощность
Сопротивление	Сопротивление
	Разность потенциалов
Термоэлектрическая ЭДС	Линейное или угловое перемещение

---

*Например, по результатам измерения температуры «сухим» и «влажным» термометром оператор вычисляет значение относительной влажности.*

---

---

*Другой пример: оператор корректирует полученные данные с учётом нелинейности.*

---

Таким образом, процесс получения значения измеряемой величины при использовании простых приборов может включать в себя такие процедуры, как арифметические операции с серией измерений, вычисления с использованием калибровочных коэффициентов, уточнение результатов измерений с учётом специальных факторов, например нелинейности. Можно сказать, что в этих случаях оператор является элементом системы обработки сигналов, необходимым для получения значения измеряемой величины. Микропроцессорные системы предназначены для исключения человека из процесса обработки сигналов, так как они могут снимать показания одновременно с нескольких датчиков или проводить опрос одного датчика заданное количество раз, обрабатывать принятые значения и выдавать полученное значение измеряемой величины прямо на выход системы. Кроме того, микропроцессорные системы могут выполнять ряд других задач, таких как преобразование данных в различные форматы, усреднение результатов, нахождение минимальных и максимальных значений, обработка данных от датчиков разных типов, проведение периодических калибровок, принятие решений по управлению ИС, основанных на полученных данных, и т.д.

Для иллюстрации приведем схему микропроцессорных товарных весов, где в качестве датчика используется динамометрический элемент (рисунок 4.36).

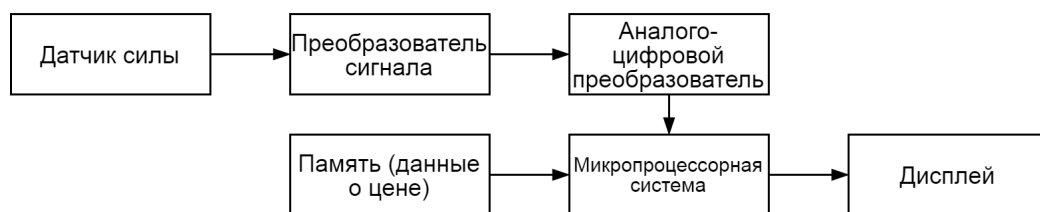


Рисунок 4.36 – Микропроцессорные товарные весы

Эти весы могут использоваться на контроле в супермаркетах для определения цены корзины яблок или любых других товаров. Информация о количестве проданного товара может одновременно поступать на склад, и при помощи такой обратной связи можно проводить мониторинг количества товаров.

Микропроцессор, управляющий весами, может иметь внутреннюю систему калибровки. Когда приходит команда произвести калибровку, на динамометрический элемент автоматически помещается стандартный груз и определяется его вес. Полученное значение сравнивается со значением точного веса, хранящегося в памяти системы, и если между этими значениями существует некоторое расхождение, оно учитывается для корректировки последующих взвешиваний.

Другой пример приведен на рисунке 4.37. Здесь показаны элементы микропроцессорной системы измерения температуры на основе термопары. Так как ЭДС



термопары не является линейной функцией температуры, то для получения значений измеренной температуры необходимо использовать специальные таблицы, переводящие ЭДС термопары в градусы. В этих таблицах считается, что холодный спай термопары находится при температуре 0 °С. Если это условие не выполняется, то необходимо производить корректировку полученных данных. Поэтому микропроцессор отслеживает измеряемую температуру по изменению ЭДС на горячем спае, а для контроля температуры холодного спая термопары используется термосопротивление. После преобразования сигналы от двух элементов поступают в микропроцессор, который производит вычисление значений измеряемой величины.

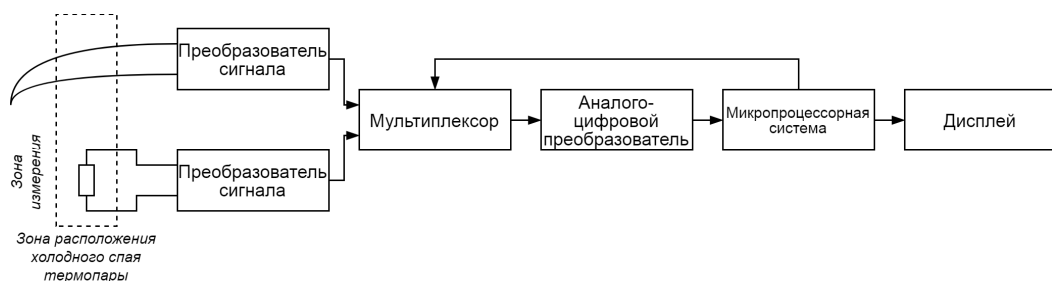


Рисунок 4.37 – Микропроцессорная система измерения температуры

Еще один пример применения микропроцессорных ИС – измерение относительной влажности воздуха. Здесь необходимо одновременно измерять температуру сухим и влажным термометром. Если обработка полученных данных ведется вручную, то после проведения измерений оператор ищет в таблицах два соответствующих значения, по которым и вычисляет значение относительной влажности. Очевидно, что прибор, способный сразу выдавать значения относительной влажности, должен быть микропроцессорным. На рисунке 4.38 показан один из вариантов такого прибора. Датчики температуры могут быть пьезоэлектрическими, например кварцевыми, у которых частота зависит от температуры. Таким образом, микропроцессор принимает два сигнала, по значениям которых, используя стандартные таблицы, вычисляет величину относительной влажности. На отображающее устройство могут выводиться, например, значения двух температур и относительной влажности.



Рисунок 4.38 – Микропроцессорная система измерения относительной влажности

Современные информационно-измерительные системы (рисунок 4.39) включают первичные датчики физических величин, которые устанавливаются на объекте измерения (датчики движения, давления, температуры, концентрации и т.д.), устройства усиления и нормализации сигналов датчиков, аналоговый мультиплексор (или коммутатор сигналов), который используется для поочередного подключения сигналов датчиков к АЦП через устройство выборки и хранения (УВХ) [19].

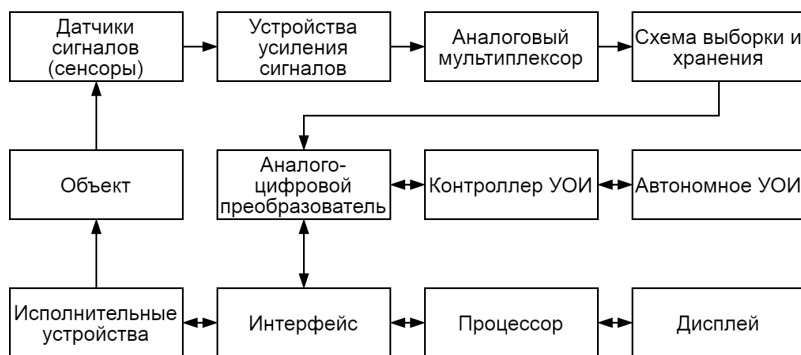


Рисунок 4.39 – Укрупнённая структурная схема информационно-управляющей системы

Оцифрованный сигнал с датчиков через интерфейс вводится в процессор или ЭВМ с необходимой периферией (дисплей, клавиатура и т.д.), обрабатывается по определённым алгоритмам, документируется и выдается в удобном виде пользователю (оператору) с помощью устройств отображения информации (УОИ). В автономных или специализированных измерительных приборах вместо ЭВМ могут использоваться более дешёвые контроллеры с автономными УОИ (ЖКИ-индикаторы, газоразрядные панели и т.д.).

Если эту структуру дополнить цифроаналоговыми преобразователями и исполнительными устройствами, то она становится информационно-управляющей системой (ИУС), которая управляет объектом по цепи обратной связи (ОС) согласно заданному алгоритму. Такая структура характерна для большинства автоматизированных систем управления технологическими процессами.

В сложных технических ИУС для обеспечения высокой надёжности необходимо применять большое количество датчиков для контроля физических величин.

---

*Например, в отечественной космической системе «Буран» использовалось около 3000 датчиков (25 % – датчики давления, 40 % – датчики температуры), в других изделиях авиационной и космической техники количество датчиков колеблется от 250 до 2000.*

*Комплексное автоматизированное оборудование для производства интегральных микросхем по КМОП-технологии с проектными нормами 0,5 мкм, поставленное в Россию фирмой Applied Materials в 2002 г., содержало около 1000 датчиков непосредственно в технологическом процессе и около 600 — в инженерном оборудовании, обеспечивающем техпроцесс*

*(очистка газов, воздуха, водоподготовка, терморегулирование, бесперебойное питание и т.п.).*

*В настоящее время, когда идет активная цифровизация практически любой деятельности человека в любой сфере, включая добычу и переработку сырья, производство объектов техносферы и т.п., массовое внедрение датчиков во все технологические объекты и процессы отражает смысл такой новой концепции, как цифровые двойники (а также цифровые тени), т.е. виртуального представления физического или технического объекта или системы на протяжении их жизненного цикла с использованием данных интеллектуальных датчиков в реальном времени<sup>3</sup> [19].*

---

Датчики как измерительные преобразователи, трансформирующие неэлектрические физические величины в электрические сигналы, стали важнейшими элементами ИИС и ИУС. Во многих случаях это сложные устройства, созданные с применением сигнальных процессоров. Именно они и УОИ в значительной степени определяют качество и стоимость ИИС и систем управления. Особенно перспективны по метрологическим и эксплуатационным характеристикам датчики, созданные по технологии микроэлектроники и микроэлектромеханических систем (МЭМС).

Не менее важна в измерительной технике и роль УОИ, которые обеспечивают эффективное взаимодействие оператора и вычислительных средств в ИУС и в определяющей степени влияют на процесс принятия решений. В этой области наблюдается невиданный прогресс на основе новых дисплейных технологий.

Для современного этапа развития ТС характерны следующие ориентировочные стоимостные оценки ИИС:

- датчики – 40 % общей стоимости ИИС;
- устройства обработки данных – 20 % стоимости ИИС;
- устройства регистрации и отображения информации – 40 % стоимости ИИС.

**Многоканальные ИИС.** Структурная схема такой ИИС (рисунок 4.40) состоит из  $n$  независимых измерительных каналов. Она обладает высокой надежностью, наиболее высоким быстродействием, возможностью подбора средств измерения к конкретным измерительным величинам. Недостаток: громоздкость, сложность, большая стоимость.

---

<sup>3</sup> В рамках технологии цифровых двойников (digital twin) для физического или технического объекта, единицы оборудования или целого процесса создается математическая модель, которая используется для анализа поведения объекта. Цифровая модель постоянно обновляется, чтобы максимально полно соответствовать текущему рабочему режиму реальной установки. Это дает возможность выявить непредусмотренные изменения в процессах, оптимизировать режимы работы оборудования, предотвращать поломки и аварии, что в итоге существенно повышает надежность и эффективность эксплуатации.

Цифровая копия пространств, активов, оборудования и процессов позволяет удаленно управлять объектами, эксплуатировать и устранять неполадки в системах дистанционно. По данным Eutech Cybernetics, компании могут сократить расходы более чем на 30 %, перейдя на интеллектуальную эксплуатацию и управление.

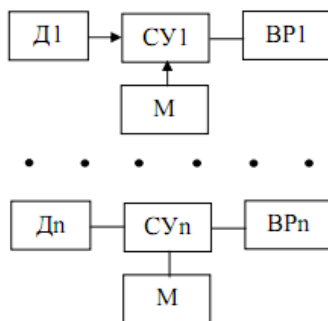


Рисунок 4.40 – Многоканальная информационно-измерительная система

**Сканирующие ИИС.** Схема сканирующей ИИС представлена на рисунке 4.41. Сканирующее устройство (Ск.У) последовательно во времени перемещает датчик в пространстве по заранее заданной программе (пассивное сканирование) либо программа может меняться в зависимости от условий, от полученной информации (активное сканирование).

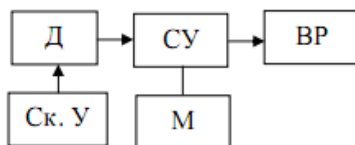


Рисунок 4.41 – Сканирующая информационно-измерительная система

Эти ИИС применяются для измерения величин, распределенных в пространстве (поля, температура, механические напряжения и т.д.).

Недостатком является малое быстродействие.

**Мультиплицированные ИИС.** Схема представлена на рисунке 4.42. Такая ИИС позволяет выполнить сравнение со всеми измеряемыми величинами без применения коммутирующего устройства. Обычно мера (М) вырабатывает линейно изменяющуюся величину. Например, используется ЦАП со ступенчато нарастающей величиной выходного напряжения. Эти системы имеют меньший аппаратный объем, чем параллельные системы, но достаточно высокое быстродействие.

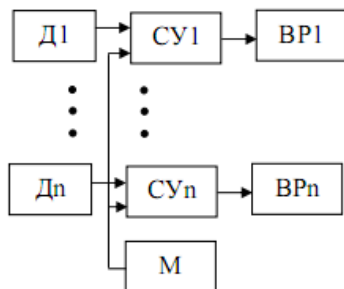


Рисунок 4.42 – Мультиплицированная информационно-измерительная система

**Многоточечные ИИС.** Эти системы (рисунок 4.43) применяются для исследования сложных объектов с большим числом измеряемых параметров. Измерительный коммутатор (ИК) последовательно подключает к сравнивающему устройству датчики, число которых может достигать нескольких тысяч. Возможно использование параллельно-последовательного принципа организации системы, наращивание числа измеряемых величин за счет коммутатора. Недостаток – меньшее быстродействие, чем у параллельных систем. Но эти системы имеют меньший аппаратный объем.

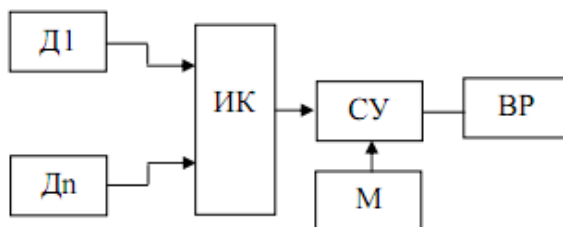


Рисунок 4.43 – Многоточечная информационно-измерительная система

Телеизмерительные системы (ТИС). ТИС осуществляют измерения на объектах, удаленных от места обработки информации (движущиеся объекты, объекты атомной энергетики, объекты, рассредоточенные на больших площадях, и т.д.). Особенностью ТИС является наличие канала связи, под которым понимается совокупность технических средств, необходимых для передачи информации от различных источников по линиям связи. Различают проводные линии связи, радиолнии и оптические линии. Основные характеристики канала связи – полоса пропускаемых частот (определяется видом канала и наличием помех) и принцип разделения каналов. Наиболее часто используют временное и частотное разделение каналов.

При временном разделении каналов передача информации от различных источников производится последовательно во времени с помощью коммутаторов. При частотном разделении возможна параллельная передача информации нескольких измерительных каналов с использованием для каждого канала своей полосы частот.

Наиболее распространены:

1) токовые ТИС, в которых сигнал передается по проводной линии связи постоянным током 0–5 мА. Используется временное разделение каналов. Дальность действия по воздушным линиям связи составляет 7–10 км, по кабелю – 20–25 км;

2) частотные ТИС, в которых информация заложена в частоте синусоидального или импульсного сигнала. Может передаваться как по проводным, так и по радиолниям связи. Разделение каналов частотное. Дальность действия сотни километров. Из-за перекрестных искажений и помех по соседнему каналу число одновременно передаваемых сообщений обычно не превышает нескольких десятков;

3) времяимпульсные ТИС, в которых информационным параметром является длительность импульсов постоянного тока или длительность интервалов между импульсами. Используется временное разделение каналов. Системы дальнего

действия работают с радиоканалом. При этом дальность действия составляет сотни и тысячи километров;

4) цифровые ТИС (кодоимпульсные), в которых информация передается в виде комбинации импульсов, т.е. кодовой комбинацией. Из-за помех применяются специальные коды – с обнаружением и исправлением ошибок. Достоинства: высокие метрологические характеристики и помехозащищенность, работа с различными линиями связи, возможность непосредственного ввода информации в ЭВМ. Недостатком является относительная сложность.

**Системы непрерывного автоматического контроля.** Структурная схема одного канала приведена на рисунке 4.44. Один канал содержит сравнивающие устройства  $СУ_1, \dots, СУ_n$ , устройство индикации отклонения  $ИО_1, \dots, ИО_n$ . Число этих устройств в канале определяется числом установленных границ измерения параметра. Таких границ (норм) может быть от одной до четырех: предупредительная «меньше», предупредительная «больше», аварийная «меньше», аварийная «больше». Устройство выработки и хранения норм  $N$  может быть общим для многих каналов или индивидуальным для отдельных каналов. Системы с непрерывным контролем требуют большого объема оборудования и поэтому применяются для контроля наиболее ответственных параметров.

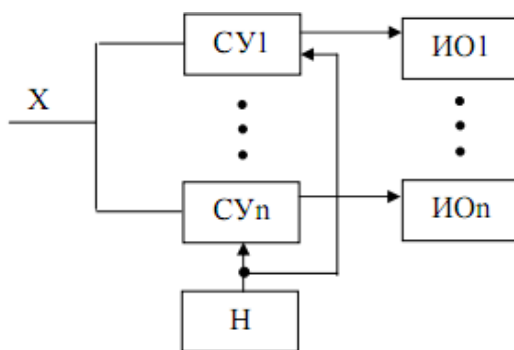


Рисунок 4.44 – Система непрерывного автоматического контроля

**Системы с дискретным контролем.** Структурная схема приведена на рисунке 4.45. Такая система требует меньше оборудования и её стоимость меньше. Контролируемые величины (чаще всего преобразованные в цифровые сигналы) через измерительный коммутатор ИК поочередно поступают на сравнивающее устройство СУ, где сравниваются с нормами. Изменение в случае необходимости норм и переключение ИК осуществляется устройством управления УУ. Индикатор ИНД отображает информацию о контролируемых параметрах.

Недостатком этих систем является избыточность операций контроля, так как частота контроля выбирается с учетом экстремальных динамических свойств контролируемых параметров. При недостатке сведений о динамических свойствах возможен пропуск аварийного состояния параметра вследствие ожидания обслуживания. Обычно выпускаемые промышленностью системы контроля являются

комбинированными, т.е. наиболее важные параметры контролируются непрерывно, а остальные – дискретно.

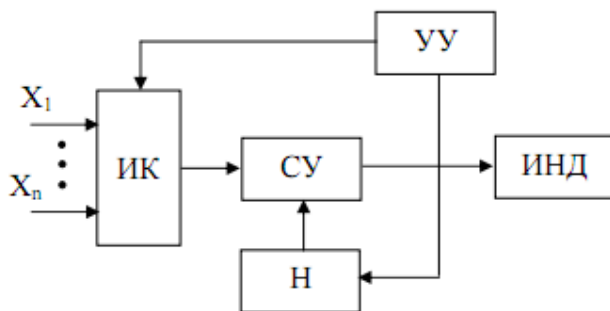


Рисунок 4.45 – Системы с дискретным контролем

**Перспективы развития.** Измерительные системы развиваются по следующим направлениям [20].

1. Использование новых физических явлений и свойств материалов для создания современных ИС, особенно первичных преобразователей (датчиков). В настоящее время известно более 3000 физических эффектов, однако при проектировании ИС используется лишь 300–400 из общего числа этих достижений. Значительное внимание уделяется оптоэлектронике.

2. Дальнейшее использование микропроцессорной техники для создания новых структур ИС, сочетающих рациональное распределение аппаратных и программных средств.

3. Создание ИС с текущей диагностикой и самоконтролем. Текущая диагностика и самоконтроль ИС во время их функционирования за счёт использования встроенных элементов является одним из ведущих направлений. Проблема применения методов встроенного контроля стоит при создании датчиков. Сущность методов проектирования таких датчиков заключается в том, что в состав ИС вносятся элементы, с помощью которых выполняется коррекция реальных функций преобразователей. Например, при измерении температуры такая коррекция осуществляется путём применения встроенных датчиков-калибраторов температуры.

4. Создание новых ИС с адаптацией. Это обусловлено изменениями решаемых задач, повышением качества и достоверности информации по измерению, контролю и диагностике. Задачи адаптации ИС наиболее эффективно могут быть решены за счет алгоритмических и программных средств, без обращения к аппаратному обеспечению ИС.

### Источники вторичного электропитания

**Структурные электрические схемы.** Если рассматривать ЭРЭС как систему, потребляющую электрическую энергию, то в общем виде она может быть представлена состоящей из трех частей: устройства (системы), источника электропи-

тания и нагрузки. Если ЭРЭС размещается на подвижном объекте, то в его состав входит также система автономного электроснабжения, которая преобразует различные виды энергии (механическую, тепловую, световую, химических реакций и др.) в электрическую. Система электропитания обеспечивает по заданной программе электропитанием все цепи электронного средства, а источники электропитания – отдельные цепи или самостоятельные приборы.

Системы и источники электропитания содержат функциональные узлы, которые в зависимости от назначения выполняют функции выпрямления, усиления, стабилизации, защиты, коммутации, сигнализации и др. В зависимости от качества выходного напряжения различают источники вторичного электропитания (ИВЭП) стабилизирующие и нестабилизирующие. Стабилизирующие ИВЭП обеспечивают постоянство выходного напряжения на заданном уровне при воздействии, например, изменений входного напряжения, выходного тока, температуры окружающей среды и др. Они имеют в своём составе функциональный узел, осуществляющий стабилизацию выходного напряжения. В нестабилизирующих ИВЭП функциональный узел стабилизации напряжения отсутствует [21].

Таким образом, в зависимости от условий работы и требований, предъявляемых к ИВЭП, отдельные функциональные узлы могут отсутствовать.

---

*Например, если напряжение сети соответствует требуемому значению выпрямленного напряжения, то может отсутствовать трансформатор, а в отдельных случаях – стабилизатор постоянного напряжения [22].*

---

Таким образом, значительная часть ЭРЭС потребляет электрическую энергию в виде постоянного тока. Если первичным источником служит сеть переменного тока, то ИВЭП чаще всего имеет структуру, приведенную на рисунке 4.46 [22].

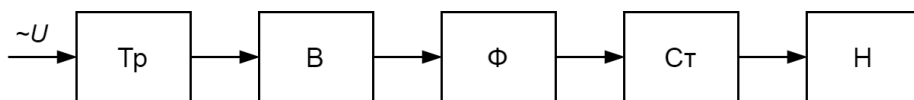


Рисунок 4.46 – Структурная схема классического источника вторичного электропитания

На схеме обозначено:

Тр – трансформатор;

В – выпрямитель;

Ф – фильтр нижних частот;

Ст – стабилизатор;

Н – нагрузка.

Структурная электрическая схема ИВЭП определяется входными и выходными параметрами. На рисунке 4.47 приведены типовые структурные схемы ИВЭП, содержащие следующие функциональные узлы: трансформатор Т, выпрямитель В, сглаживающий фильтр Ф, стабилизатор напряжения С, делитель выходного



напряжения ДН, помехоподавляющий фильтр ППФ, инвертор регулирующий Ир, инвертор нерегулирующий И.

Трансформатор на входе ИВЭП (рисунок 4.47,а,б) рассчитывается на частоту тока системы электроснабжения. Такие схемы используются при малой выходной мощности, так как трансформатор при работе на частоте тока сети имеет завышенные габаритные размеры и массу. В схемах на рисунке 4.47,в–е во входных цепях используются узлы ППФ, осуществляющие фильтрацию высокочастотных помех как со стороны сети, так и со стороны инвертора в сеть.

В схемах на рисунке 4.47,в,г применяется инвертор, регулирующий выходное напряжение источника по сигналу обратной связи с делителя напряжения. В схеме на рисунке 4.47,д инвертор И выполняет лишь функцию преобразования постоянного тока в переменный, а стабилизацию напряжения осуществляет стабилизатор С по сигналу обратной связи с трансформатора (от дополнительной обмотки).

На рисунке 4.47,е приведена схема многоканального ИВЭП. Обратная связь на регулирующий инвертор может быть подана только с одного выхода, поэтому остальные каналы при необходимости стабилизации их выходных напряжений должны быть снабжены узлами стабилизации С1 и С2. Обратная связь на инвертор обычно подается с выхода канала, рассчитанного на больший ток.

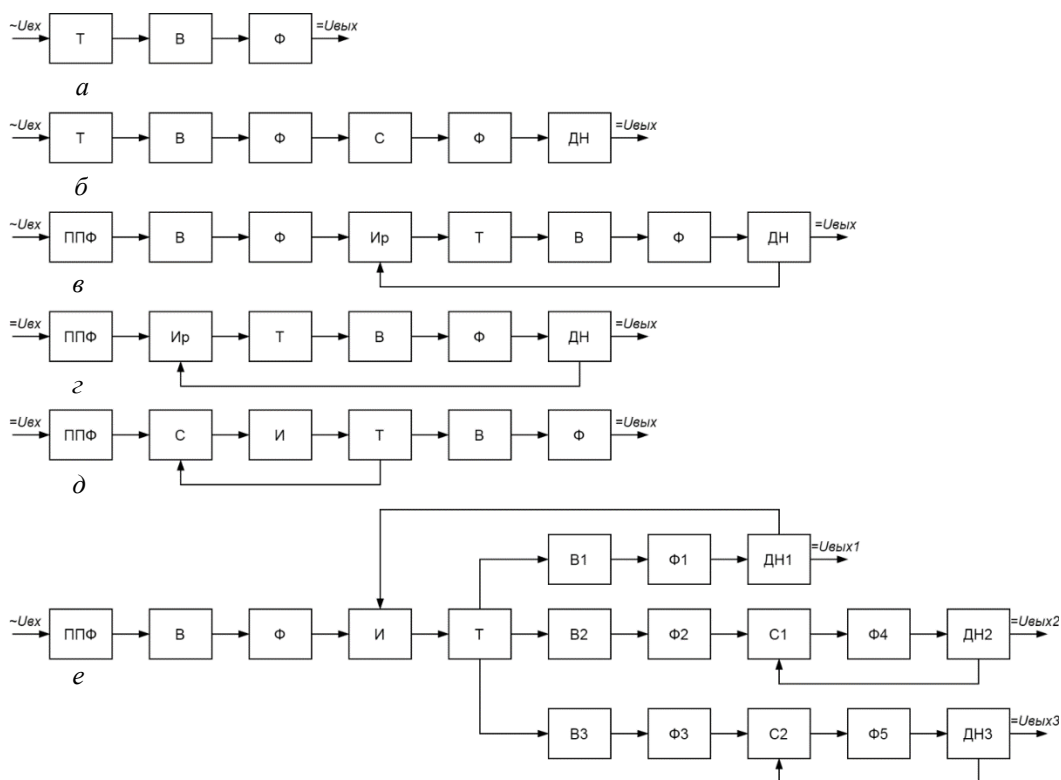


Рисунок 4.47 – Типовые структурные схемы источников электропитания при входном напряжении переменного (а–в, е) или постоянного (г, д) тока

**Способы регулирования выходного напряжения источников электропитания.** Выходное напряжение ИВЭП изменяется в процессе работы под воздействием изменений тока нагрузки, входного напряжения, температуры окружающей среды, а также под влиянием ионизирующих излучений, времени непрерывной работы, влажности окружающего воздуха, механических воздействий.

Регулирование выходного напряжения может осуществляться вручную (оператором) или автоматически. Источник называют *стабилизирующим*, если в нём поддерживается уровень напряжения или тока неизменным с заданной степенью точности. В зависимости от вида регулирования стабилизирующие источники подразделяются на *параметрические* и *компенсационные*.

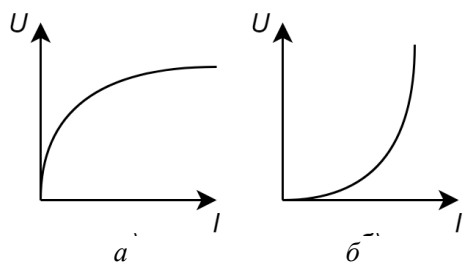


Рисунок 4.48 – Вольт-амперная характеристика нелинейных компонентов для стабилизации напряжения (а) и тока (б)

Для параметрической стабилизации применяются компоненты с нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ). На рисунке 4.48,а показана ВАХ стабилизатора напряжения, на рисунке 4.8,б – ВАХ стабилизатора тока. Для параметрической стабилизации при постоянном токе применяются стабилитроны и переходы транзисторов (у биполярных транзисторов переходы база-эмиттер), для параметрической стабилизации при переменном токе – электромагнитные компоненты (дроссели).

Компенсационные стабилизирующие источники представляют собой устройства автоматического регулирования с отрицательной обратной связью. В этих устройствах сигнал обратной связи с выхода источника воздействует на регулирующий компонент. В компенсационных стабилизаторах напряжения сигнал обратной связи определяется уровнем выходного напряжения, в стабилизаторах тока – уровнем выходного тока.

В зависимости от принципа регулирования различают компенсационные источники *непрерывного* и *импульсного* действия. В источниках электропитания непрерывного действия регулирующий компонент включен последовательно с нагрузкой или параллельно ей. В соответствии с этим различают последовательные или параллельные стабилизаторы.

При регулировании выходного напряжения источника используются следующие способы модуляции:

- а) амплитудная модуляция (АМ), когда регулирование осуществляется изменением амплитуды напряжения;
- б) частотная импульсная модуляция (ЧИМ), когда регулирование напряжения осуществляется изменением частоты следования импульсов напряжения;
- в) фазоимпульсная модуляция (ФИМ), когда регулирование напряжения осуществляется изменением его фазы;

г) широтно-импульсная модуляция (ШИМ), когда регулирование выходного напряжения осуществляется изменением длительности импульсов при постоянной частоте следования;

д) частотно-широотно-импульсная модуляция (ЧШИМ), когда в одной части диапазона регулирование напряжения осуществляется в режиме ШИМ, а в другой части диапазона происходит переход в режим ЧИМ;

е) интегральная широтно-импульсная модуляция (ИШИМ), когда длительность импульсов определяется всей совокупностью значений управляющего сигнала на тактовом промежутке времени.

Наиболее широкое распространение в ИВЭП ЭРЭС получил способ ШИМ. Также представляет интерес способ ИШИМ, обеспечивающий высокую точность разомкнутых широтно-импульсных устройств регулирования и стабилизации.

Общий принцип работы базируется на свойстве активного нелинейного элемента изменять спектральный состав поступающего напряжения промышленной частоты таким образом, чтобы в нём появилась постоянная составляющая, которая является полезной и выделяется с помощью фильтра нижних частот, в полосу прозрачности которого не должны попадать гармоники воздействия [22].

**Алгоритм работы ИВЭП.** Трансформатор  $T_r$  (см. рисунок 4.46), как правило, понижает напряжение, затем оно преобразуется вентильной группой В (собственно выпрямитель) в импульсное напряжение, пульсации которого сглаживаются фильтром Ф, и при необходимости уровень этого напряжения (на нагрузке Н) с помощью стабилизатора Ст поддерживается неизменным, не зависящим от изменений напряжения сети, тока нагрузки и других дестабилизирующих факторов.

**Общие требования к ИВЭП ЭРЭС.** ИВЭП ЭРЭС характеризуются следующими основными параметрами:

- показателями надежности работы;
- значениями и отклонениями напряжения и тока входной сети (системы электроснабжения);
- значением, нестабильностью и пульсацией выходного напряжения при воздействии влияющих величин;
- наличием защиты при аварийных режимах;
- коэффициентом полезного действия;
- габаритными размерами и массой.

Степень важности отдельных показателей определяется видом нагрузки и условиями эксплуатации, однако для любого источника надёжность работы является его важнейшей характеристикой. Она оценивается временем наработки на отказ и вероятностью безотказной работы. Выбор показателей надёжности определяется назначением ЭРЭС. Так, наибольшую наработку на отказ должна обеспечивать аппаратура, размещаемая на необслуживаемых объектах (космические аппараты, морские буи и т.п.). Наибольшая вероятность безотказной работы требуется от ЭРЭС, функционирующие которых в течение заданного (сравнительно небольшого) времени должно быть гарантировано. К таким объектам относятся медицинская аппаратура, ракетная техника и т.п. Наработка на отказ отдельных составных частей

(функциональных узлов) источников электропитания обычно находится в пределах  $(50-100) \cdot 10^3$  ч, а наработка на отказ ИВЭП – в пределах  $(20-70) \cdot 10^3$  ч. Вероятность безотказной работы источников и их функциональных узлов составляет примерно 0,95 за 1000 ч непрерывной работы.

Значение пульсаций выходного напряжения ИВЭП определяет его электромагнитную совместимость с нагрузкой. ЭРЭС, выполненные на цифровых компонентах, предъявляют умеренные требования к пульсациям ИВЭП. Так, для электропитания цифровых микросхем допустимо напряжение постоянного тока с переменной составляющей не более 1 %. Для аналоговой аппаратуры в большинстве случаев допустима пульсация 0,1–0,2 % от уровня выходного напряжения. К источникам электропитания высокого напряжения передающих устройств могут предъявляться требования по значениям и наличию гармонических составляющих выходного напряжения. Наличие этих требований определяется режимом обработки сигнала в приёмопередающей аппаратуре (непрерывный, квазинепрерывный, импульсный).

Изменение входного тока ИВЭП при динамическом характере нагрузки определяет возможность его электромагнитной совместимости с системой электроснабжения, особенно с системой ограниченной мощности. Уровень электромагнитных помех со стороны ИВЭП в систему электроснабжения в существенной степени зависит от значения реактивной составляющей входного тока, а при коммутации переменного тока – также от мгновенного значения входного напряжения. Применение входного фильтра уменьшает пульсации на входе источника как со стороны системы электроснабжения, так и со стороны самого источника. Помехи от ИВЭП не должны превышать значений, установленных в нормативно-технической документации.

Нестабильность выходного напряжения стабилизирующего ИВЭП до 2 % от номинального напряжения для многих видов нагрузок (в том числе передающих и индикаторных устройств) может быть приемлемой. В отдельных случаях требования могут быть более жесткими и отклонение напряжения от номинального не должно превышать 1 %. Наибольшее влияние на нестабильность выходного напряжения оказывают диапазоны изменения температуры окружающей среды и выходного тока. При импульсном характере и широком диапазоне изменения тока, потребляемого нагрузкой, обеспечение требований по нестабильности выходного напряжения может вызвать значительное усложнение схемы и конструкции. Нестабильность выходного напряжения в течение заданного промежутка времени (например, в течение 24 ч) может быть задана не более 0,02 %.

Нестабильность выходного напряжения высоковольтных ИВЭП должна обеспечиваться не только схемными, но и конструктивно-технологическими мерами. Это вызвано тем, что наличие высокого напряжения является предпосылкой для увеличения токов утечки. В маломощных устройствах под воздействием влияющих величин (в первую очередь повышенной влажности) токи утечки могут быть сравнимы с выходным током, что приводит к изменению выходного напряжения.

Коэффициент полезного действия ИВЭП во многом определяется сочетанием выходных напряжений и тока. При одинаковой выходной мощности источники с более высоким выходным напряжением имеют более высокий КПД. Однако в мало-мощных ИВЭП высокого напряжения (например, в ИВЭП электронно-лучевых трубок) получение высокого КПД затруднено, так как режим их работы близок к режиму холостого хода. В источниках с большими выходными токами КПД определяется в основном мощностью тепловых потерь и возможностью её отвода от источника при заданных условиях охлаждения и конструктивном исполнении. В низковольтных ИВЭП КПД обычно составляет: при непрерывном преобразовании 45–55 %, при импульсном преобразовании 75–80 %. В источниках высокого напряжения при выходной мощности до 1 кВт оптимальный КПД составляет примерно 55–70 %.

Технические требования к характеристикам ИВЭП должны выполняться в заданных условиях эксплуатации ЭРЭС. Эти условия определяются назначением аппаратуры, в которой используются источники, и могут существенно различаться. Если ЭРЭС размещаются в отапливаемом помещении, то они рассчитываются на температуру окружающей среды от +5 до +40 °С, атмосферное давление не ниже 460 мм рт. ст. и относительную влажность воздуха 95 % при температуре +30 °С. Если ЭРЭС размещаются на подвижных наземных носителях (например, колёсных и гусеничных самоходах), то диапазон изменения температуры составляет от –50 до +65 °С, а относительная влажность воздуха повышается до 98–100 %.

ИВЭП должны выдерживать циклическое изменение температуры окружающей среды. Особенно критичны к такому режиму герметизируемые конструкции, а также устройства высокого напряжения, для конструкций которых характерна большая толщина слоя изолирующего компаунда. Значительный перепад температур обычно имеет место при подъёме и последующем снижении аппаратуры.

Так, при подъёме на высоту более 9000 м температура окружающей среды за короткое время достигает –60 °С. При эксплуатации в составе самолетной аппаратуры источники электропитания должны сохранять работоспособность в условиях атмосферного давления 5 мм рт. ст.

К ИВЭП ЭРЭС предъявляются требования устойчивости к воздействию проникающей радиации. В этом случае необходимо учитывать обратимые и необратимые изменения, происходящие в полупроводниковых структурах, конденсаторах, электромагнитных компонентах и др. Наиболее критичным параметром для высоковольтной конструкции ИВЭП является сопротивление изоляции. При плотности потока нейтронов  $10^{11} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$  и мощности дозы гамма-излучения  $10^3 \text{ Р/с}$  сопротивление изоляции может снижаться на несколько порядков.

Конструкции ИВЭП (помимо допустимых значений массы и объёма) должны обеспечивать заданный температурный режим, уровень технологичности, уровень унификации, уровень миниатюризации, а также удобство обслуживания и безопасность работы обслуживающего персонала.

**Перспективы развития.** Поступательное развитие микроэлектроники оказывает существенное влияние на ИВЭП: постоянно ужесточаются требования к

стабильности номиналов напряжений и токов, значительно уменьшаются масса и габаритные размеры, усиливаются требования по надёжности, безопасности, экономичности. Снижение массы и габаритных размеров ИВЭП достигается выбором принципа их действия, схемы, режима работы, элементной базы, конструкции. Конструктивное исполнение ИВЭП определяет технологию его изготовления.

Таким образом, при создании ИВЭП перед разработчиком ставится ряд взаимосвязанных задач, решение которых зависит от знания особенностей и принципов работы ИВЭП, выбора рационального схемного и конструктивного исполнения с заданными параметрами для заданных условий эксплуатации [21].

### Электронные вычислительные системы

Дадим представление о принципе работы аналоговой вычислительной машины (АВМ). Устройства на операционных усилителях (ОУ) позволяют реализовать большое количество математических процедур: инвертирование, масштабирование, суммирование, дифференцирование, интегрирование. Эти процедуры применимы к меняющимся во времени переменным – электрическим сигналам.

Предположим, что необходимо в реальном масштабе времени промоделировать поведение некоторой переменной  $x(t)$  в соответствии с интегродифференциальным уравнением

$$y(t) = ax(t) + b \frac{dx(t)}{dt} + c \int x(t) dt .$$

Структура АВМ для решения данной задачи показана на рисунке 4.49.

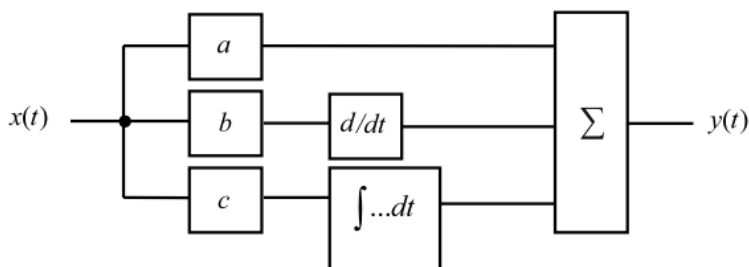


Рисунок 4.49 – Структурная схема аналоговой вычислительной машины

Кратность процедур дифференцирования и интегрирования, в принципе, может быть любой, однако на практике их порядок ограничивают десятком. Для моделирования нелинейных процессов в нужную цепь включается устройство с требуемой нелинейной характеристикой.

Таким образом, сущность аналогового машинного моделирования заключается в том, что уравнению-оригиналу или моделируемому уравнению ставится в соответствие сходственное машинное уравнение или моделирующее уравнение, связывающее машинные переменные. Поэтому аналоговые машины иногда называют моделирующими. Результаты решения выводятся в реальном времени (или в ином

масштабе по времени) в виде зависимостей электрических напряжений как непрерывных функций времени на экран индикатора, на бумагу самописца или фиксируются измерительными приборами.

**Синтез схем на логических элементах по заданным условиям.** Цифровые электронные схемы на логических элементах (ЛЭ) применяются в качестве схем управления для самых различных задач контроля и регулирования состояния технических и технологических объектов. Под синтезом схемы понимают её проектирование (разработку) [23].

Перед началом синтеза схемы необходимо четко сформулировать задачу, которую должна решать схема. Словесные формулировки можно часто трактовать неоднозначно. Поэтому техническому заданию на разработку схемы требуется уделить особое внимание.

В первую очередь нужно назначить входные переменные:  $A, B, C, D, E, F, G, E$ . Затем назначают выходные переменные:  $Z, Y, X, V$ .

Далее необходимо оговорить, при каких условиях переменные равны 1 и 0.

После этого можно приступить к составлению таблицы истинности, которая однозначно определяет, как будет работать проектируемая схема. Сразу станет ясно, являлось ли словесное описание однозначным. Если в процессе составления таблицы встречается неясность, её надо сразу устранить путем обсуждения с остальными разработчиками и заказчиками.

После построения таблицы истинности подбирают логические элементы, на которых её можно реализовать. Схема должна быть как можно проще и состоять из элементов, имеющихся в наличии.

Следует попытаться максимально упростить составленную схему. Если в наличии имеются, например, только элементы И-НЕ, схему надо преобразовать так, чтобы она состояла только из элементов И-НЕ.

Итак, для синтеза схемы можно выделить пять шагов.

1. Описание функции требуемой схемы.
2. Назначение входных и выходных переменных величин и присвоение значений 0 и 1.
3. Составление таблицы истинности.
4. Определение необходимых логических операций.
5. Упрощение и при необходимости преобразование схемы.

---

*Рассмотрим пошаговый синтез на конкретном примере.*

*Требуется синтезировать схему, предотвращающую пуск лифта при определённых условиях.*

**Шаг 1. Описание функции требуемой схемы**

*Лифт не может трогаться при открытой двери. Он также не может трогаться при перегрузке. Для пуска необходимо нажать кнопку.*

**Шаг 2. Назначение входных и выходных переменных**

*Входная переменная  $A$  назначается для дверного контакта.  $A = 1$  означает, что дверной контакт замкнут,  $A = 0$  – дверной контакт разомкнут.*

---

Входная переменная  $V$  назначается для перегрузки ( $V = 1$  – перегрузка,  $V = 0$  – нет перегрузки).

Входная переменная  $C$  назначается для кнопки ( $C = 1$  – кнопка нажата,  $C = 0$  – не нажата).

Выходной переменной величиной будет  $Z$ :  $Z = 1$  – лифт может ехать.  $Z = 0$  – лифт ехать не может.

### Шаг 3. Составление таблицы истинности

Мы имеем три переменных величины. Следовательно, таблица истинности имеет 8 возможных вариантов (рисунок 4.50). Лифт может ехать, когда дверь закрыта ( $A=1$ ), нет перегрузки ( $V=0$ ) и кнопка нажата ( $C=1$ ).

Все эти условия выполняются одновременно только в варианте 6 таблицы истинности (см. рисунок 4.50). Для этого варианта  $Z=1$ . Во всех остальных случаях  $Z=0$ .

### Шаг 4. Определение необходимых логических операций

После составления таблицы истинности можно рассчитать схему. Для такой простой задачи можно также применять метод подбора.

$Z = 1$  только тогда, когда  $A=1$ ,  $V=0$  и  $C=1$ . Если подать вход  $V$  на инвертор НЕ, то на выходе этого элемента будет состояние 1. При  $A=1$ , не  $V=1$  и  $C=1$  имеем три 1-состояния. Они поступают на вход трехвходового элемента И (рисунок 4.51). На выходе элемента И только тогда действует 1, когда  $A=1$ ,  $V=0$  и  $C=1$ . Этот выход является  $Z$ -выходом. На рисунке 4.51 изображена требуемая схема безопасности +5 В. Это напряжение может коммутировать реле запуска лифта.

Вар.	C	V	A	Z
1	0	0	0	0
2	0	0	1	0
3	0	1	0	0
4	0	1	1	0
5	1	0	0	0
6	1	0	1	1
7	1	1	0	0
8	1	1	1	0

Рисунок 4.50 – Таблица истинности для схемы безопасности лифта

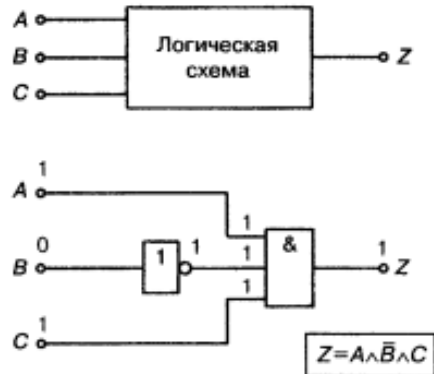


Рисунок 4.51 – Цифровая схема безопасности лифта

Способ нахождения схемы методом подбора можно описать как возможность подобрать вариант схемы, выполняющей требуемые логические операции умножения или сложения входных переменных и их инвертированных значений.

### Шаг 5. Упрощение и при необходимости преобразование схемы

Схему на рисунке 4.51 упростить нельзя. Однако её можно преобразовать. Предположим, что у нас есть только элементы ИЛИ-НЕ. Тогда функцию  $Z = A \wedge \bar{V} \wedge C$  можно преобразовать:



$$Z = A \wedge \overline{B} \wedge C = \overline{\overline{A \wedge \overline{B} \wedge C}} = \overline{\overline{A} \vee B \vee \overline{C}}.$$

Схема, построенная на элементах ИЛИ-НЕ, изображена на рисунке 4.52.

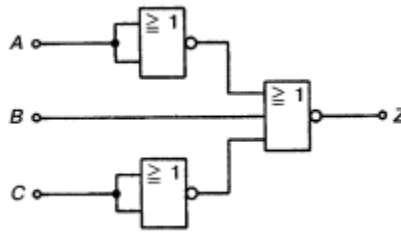


Рисунок 4.52 – Схема безопасности лифта на элементах ИЛИ-НЕ

**Архитектура и структура компьютеров.** Архитектура – это наиболее общие принципы построения компьютеров [24]. Она охватывает круг вопросов, существенных в первую очередь для пользователя: функциональный состав технических и программных средств и их взаимодействие в процессе обработки информации; систему команд, их форматы и способы кодирования; методы адресации команд и данных.

Основные принципы построения компьютеров изложили в 1946 г. американские математики Дж. Фон Нейман, К. Голдстейн и А. Беркс. Совокупность этих принципов породила классическую неймановскую архитектуру, которая остается актуальной и сегодня.

В общем неймановская архитектура обладает следующими основными признаками:

- наличие одного вычислителя, имеющего процессор, память, средства ввода-вывода информации, а также средства управления;
- применение двоичной системы счисления как для представления информации, так и для выполнения арифметико-логических операций;
- размещение в единой общей памяти команд и чисел фиксированной длины;
- линейная структура адресации ячеек памяти, что требует наличия в процессоре счетчика команд;
- централизованное автоматическое последовательное считывание команд из памяти и интерпретация их процессором; данные обрабатываются параллельно, т.е. одновременно, над всеми разрядами машинного слова;
- низкий уровень машинного языка.

---

*Первый компьютер EDSAC с хранимой программой в памяти на 512 ртутных линиях задержки был построен М. Уилксом (Англия) в 1949 г. Машина выполняла 15 тыс. сложений и 120 умножений за одну секунду. В 1950 г. под управлением Дж. фон Неймана был создан первый полностью электронный компьютер классической архитектуры EDVAC, который положил начало машинам первого поколения.*

---

*В 1948–1950 гг. в Институте электротехники в Киеве была создана малая электронная счётная машина (МЭСМ). Её разработкой руководил выдающийся учёный и конструктор многих компьютеров академик С.А. Лебедев. В МЭСМ были использованы (независимо от Неймана) основные принципы классической архитектуры. Компьютер содержал 3500 ламп, 2500 диодов, занимал площадь 60 кв. м, потреблял мощность 25 кВт и выполнял 50 операций в секунду.*

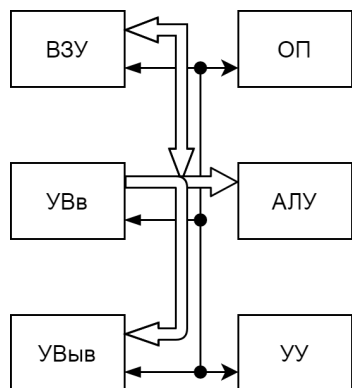


Рисунок 4.53 – Структура компьютера

Компьютер классической архитектуры включает (рисунок 4.53):

- арифметико-логическое устройство (АЛУ);
- оперативную память (ОП);
- средства хранения и ввода-вывода информации: внешние запоминающие устройства (ВЗУ); устройства ввода информации (УВв); устройства вывода информации (УВыв); все эти устройства называют внешними или периферийными (ПУ);
- устройство управления (УУ). Вместе с АЛУ оно образует процессор. При наличии в машине нескольких процессоров выделяют центральный процессор (ЦП).

АЛУ предназначено для выполнения арифметических и логических операций, предусмотренных системой команд данного компьютера. В состав АЛУ входят регистры и комбинационные схемы. Данные для обработки в АЛУ поступают из ОП и называются операндами. Результаты операций пересылаются в ОП или временно сохраняются в регистрах АЛУ.

УУ считывает и дешифрует в соответствующей последовательности команды, формирует и подаёт управляющие сигналы для других устройств компьютера.

ОП предназначена для временного хранения программ и данных, в ней выполняются операции записи и считывания информации. Кроме ОП, используют также постоянную память, в которой выполняются только операции считывания. Оперативную (оперативное запоминающее устройство – ОЗУ) и постоянную (постоянное запоминающее устройство – ПЗУ) память, а также регистры АЛУ называют *внутренней памятью* (рисунок 4.54). Процессор и ОП вместе образуют *ядро компьютера*.

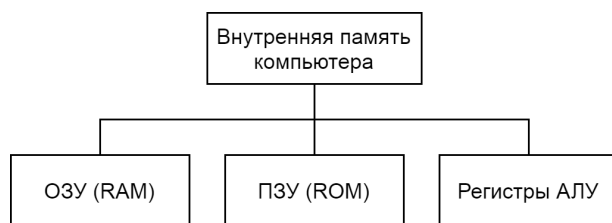


Рисунок 4.54 – Внутренняя память компьютера

*Операции ввода-вывода* – это обмен информацией между ядром машины и ПУ. Операция ввода передаёт информацию из ПУ в ядро компьютера, а операция вывода – наоборот.

Внешняя память, или внешнее запоминающее устройство (ВЗУ), предназначена для длительного и энергонезависимого хранения больших объемов информации. Физически её реализуют в виде накопителей (оптические, или лазерные, диски, HDD, SSD, flash memory).

Все виды внешней памяти обеспечивают обмен информацией с ядром компьютера, однако ВЗУ выделяют в отдельный вид ПУ по следующим признакам:

- внешняя память обеспечивает хранение больших массивов информации и быстродействующий обмен с ядром компьютера;
- информация в ней хранится в виде, недоступном для непосредственного восприятия человеком.

Устройства ввода и вывода (УВВ) информации рассматривают как единую функциональную часть компьютера. Различные по своим функциям, принципам построения и характеристикам УВВ и ВЗУ вместе образуют группу очень разнообразных внешних или периферийных устройств.

К УВВ информации относятся (рисунок 4.55):

- клавиатура, предназначенная для ввода программ и данных и управления работой машины;
- сканеры, предназначенные для ввода графической информации;
- ручные манипуляторы – мышь, шариковый и джойстик, предназначенные для быстрого перемещения курсора в заданную точку экрана дисплея и выполнения других действий;
- устройства речевого ввода, предназначенные для управления машиной с помощью речевых команд;
- устройства ввода жестами;
- устройства ввода с таких уже устаревших элементов, как перфоленты, перфокарты и др.

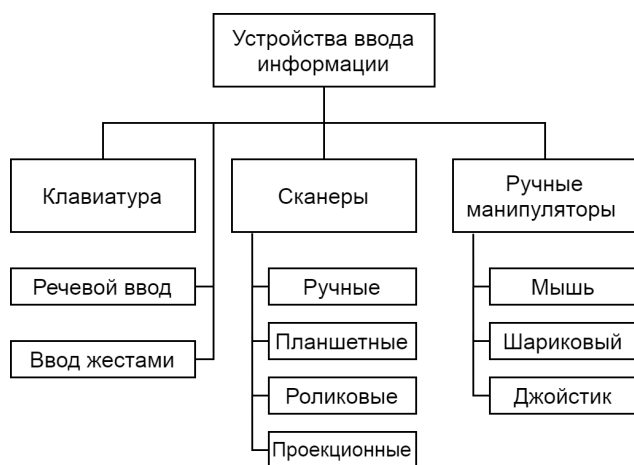


Рисунок 4.55 – Устройства ввода информации

К устройству вывода информации относят (рисунок 4.56):

- принтеры (матричные, струйные, лазерные);
- дисплеи (на электронно-лучевых трубках (ЭЛТ), на жидких кристаллах, плазменные, люминесцентные), предназначенные для отображения информации, которая вводится с клавиатуры (для контроля правильности набора данных) или из памяти машины;
- плоттеры (графопостроители), предназначенные для печати чертежей высокого качества;
- синтезаторы звука и языка, предназначенные для преобразования аналоговых сигналов в цифровой код и наборот;
- устройства вывода информации на перфоленты и перфокарты.

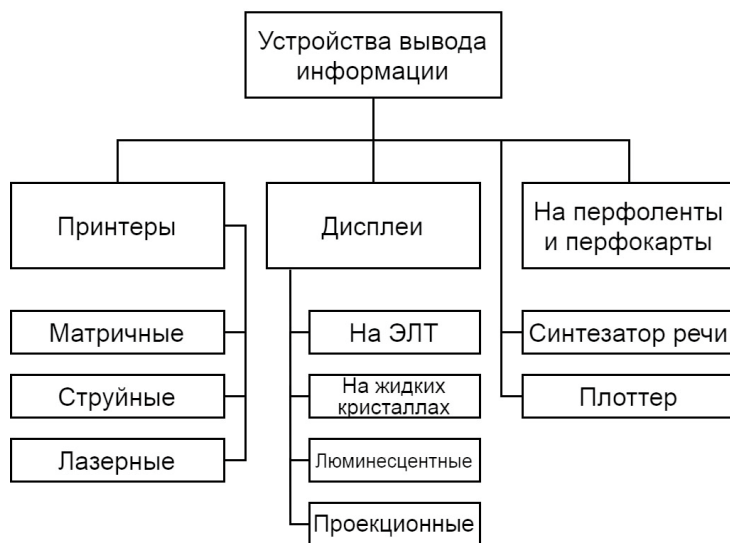


Рисунок 4.56 – Устройства вывода информации

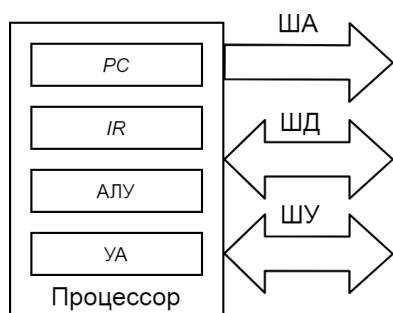


Рисунок 4.57 – Структура процессора

Связь между функциональными частями машины осуществляют с помощью *компьютерного интерфейса* – совокупности шин, сигналов, вспомогательных микросхем и алгоритмов, предназначенных для обмена информацией между устройствами компьютера.

Выделяют три шины (рисунок 4.57):

- шину адреса (ША), предназначенную для передачи адреса ячеек ОП и регистров ПУ;
- шину данных (ШД), предназначенную для передачи данных;
- шину управления (ШУ), предназначенную для передачи управляющих сигналов от процессора к устройствам и наоборот

[24, 25].

**Перспективы развития.** Развитие цифровой компьютерной техники описывается законом Мура. Это эмпирическое наблюдение, изначально сделанное Гордоном Муром, согласно которому (в современной формулировке) количество транзисторов, размещаемых на кристалле интегральной схемы, удваивается каждые 24 месяца. Часто цитируемый интервал 18 месяцев связан с прогнозом Давида Хауса из Intel, по мнению которого, производительность процессоров должна удваиваться каждые 18 месяцев из-за сочетания роста количества транзисторов и увеличения тактовых частот процессоров [26].

В 1965 году (через шесть лет после изобретения интегральной схемы) один из основателей Intel Гордон Мур в процессе подготовки выступления нашел закономерность: появление новых моделей микросхем наблюдалось спустя примерно год после предшественников, при этом количество транзисторов в них возрастало каждый раз приблизительно вдвое. Он предсказал, что к 1975 году количество элементов в чипе вырастет до 216 (65536) с 26 (64) в 1965 году. Мур пришел к выводу, что при сохранении этой тенденции мощность вычислительных устройств за относительно короткий промежуток времени может вырасти экспоненциально. Это наблюдение получило название закона Мура.

В 1975 году Гордон Мур внёс в свой закон коррективы, согласно которым удвоение числа транзисторов будет происходить каждые два года (24 месяца).

Существует масса схожих утверждений, которые прогнозируют процессы экспоненциального роста, также именуемых «законами Мура». К примеру, менее известный второй закон Мура [26], введённый в 1998 году Юджином Мейераном, гласит, что стоимость фабрик по производству микросхем экспоненциально возрастает с усложнением микросхем. Так, стоимость фабрики, на которой корпорация Intel производила микросхемы динамической памяти ёмкостью 1 кбит, составляла \$4 млн, а оборудование по производству микропроцессора Pentium по 0,6-микрометровой технологии с 5,5 млн транзисторов обошлось в \$2 млрд. Стоимость Fab32, завода по производству процессоров на базе технологии 45 нм, составила \$3 млрд.

Рост числа транзисторов на кристалле микропроцессора показан на рисунке 4.58.

---

*По поводу эффектов, обусловленных законом Мура, в журнале «В мире науки» было приведено такое сравнение:*

*«Если бы авиационная промышленность в последние 25 лет развивалась столь же стремительно, как промышленность средств вычислительной техники, то сейчас самолёт Boeing 767 стоил бы 500 долл. и совершал облёт земного шара за 20 минут, затрачивая при этом пять галлонов (~18,9 л) топлива. Приведенные цифры весьма точно отражают снижение стоимости, рост быстродействия и повышение экономичности ЭВМ» [27].*

---



В 2003 году Мур опубликовал работу «No Exponential is Forever: But „Forever“ Can Be Delayed!», в которой признал, что экспоненциальный рост физических величин в течение длительного времени невозможен и постоянно достигаются те или иные пределы. Лишь эволюция транзисторов и технологий их изготовления позволяла продлить действие закона ещё на несколько поколений [26].

В 2007 году Мур заявил, что закон, очевидно, скоро перестанет действовать из-за атомарной природы вещества и ограничения скорости света.

**Параллелизм и закон Мура.** В последнее время, чтобы получить возможность задействовать на практике дополнительную вычислительную мощность, которую предсказывает закон Мура, потребовалось использовать параллельные вычисления. На протяжении многих лет производители процессоров постоянно увеличивали тактовую частоту и параллелизм на уровне инструкций, так что на новых процессорах старые однопоточные приложения исполнялись быстрее без каких-либо изменений в программном коде. Примерно с середины 2010-х годов по разным причинам производители процессоров предпочитают многоядерные архитектуры, и для получения всей выгоды от возросшей производительности ЦП программы должны переписываться в соответствующей манере. Однако не каждый алгоритм поддается распараллеливанию, определяя, таким образом, фундаментальный предел эффективности решения вычислительной задачи согласно закону Амдала.

Закон Амдала (англ. Amdahl's law, иногда также закон Амдала – Уэра) – иллюстрирует ограничение роста производительности вычислительной системы с увеличением количества вычислителей. Джин Амдал сформулировал закон в 1967 году, обнаружив простое по существу, но непреодолимое по содержанию ограничение на рост производительности при распараллеливании вычислений: «В случае, когда задача разделяется на несколько частей, суммарное время её выполнения на параллельной системе не может быть меньше времени выполнения самого медленного фрагмента». Согласно этому закону ускорение выполнения программы за счёт распараллеливания её инструкций на множестве вычислителей ограничено временем, необходимым для выполнения её последовательных инструкций. Продemonстрируем это решением следующей задачи.

Пусть необходимо решить некоторую вычислительную задачу. Предположим, что её алгоритм таков, что доля  $\alpha$  от общего объёма вычислений может быть получена только последовательными расчётами, а соответственно доля  $1 - \alpha$  может быть распараллелена идеально (то есть время вычисления будет обратно пропорционально числу задействованных узлов  $p$ ). Тогда ускорение, которое может быть получено на вычислительной системе из  $p$  процессоров по сравнению с однопроцессорным решением не будет превышать величины

$$S_p = \frac{1}{\alpha + \frac{1 - \alpha}{p}} .$$

Закон Амдала (рисунок 4.59) показывает, что прирост эффективности вычислений зависит от алгоритма задачи и ограничен сверху для любой задачи с  $\alpha \neq 0$ .

Другими словами, не для всякой задачи имеет смысл наращивание числа процессоров в вычислительной системе.

Более того, если учесть время, необходимое для передачи данных между узлами вычислительной системы, то зависимость времени вычислений от числа узлов будет иметь минимум. Это накладывает ограничение на масштабируемость вычислительной системы, то есть с определенного момента добавление новых узлов в систему будет увеличивать время расчёта задачи.

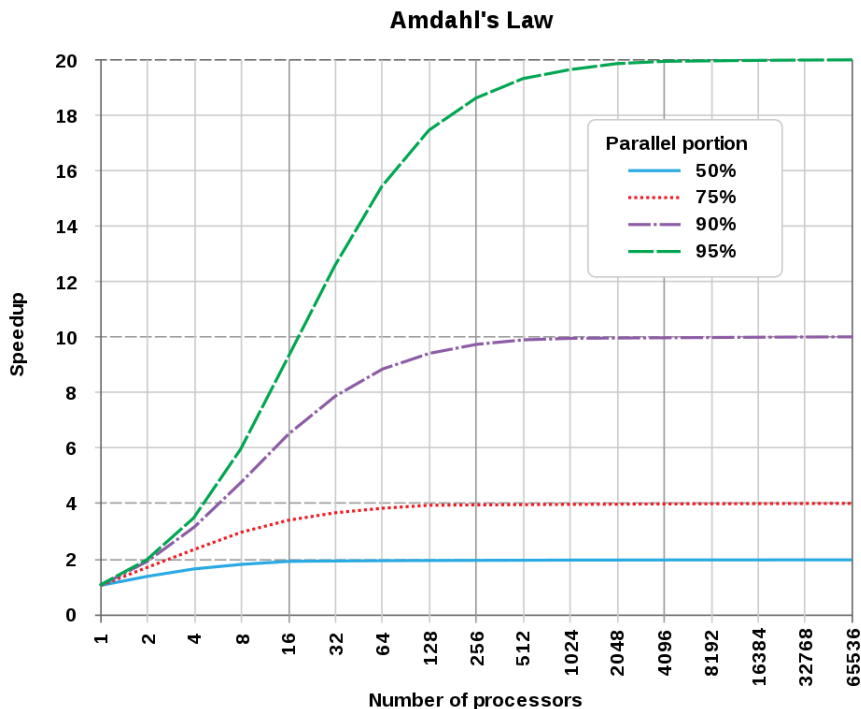


Рисунок 4.59 – Графическая иллюстрация закона Амдала: ускорение программы с помощью параллельных вычислений на нескольких процессорах ограничено размером последовательной части программы. Например, если можно распараллелить 95 % программы, то теоретически максимальное ускорение будет 20-кратным, невзирая на то, сколько процессоров используется

### Автоматические системы управления

**Электрическая структурная схема.** На рисунке 4.60 приведена обобщённая структурная схема автоматической системы управления (АСУ).

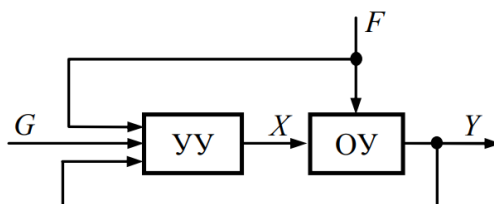


Рисунок 4.60 – Обобщённая схема автоматической системы управления



На схеме обозначено:

$Y$  – выходная величина, характеризующая состояние объекта;

$X$  – регулирующее воздействие;

$G$  – задающее воздействие;

$F$  – возмущающее воздействие.

Объектом управления (ОУ) могут быть функциональные узлы или оконечные, исполнительные и приводные устройства. Управляющим устройством (УУ) – отдельный элемент или ФУ.

---

*Например, если ОУ – однокаскадный усилитель на биполярном транзисторе, а цель УУ – стабилизировать параметры его рабочего режима (положение рабочей точки этого транзистора), то УУ можно реализовать на отдельных элементах, которыми могут быть терморезистор или диод, включённый в обратном направлении между базой и общим проводом; резистор в эмиттерной цепи каскада.*

---

На рисунке 4.61 приведены другие примеры структурных схем АСУ.

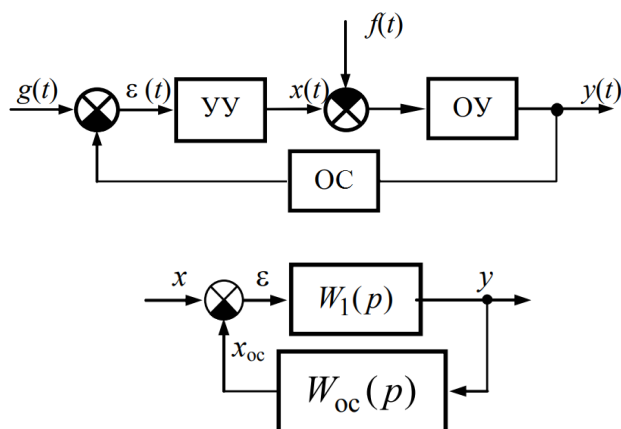


Рисунок 4.61 – Примеры схем автоматических систем управления

Динамические системы, в том числе и АСУ, на языке математики описываются системой обыкновенных дифференциальных уравнений. Использование преобразования Лапласа сводит задачу решения дифференциальных уравнений к решению системы линейных алгебраических уравнений. Поскольку в системах управления путем изменения одних переменных производится целенаправленное воздействие на другие переменные, то необходимо установить связь между этими переменными. Данную связь обычно представляют в виде передаточной функции, которая является одним из основных понятий теории автоматического управления (ТАУ) [28].

Преимущество передаточной функции заключается в том, что она позволяет изобразить причинно-следственную связь между переменными в наглядной схематической форме. В ТАУ преобладает представление различных динамических систем в виде структурных схем. Структурные схемы состоят из блоков

направленного действия, каждому из которых соответствует определённая передаточная функция. Так, на рисунке 4.62 изображена структурная схема двигателя постоянного тока, управляемого по цепи возбуждения, которая отражает связь между углом поворота  $\theta(s)$  и приложенным напряжением  $V_f(s)$ .

Для описания системы с несколькими управляемыми переменными используется структурная схема с перекрестными связями. Например, в системе на рисунке 4.63 имеются две входных и две выходных переменных.

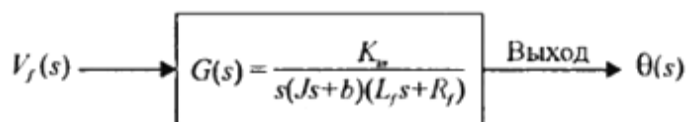


Рисунок 4.62 – Структурная схема двигателя постоянного тока

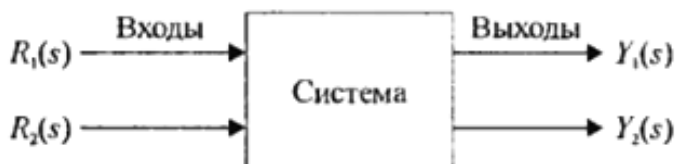


Рисунок 4.63 – Система с двумя входами и двумя выходами

С помощью передаточных функций можно записать связывающие их уравнения:

$$Y_1(s) = G_{11}(s)R_1(s) + G_{12}(s)R_2(s),$$

$$Y_2(s) = G_{21}(s)R_1(s) + G_{22}(s)R_2(s),$$

где  $G_{ij}(s)$  – передаточная функция от  $j$ -го входа к  $i$ -му выходу. Структурная схема, отражающая записанные выше уравнения, представлена на рисунке 4.64. В общем случае при наличии  $J$  входов и  $I$  выходов связывающие их уравнения можно записать в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \\ \vdots \\ Y_i(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & \dots & G_{1j}(s) \\ G_{21}(s) & \dots & G_{2j}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{i1}(s) & \dots & G_{ij}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1(s) \\ R_2(s) \\ \vdots \\ R_i(s) \end{bmatrix},$$

или в компактном виде

$$\mathbf{Y} = \mathbf{GR},$$

где  $\mathbf{Y}$  и  $\mathbf{R}$  – матрицы-столбцы, элементами которых являются  $I$  выходных и  $J$  входных переменных;  $\mathbf{G}$  – матричная передаточная функция размерности  $I \times J$ .

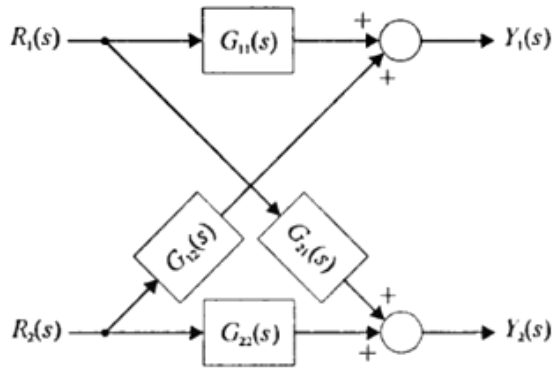


Рисунок 4.64 – Структурная схема системы с перекрестными связями

Пользуясь определёнными правилами, структурную схему сложной системы можно упростить, сведя её к конфигурации с меньшим числом блоков, чем в исходной системе (таблица 4.7). Поскольку передаточные функции являются средством описания линейных систем, им присуще свойство коммутативности. Например, для позиции 1 из таблицы 4.7 можно записать

$$X_3(s) = G_2(s)X_2(s) = G_1(s)G_2(s)X_1(s).$$

Если два блока соединены последовательно, то предыдущее уравнение можно записать также в виде

$$X_3(s) = G_2(s)G_1(s)X_1(s).$$

При этом предполагают, что если выход первого блока соединен со входом второго, то влияние нагрузки на первый блок незначительно, т.е. они согласованы. Если же нагрузка оказывает существенное влияние на выходную переменную предшествующего блока, то необходимо учесть этот фактор и внести соответствующее изменение в передаточную функцию.

Таблица 4.7 – Правила преобразования структурных схем

Преобразование	Исходная схема	Эквивалентная схема
1. Последовательное соединение блоков		<p>или</p>
2. Перенос сумматора через блок с передаточной функцией по ходу движения сигнала		

Окончание таблицы 4.7

Преобразование	Исходная схема	Эквивалентная схема
3. Перенос узла через блок с передаточной функцией против движения сигнала		
4. Перенос узла через блок с передаточной функцией по ходу движения сигнала		
5. Перенос сумматора через блок с передаточной функцией против движения сигнала		
6. Исключение контура с обратной связью		

Методы преобразования структурных схем основаны на рассмотрении алгебраических соотношений между отдельными переменными. Например, рассмотрим структурную схему, изображённую на рисунке 4.65. В этой системе с отрицательной обратной связью сигнал на входе объекта управления записывается в виде

$$E_a(s) = R(s) - B(s) = R(s) - H(s)Y(s).$$

Поскольку выходная переменная связана с этим сигналом передаточной функцией  $G(s)$ , то

$$Y(s) = G(s)E_a(s),$$

следовательно,

$$Y(s) = G(s)[R(s) - H(s)Y(s)].$$

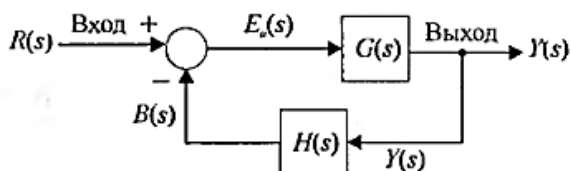


Рисунок 4.65 – Система с отрицательной обратной связью

Группируя члены при  $Y(s)$ , получим

$$Y(s)[1 + G(s)H(s)] = G(s)R(s).$$

Отсюда получим передаточную функцию, связывающую вход с выходом:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}.$$

Это выражение, известное как передаточная функция замкнутой системы, представляет особую ценность, так как оно свойственно большинству реальных систем управления.

Сведение структурной схемы, представленной на рисунке 4.65 к одному-единственному блоку является лишь одним примером элементарных преобразований, приведенных в таблице 4.7. Анализ систем путем преобразования структурных схем дает гораздо лучшее представление о роли каждого элемента, чем при рассмотрении уравнений. Правила преобразования структурных схем проиллюстрируем на примере сведения многоконтурной системы (рисунок 4.66) к более простому виду.

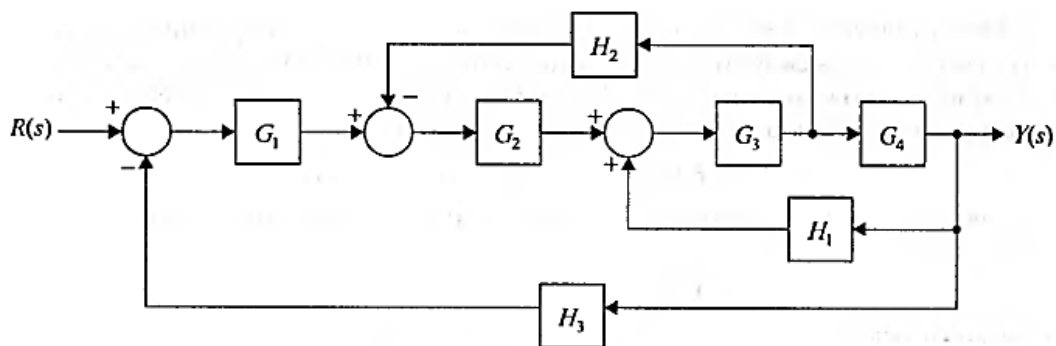


Рисунок 4.66 – Многоконтурная система управления

Заметим, что сигнал  $H_1(s)Y(s)$  подается на сумматор со знаком плюс. Поэтому контур, образованный блоками  $G_3(s)G_4(s)H_1(s)$ , называют контуром с положительной обратной связью. Упрощение этой структурной схемы основано на применении правила 6 из таблицы 4.7, которое связано с исключением изолированных контуров. Поэтому необходимо использовать и другие правила, чтобы подготовить схему к применению правила 6. Сначала, чтобы исключить контур  $G_3G_4H_1$ , мы перенесем узел через блок  $G_4$  по ходу движения сигнала (см. таблицу 4.7, правило 4) и получим схему, изображённую на рисунке 4.67,а. Исключая контур  $G_3G_4H_1$  по правилу 6, мы получим схему, показанную на рисунке 4.67,б. Затем, исключая внутренний контур, содержащий  $H_2/G_4$ , получим схему, показанную на рисунке 4.67,в. Наконец, исключая контур, содержащий  $H_3$ , получим передаточную функцию замкнутой многоконтурной системы, как показано на рисунке 4.67,г. Стоит обратить внимание на вид числителя и знаменателя этой передаточной функции. Можно видеть, что числитель образован произведением передаточных функций

блоков, находящихся в прямой цепи от входа  $R(s)$  к выходу  $Y(s)$ . Знаменатель равен единице минус сумма произведений передаточных функций блоков, образующих замкнутые контуры. Произведение  $G_3G_4H_1$  берется со знаком «плюс», поскольку это контур с положительной обратной связью, а произведения  $G_1G_2G_3G_4H_3$  и  $G_2G_3H_2$  – со знаком «минус», так как в этих контурах обратная связь отрицательная. Чтобы лучше это проиллюстрировать, знаменатель можно записать в виде

$$q(s) = 1 - (+G_3G_4H_1 - G_2G_3H_2 - G_1G_2G_3G_4H_3).$$

Такой вид числителя и знаменателя характерен для многоконтурных систем управления.

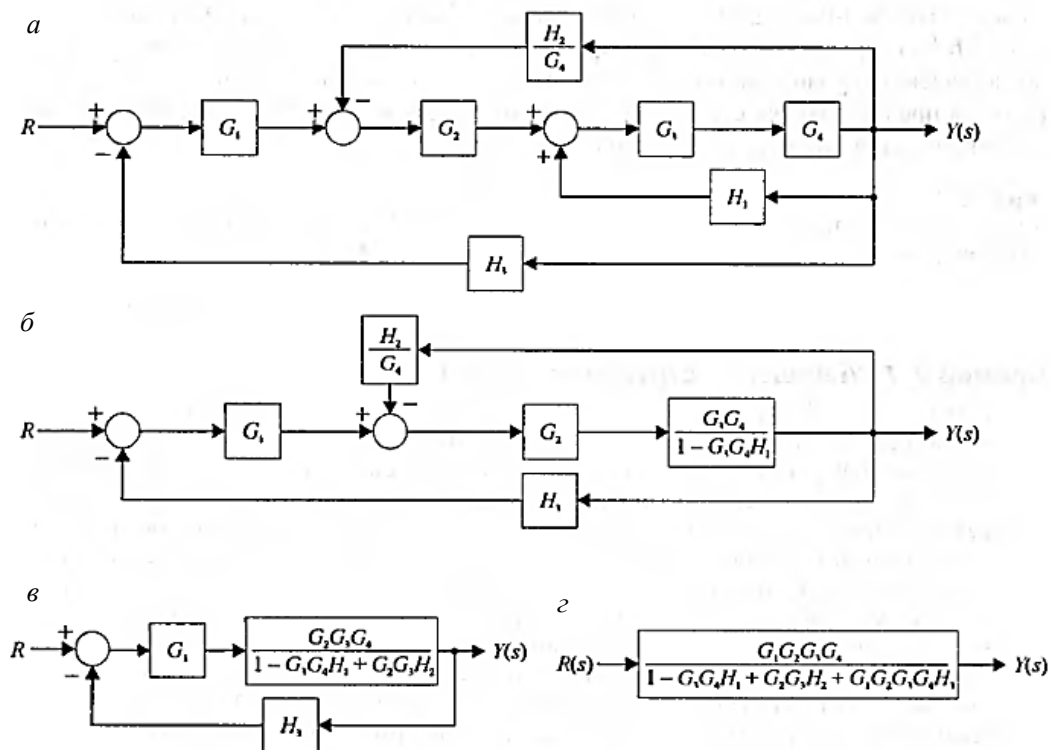


Рисунок 4.67 – Упрощение структурной схемы системы, изображенной на рисунке 4.66

Метод структурных схем широко распространен в теории и практике автоматического управления. Он даёт очень наглядное графическое представление о взаимосвязи управляемых и входных переменных. Кроме того, проектировщик может легко обнаружить необходимость введения в существующую структурную схему дополнительных блоков с целью улучшения характеристик системы.

Следует отметить, что процесс нахождения эквивалентной передаточной функции сложной системы соответствует её агрегированию – процессу, обратному декомпозиции.

**Перспективы развития АСУ.** Развитие систем управления идет по пути совершенствования их гибкости и обеспечения высокой степени автономности. Как показано на рисунке 4.68, в достижении этих целей можно наметить два разных пути. Считается, что современный промышленный робот является абсолютно автономным, так как, являясь изначально запрограммированным, он не требует дальнейшего вмешательства в его работу. Из-за ограниченных возможностей чувствительных органов робототехнические системы не обладают достаточной гибкостью в приспособлении к изменению условий эксплуатации. Это стимулирует разработку устройств технического зрения. Системы управления обладают достаточной приспособляемостью, но лишь при участии человека-оператора. Совершенствование робототехнических систем идёт за счёт оснащения их чувствительными элементами обратной связи с улучшенными характеристиками. Исследовательские работы в области искусственного интеллекта, датчиков, компьютерного зрения, программирования комплексов компьютеризированного проектирования и производства должны сделать эти системы более универсальными и экономичными. Чтобы уменьшить нагрузку на человека-оператора и повысить эффективность его работы, ведутся интенсивные исследования в области supervisory управления, человеко-машинного интерфейса и управления компьютерными базами данных. Многие исследования одинаково полезны для совершенствования как роботов, так и систем управления. Они связаны также с улучшением методов передачи информации и развитием языков программирования [28].



Рисунок 4.68 – Перспективы совершенствования роботов и систем управления

## Выводы

1. Формализация любой системы или процесса есть способ упрощения их описания.

2. С количественной точки зрения требования к иерархической структуре сводятся к двум противоречивым принципам: полноты (проблема должна быть рассмотрена максимально всесторонне и подробно) и простоты (все дерево должно быть максимально компактным – «вширь» и «вглубь»).

3. Метод декомпозиции не дает новых знаний, а лишь «вытягивает» знания из экспертов, структурирует и организует их, обнажая возможную нехватку знаний в виде «дыр» или пробелов в этой структуре. Операцией, противоположной декомпозиции, является операция агрегирования, т.е. объединения нескольких элементов в целое.

4. Внешне целостный и обособленный «черный ящик» обладает внутренней неоднородностью, что позволяет различать его составные части как подчиненные системы (подсистемы).

5. Модель состава системы отображает, из каких частей (подсистем и элементов) состоит система. Главная трудность в построении модели состава заключается в том, что разделение целостной системы на части является относительным, условным, зависящим от целей моделирования.

6. Для упрощения работы с существующими подсистемами и элементами, составляющими ЧЯ, удобно все их многообразие свести к иерархии электронных и радиоэлектронных средств.

7. Изучение языка структурных электрических схем похоже на изучение иностранного языка: сначала мы запоминаем алфавит (УГО), затем – простейшие слова и правила, по которым строится предложение (схема структурная).

8. Для того чтобы получить функционирующую ТС, иметь совокупность ФУ недостаточно, необходимо ещё правильно соединить все элементы между собой или, выражаясь обобщенно, установить между элементами определенные связи – отношения. Совокупность необходимых и достаточных для достижения цели отношений между элементами называется структурой системы.

9. Функционирование не определяет структуру однозначно. Одна и та же функция может быть реализована различными структурами. Такое свойство называется системотехнической инвариантностью.

10. Составить ТЗ означает составить условие проектной задачи.

11. Требования – это желаемые характеристики и свойства будущей системы. Чтобы правильно сформулировать технические требования к проектируемой ТС, необходимо хорошо разбираться и знать технические свойства ТС, ее подсистем и компонентов, а также то, как одни свойства связаны с другими свойствами ТС.



## Контрольные вопросы

1. Что такое декомпозиция «черного ящика»?
2. Что является основанием декомпозиции «черного ящика»?
3. Почему возникает вопрос о поиске компромисса между полнотой и простотой анализа «черного ящика»?
4. Какие принципы необходимо учитывать при поиске компромисса между полнотой и простотой анализа модели «черного ящика»?
5. Какие различают типы сложности в анализе «черного ящика»?
6. Как осуществляется переход от модели «черного ящика» к структурным схемам системы?
7. Какие модели более развиты, чем модель «черного ящика»?
8. Что такое функциональная структура?
9. Каким образом можно формализовать произвольный физико-технический эффект?
10. В чем заключается вывод основных физических операций?
11. Можно ли воспользоваться образной аналогией и представить некоторые технические системы в виде математических формул, в которых математические переменные будут аналогами физических процессов, а математические операции над ними – действиями функциональных узлов над этими процессами? Ответ обоснуйте.
12. Какие логические операции используются в технических системах? Приведите примеры использования каждой логической операции.
13. Что такое модель состава системы? Приведите примеры.
14. Что такое модель структуры системы? Приведите примеры.
15. Какая модель строится первой: модель состава или модель структуры? Ответ обоснуйте.
16. Каким образом и по каким основаниям проводится классификация функциональных узлов?
17. Какие функциональные узлы вы знаете?
18. Почему при проектировании системы важно знать технические характеристики, параметры и свойства её компонентов?
19. В какой последовательности рекомендуется изучать функциональные узлы ЭРЭС?
20. Что такое условно-графические и позиционные обозначения функциональных узлов?
21. С помощью каких примеров можно проиллюстрировать внутреннюю целостность систем?
22. Что такое эмерджентность?
23. Какие существуют способы соединения функциональных узлов на электрических структурных схемах?
24. В какой последовательности рекомендуется изучать технические системы и устройства?
25. Какие типы систем ЭРЭС вы знаете?
26. В какой форме представляются электрические структурные схемы и электрические функциональные схемы?
27. Каковы правила чтения электрических структурных схем ЭРЭС?

## Упражнения

1. Примените правила чтения структурных электрических схем к схемам из пункта 4.4.5.

2. Придумайте задачи для следующих обобщенных условий:

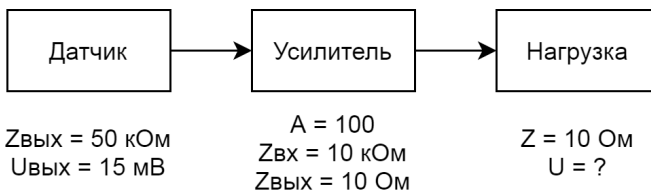
- заданы процессы (во временной и частотной областях отдельно) на входе и выходе ФУ. Идентифицируйте и назовите ФУ;
- задан процесс на входе ФУ и ФУ. Найдите процесс на выходе;
- задан процесс на выходе ФУ и ФУ. Найдите процесс на входе;
- задан ФУ. Определите типы процессов, с которыми работает ФУ;
- заданы процессы на входе и выходе совокупности последовательно включенных ФУ. Идентифицируйте используемые ФУ;
- задан процесс на входе ФУ и последовательность ФУ. Найдите процесс на выходе;
- задан процесс на выходе ФУ и последовательность ФУ. Найдите процесс на входе;
- заданы процессы на входах и выходе соединенных друг с другом ФУ. Определите способ соединения ФУ;

– заданы процессы на входе и выходе ЧЯ. Проведите декомпозицию ЧЯ. Получившуюся структурную схему обоснуйте. Сформулируйте требования к каждому ФУ СЭС с точки зрения характеристик процессов на входе и выходе ЧЯ;

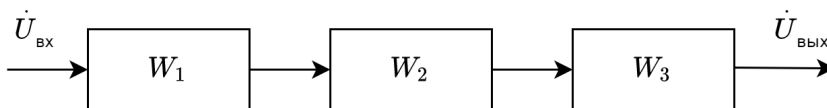
– задана потребность пользователя. Можно ли удовлетворить эту потребность, используя ТС, работа которой не основана на физических принципах электроники и радиотехники? Ответ аргументируйте.

3. Пользуясь алгоритмом чтения СЭС, напишите алгоритм работы какой-либо технической системы.

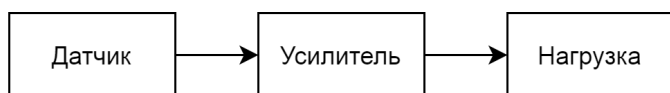
4. Определите напряжение на зажимах нагрузки в схеме, изображенной ниже.



5. Определите границы частотной характеристики (по уровню 3 дБ) системы в целом, схематически представленной ниже, если для блоков  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_3$  нижняя и верхняя границы полосы пропускания по уровню 3 дБ равны соответственно 10 Гц и 10 кГц; 100 Гц и 50 кГц; 2 Гц и 1000 Гц.



6. Определите коэффициент усиления по напряжению и выходной импеданс усилителя, требуемые для получения 10 Вт (максимальная мощность) на 8-омном репродукторе, в схеме, представленной ниже.



$$Z_{\text{ВЫХ}} = 100 \text{ Ом}$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = 100 \text{ мВ}$$

$$A = ?$$

$$Z_{\text{ВЫХ}} = ?$$

$$Z_{\text{ВХ}} = \infty$$

$$Z = 8 \text{ Ом}$$

7. Определите, какие из данных зависимостей линейны:

а)  $e_{\text{ВЫХ}} = 3e_{\text{ВХ}}^2$ ,

б)  $e_{\text{ВЫХ}} = Ae_{\text{ВХ}}$  ( $A$  – постоянная),

в)  $e_{\text{ВЫХ}} = 15 \log e_{\text{ВХ}}$ ,

г)  $e_{\text{ВЫХ}} = A^{e_{\text{ВХ}}}$  ( $A$  – постоянная),

д)  $e_{\text{ВЫХ}} = Ae_{\text{ВХ}} + Be_{\text{ВХ}}$  ( $A, B$  – постоянные).

8. Нарисуйте структурную схему типичной системы с обратной связью и опишите алгоритм её работы.

9. Система регулирования температуры имеет температурный диапазон от минус 20 до плюс 80 °С. При установке шкалы регулятора на 28 °С измеренная температура составила 26,5 °С. Вычислите точность в процентах к установке шкалы, а также точность в процентах ко всему температурному диапазону.

10. Система регулирования по положению имеет чувствительность 5 мм/В. Какое изменение входной величины приведет к изменению положения на 89 мм? Нарисуйте график чувствительности.

11. Задано дифференциальное уравнение, описывающее работу устройства:  $10 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = 3x(t)$ . Найдите передаточную функцию. Постройте амплитудно-частотную и фазочастотную характеристики.

12. Дана передаточная функция системы  $W(p) = \frac{p}{p^2 + 5p + 6}$ . Найдите обратное преобразование Лапласа.

13. Изобразите операционную структурную схему для реализации следующих зависимостей:

а)  $U_{\text{ВЫХ}} = 3U_1 + U_2 - 3(U_2 - U_1)$ ;

б)  $U_{\text{ВЫХ}} = U_1 + 2U_2 + 4U_3 + \dots + 2^{n-1}U_n$ ;

в)  $T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t)$ .

14. Опишите два типа цифровых дисплеев и сравните их по основным параметрам.

15. Максимальная скорость установления для усилителя с единичным коэффициентом усиления составляет 10 В/мкс. На усилитель подается синусоидальное напряжение  $e_{\text{ВХ}} = 10 \sin \omega t$  ( $f = 200$  кГц). Будет ли это напряжение ослаблено?

(Вычислите максимальную скорость изменения синусоидального напряжения и сравните её с заданной величиной.)

16. Десятиканальный аналоговый мультиплексор и усилитель выборки и запоминания должны обеспечивать выборку напряжения амплитудой 5 В с максимальным темпом 1 кГц. Ошибка выборки не должна превышать 0,1 % полной амплитуды. Укажите, каким требованиям по параметрам должны отвечать мультиплексор и усилитель выборки и запоминания. Разработайте полную структурную схему устройства. (Для решения используйте литературу из списка рекомендуемой.)

17. Цифроаналоговый преобразователь производит преобразование 12-разрядного информационного слова в напряжение. Наибольшему числу соответствует напряжение 10 В. Точность преобразования составляет  $\pm 0,1$  %. Определите разрешающую способность ЦАП в процентах. Выразите разрешающую способность через величину напряжения. Определите допуск (предельный) на сопротивления резистивной части схемы. (Для решения используйте литературу из списка рекомендуемой.)

18. Нарисуйте структурную схему АЦП и определите его основные параметры при условии, что устройство должно отвечать следующим требованиям: точность 0,5 % полной амплитуды (10 В); скорость установления преобразуемого сигнала 10 В/мкс. В систему входит усилитель выборки и запоминания. Учтите, что нет смысла делать число разрядов преобразователя более 14. Наименьшее время преобразования составляет около 2 мкс.

19. Объясните действие АМ-приемника с гетеродином. Нарисуйте его структурную схему.

20. Приведите примеры частотного уплотнения каналов, опишите структурную схему.

21. Приведите примеры временного уплотнения каналов, опишите структурную схему.

22. Сигнал с полосой 100–1000 Гц необходимо передать с использованием амплитудно-импульсной модуляции. Какова должна быть частота импульсов, если избегать чрезмерного искажения сигналов (не более 5 %) и слишком высокой частоты выборки? Объясните ваш выбор.

23. Приведите примеры использования телеметрии в системах контроля и управления. Нарисуйте структурную схему системы контроля бортовой аппаратуры корабля, использующей методы телеметрии.

24. Работа измерителя уровня бензина в старом автомобиле заключается в измерении тока через переменное сопротивление, регулируемое поплавком. Поплавок перемещается при изменении уровня бензина. Опишите систему и нарисуйте её функциональную схему. Является ли она системой с обратной связью? Опишите основные недостатки системы. Определите источники ошибок и оцените общую точность системы.

25. Опишите и разработайте структурную схему 10-канальной системы контроля температуры, использующей 10 датчиков температуры, один аналогово-цифровой преобразователь и 10 цифровых индикаторов. Выберите подходящий

датчик для диапазона температур 0–100 °С. Подберите эффективную телеметрическую систему для передачи температурных данных.

26. Пользуясь структурой пункта 4.4.5 (ТС: определение; назначение; классификация; основные технические характеристики; структурная электрическая схема; описание алгоритма работы; перспективы развития), исследуйте следующие ТС: системы электросвязи; телевизионные системы; системы радиоэлектронной борьбы; системы телеметрии; ретрансляционные системы; радионавигационные системы. Сделайте презентацию с докладом на семинаре.

27. Четыре радаров передают в цифровую схему логические сигналы  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$ , которые могут быть равны 1 или 0. Сигнал  $A$  первого радаров имеет состояние 1, если он фиксирует самолет. Вторым радаров выдает  $B=1$ , если самолет летит по направлению к радаров на высоте не менее 2000 м, третий радар фиксирует изменение курса. Он выдает  $C=0$ , если курс самолета меняется в течение интервала времени  $\Delta t$ . Если одновременно ещё один самолет влетает в воздушное пространство, четвертым радаров выдает  $D=1$ . Схема должна работать следующим образом. На выходе  $Z$  появляется сигнал логической единицы, если зафиксирован самолет, который летит к радаров на высоте до 2000 м с неизменным курсом и в зоне действия радаров не наблюдается одновременно ещё один самолет, или радар фиксирует самолет, летящий на высоте более 2000 м, с неизменным в течение времени  $\Delta t$  курсом, но в зоне действия радаров зафиксирован ещё один самолет. Требуется синтезировать максимально простую схему, удовлетворяющую описанному техническому заданию. Схема должна быть реализована в базисе ИЛИ-НЕ.

### Рекомендуемая литература

1. Крук Б.И. Телекоммуникационные системы и сети : учеб. пособие : в 3 т. Т. 1: Современные технологии / Б.И. Крук, В.Н. Попантопуло, В.П. Шувалов. – Изд. 3-е, испр. и доп. – М. : Горячая линия – Телеком, 2003. – 647 с.

2. Телекоммуникационные системы и сети : учеб. пособие : в 3 т. Т. 2: Радиосвязь, радиовещание, телевидение / Г.П. Катунин, Г.В. Мамчев, В.Н. Попантопуло [и др.] ; под ред. проф. В.П. Шувалова – Изд. 2-е, испр. и доп. – М. : Горячая линия – Телеком, 2004. – 672 с.

3. Телекоммуникационные системы и сети : учеб. пособие: в 3 т. Т. 3: Мультисервисные сети / В.В. Величко, Е.А. Субботин, В.П. Шувалов [и др.] ; под ред. проф. В.П. Шувалова. – М. : Горячая линия – Телеком, 2005. – 592 с.

4. Тихонов В.И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем : учеб. пособие для вузов / В.И. Тихонов. – М. : Радио и связь, 1991. – 608 с.

5. Топчеев Ю.И. Задачник по теории автоматического регулирования : учеб. пособие для вузов / Ю.И. Топчеев, А.П. Цыпляков. – М. : Машиностроение, 1977. – 592 с.

6. Анализ и проектирование ВЧ и цифровых систем с помощью Keysight SystemVue : учеб. пособие. – Keysight Technologies, 2014. – 136 с.

7. Каганов В.И. Радиоэлектронные системы автоматического управления. Компьютеризированный курс : учеб. пособие для вузов / В.И. Каганов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2009. – 432 с.
8. Каганов В.И. Радиотехнические цепи и сигналы. Компьютеризированный курс : учеб. пособие / В.И. Каганов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Форум : Инфра-М, 2018. – 498 с.
9. Проектирование радиопередатчиков : учеб. пособие для вузов / В.В. Шахгильдян, М.С. Шумилин, В.Б. Козырев [и др.] ; под ред. В.В. Шахгильдяна. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 2000. – 656 с.
10. Радиопередающие устройства : учеб. для вузов / В.В. Шахгильдян, В.Б. Козырев, А.А. Ляховкин [и др.] ; под ред. В.В. Шахгильдяна. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 2003. – 560 с.
11. Румянцев К.Е. Радиоприёмные устройства : учеб. / К.Е. Румянцев. – М. : Академия, 2006. – 336 с.
12. Румянцев К.Е. Прием и обработка сигналов: сборник задач и упражнений : учеб. пособие для вузов / К.Е. Румянцев. – М. : Академия, 2006. – 368 с.
13. Щепетов А.Г. Основы проектирования приборов и систем: учебник и практикум для академического бакалавриата / А.Г. Щепетов. – М. : Юрайт, 2016. – 458 с.
14. Шibaев А.А. Схемо- и системотехника электронных средств : учеб. пособие / А.А. Шibaев. – Томск : Эль Контент, 2014. – 190 с.
15. Андреев В.А. Направляющие системы электросвязи : учеб. для вузов : в 2 т. Т. 1: Теория передачи и влияния / В.А. Андреев, Э.Л. Портнов, Л.Н. Кочановский ; под ред. В.А. Андреева. – 7-е изд., перераб. и доп. – М. : Горячая линия – Телеком, 2009. – 424 с.
16. Направляющие системы электросвязи : учеб. для вузов : в 2 т. Т. 2: Проектирование, строительство и техническая эксплуатация / В.А. Андреев, А.В. Бурдин, Л.Н. Кочановский [и др.] ; под ред. В.А. Андреева. – 7-е изд., перераб. и доп. – М. : Горячая линия – Телеком, 2010. – 424 с.
17. Акустика : учеб. для вузов / Ш.Я. Вахитов, Ю.А. Ковалгин, А.А. Фадеев [и др.] ; под ред. проф. Ю.А. Ковалгина. – М. : Горячая линия – Телеком, 2009. – 660 с.
18. Электроакустика и звуковое вещание : учеб. пособие для вузов / И.А. Алдошина, Э.И. Вологдин, А.П. Ефимов [и др.] ; под ред. Ю.А. Ковалгина. – М. : Горячая линия – Телеком, Радио и связь, 2007. – 872 с.
19. Колосовский Е.А. Устройства приема и обработки сигналов : учеб. пособие для вузов / Е.А. Колосовский. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 456 с.
20. Костиков В.Г. Источники электропитания электронных средств. Схемотехника и конструирование : учеб. для вузов / В.Г. Костиков, Е.М. Парфенов, В.А. Шахнов. – 2-е изд. – М. : Горячая линия – Телеком, 2001. – 344 с.
21. Крухмалев В.В. Цифровые системы связи : учеб. пособие / В.В. Крухмалев, В.Н. Гордиенко, А.Д. Моченов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 351 с.
22. Мамчев Г.В. Основы радиосвязи и телевидения : учеб. пособие / Г.В. Мамчев. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 416 с.

23. Мамчев Г.В. Теория и практика наземного цифрового телевизионного вещания : учеб. пособие для вузов / Г.В. Мамчев. – М. : Горячая линия – Телеком, 2012. – 340 с.
24. Радиосистемы передачи информации : учеб. пособие для вузов / В.А. Васин, В.В. Калмыков, Ю.Н. Себекин [и др.] ; под ред. И.Б. Федорова, В.В. Калмыкова. – М. : Горячая линия – Телеком, 2005. – 472 с.
25. Брахман Т.Р. Многокритериальность и выбор альтернативы в технике / Т.Р. Брахман. – М. : Радио и связь, 1984. – 288 с.
26. Честнат Г. Техника больших систем (средства системотехники) / Г. Честнат ; пер. с англ. И.Н. Васильева, Е.Н. Дубровского, А.С. Манделя, В.Ю. Невраева ; под ред. О.И. Авена. – М. : Энергия, 1969. – 686 с.
27. Сурмин Ю.П. Теория систем и системный анализ : учеб.-метод. пособие / Ю.П. Сурмин. – Киев : МАУП, 2003.
28. Ротхаммель К. Антенны : в 2 т. / К. Ротхаммель. – Изд. 11-е, испр. – М. : Додека, 2005.
29. Электронные промышленные устройства : учеб. для студ. вузов спец. «Промышленная электроника» / В.И. Васильев, Ю.М. Гусев, В.Н. Миронов [и др.]. – М. : Высш. шк., 1988. – 303 с.
30. Мишенков С.Л. Электроакустика и звуковое вещание: конспект лекций : учеб. пособие для вузов / С.Л. Мишенков, О.Б. Попов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2011. – 156 с.
31. Каганов В.И. Колебания и волны в природе и технике. Компьютеризированный курс : учеб. пособие для вузов / В.И. Каганов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2008. – 336 с.
32. Колосовский Е.А. Устройства приема и обработки сигналов : учеб. пособие для вузов / Е.А. Колосовский. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 456 с.
33. Основы электроники, радиотехники и связи : учеб. пособие для вузов / А.Д. Гуменюк, В.И. Журавлев, Ю.Ю. Мартюшев [и др.] ; под ред. Г.Д. Петрухина. – М. : Горячая линия – Телеком, 2008. – 480 с.
34. Каганов В.И. Основы радиоэлектроники и связи : учеб. пособие для вузов / В.И. Каганов, В.К. Битюков. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 542 с.
35. Аржанов В.А. Проектирование радиоприемных устройств : учеб. пособие / В.А. Аржанов, А.П. Науменко. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2008. – 312 с.
36. Ворона В.А. Радиопередающие устройства. Основы теории и расчета : учеб. пособие для вузов / В.А. Ворона. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 384 с.
37. Крук Б.И. Основы спектрального анализа : учеб. пособие для вузов / Б.И. Крук, О.Б. Журавлева. – М. : Горячая линия – Телеком, 2013. – 148 с.
38. Качала В.В. Основы теории систем и системного анализа : учеб. пособие для вузов / В.В. Качала. – 2-е изд., испр. – М. : Горячая линия – Телеком, 2012. – 210 с.
39. Spiridon S. Toward 5G Software Defined Radio Receiver Front-Ends / S. Spiridon // Springer briefs in electrical and computer engineering. – Springer. – 2016. – 112 p.

40. Palicot J. Radio Engineering: From Software to Cognitive Radio / J. Palicot. – Wiley, 2011. – 384 p.
41. Arslan H. Cognitive Radio, Software Defined Radio, and Adaptive Wireless Systems / H. Arslan // Signals and Communication Technology. – Springer. – 2007. – 476 p.
42. Van der Perre L. Green Software Defined Radios Enabling seamless connectivity while saving on hardware and energy / L. Van der Perre, J. Craninckx, A. Dejonghe. – Springer. – 2009. – 161 p.
43. Giannini V. Baseband Analog Circuits for Software Defined Radio / V. Giannini, J. Craninckx, A. Baschirotto // Analog Circuits and Signal Processing. – Springer. – 2008. – 151 p.
44. Шейнголд Д. Справочник по нелинейным схемам. Проектирование устройств на базе аналоговых функциональных модулей и интегральных схем / под ред. Д. Шейнголда ; пер. с англ. под ред. В.В. Малинина. – М. : Мир, 1977. – 530 с.
45. Электронные приборы и устройства на их основе: Справочная книга / Ю.А. Быстров, С.А. Гамкрелидзе, Е.Б. Иссерлин [и др.]. – М. : РадиоСофт, 2002. – 656 с.
46. Рег Дж. Промышленная электроника / Дж. Рег. – М. : ДМК Пресс, 2011. – 1136 с.
47. Бриндли К. Карманный справочник инженера электронной техники : пер. с англ. / К. Бриндли, Дж. Карр. – М. : Додэка-XXI, 2002. – 480 с.
48. Дэвис Дж. Карманный справочник радиоинженера : пер. с англ. / Дж. Дэвис, Дж. Карр. – М. : Додэка-XXI, 2002. – 544 с.
49. Алейников А.Ф. Датчики (перспективные направления развития) : учеб. пособие / А.Ф. Алейников, В.А., Гридчин М.П. Цапенко ; под ред. проф. М.П. Цапенко. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2001. – 176 с.
50. Сторожев В.В. Системотехника и мехатроника технологических машин и оборудования : моногр. / В.В. Сторожев, Н.А. Феоктистов ; под ред. д-ра техн. наук, проф. Н.А. Феоктистова. – М. : Дашков и К°, 2015. – 412 с.

### **Список литературы**

1. Перегудов Ф.И. Введение в системный анализ : учеб. пособие для вузов / Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасенко. – М. : Высш. шк., 1989. – 367 с.
2. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества : учеб. пособие для студентов вузов / А.И. Половинкин. – М. : Машиностроение, 1988. – 368 с.
3. Коллер Р. Методы конструирования машин, приборов и аппаратов : пер. с англ. / Р. Коллер. – М. : Мир, 1980. – 132 с.
4. Электронные приборы и устройства на их основе : Справочная книга / Ю.А. Быстров, С.А. Гамкрелидзе, Е.Б. Иссерлин [и др.]. – М. : РадиоСофт, 2002. – 656 с.



5. Радиотехника: Энциклопедия / под ред. Ю.Л. Мазора, Е.А. Мачусского, В.И. Правды. – М. : Додэка-XXI, 2010. – 944 с.
6. Электроакустика и звуковое вещание : учеб. пособие для вузов / И.А. Алдошина, Э.И. Вологдин, А.П. Ефимов [и др.] ; под ред. Ю.А. Ковалгина. – М. : Горячая линия–Телеком, Радио и связь, 2007. – 872 с.
7. Нефедов В.И. Основы радиоэлектроники и связи : учеб. пособие / В.И. Нефедов, А.С. Сигов ; под ред. В.И. Нефедова. – М. : Высш. шк., 2009. – 735 с.
8. Яценков В.С. Секреты зарубежных радиосхем : учебник-справочник для мастера и любителя / В.С. Яценков. – М. : Майор, 2004. – 112 с.
9. Зорин А.Ю. Условно-графические обозначения на электрических схемах / А.Ю. Зорин ; под ред. А.И. Питолина. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007. – 74 с.
10. Ярушин С.Г. Проектирование нестандартного оборудования : учеб. / С.Г. Ярушин, А.Г. Схиртладзе. – 2-е изд, перераб. и доп. – Пермь : Пермский гос. техн. ун-т, 2004. – 440 с.
11. Николаев В.И. Системотехника: методы и приложения / В.И. Николаев, В.М. Брук. – Л. : Машиностроение, 1985. – 199 с.
12. Джонс Д. Методы проектирования / Д. Джонс. – М. : Мир, 1986.
13. Хубка В. Теория технических систем / В. Хубка ; пер. с нем. В.В. Ачкасова, Н.И. Зук, Е.Б. Матвеевой ; под ред. К.А. Люшинского. – М. : Мир, 1987. – 209 с.
14. Корис Р. Справочник инженера-схемотехника / Р. Корис, Х. Шмидт-Вальтер. – М. : Техносфера, 2008. – 608 с.
15. Галкин В.А. Основы программно-конфигурируемого радио / В.А. Галкин. – М. : Горячая линия–Телеком, 2015. – 372 с.
16. Болтон У. Карманный справочник инженера-метролога / У. Болтон. – М. : Додэка-XXI, 2002. – 384 с.
17. Аш Ж. Датчики измерительных систем : пер. с фр. : в 2 кн. Кн. 1 / Ж. Аш. – М. : Мир, 1992. – 480 с.
18. Fraden J. Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications / J. Fraden. – 5<sup>th</sup> ed. – Springer, 2016. – 765 p.
19. Топильский В.Б. Схемотехника измерительных устройств / В.Б. Топильский. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 232 с.
20. Алиев Т.М. Измерительная техника / Т.М. Алиев, А.А. Тер-Хачатуров. – М. : Высш. шк., 1991. – 384 с.
21. Костиков В.Г. Источники электропитания электронных средств. Схемотехника и конструирование : учеб. для вузов / В.Г. Костиков, Е.М. Парфенов, В.А. Шахнов. – 2-е изд. – М. : Горячая линия – Телеком, 2001. – 344 с.
22. Шибаев А.А. Схемо- и системотехника электронных средств : учеб. пособие / А.А. Шибаев. – Томск : Эль Контент, 2014. – 190 с.
23. Бойт К. Цифровая электроника / К. Бойт. – М. : Техносфера, 2007. – 472 с.
24. Бабич Н.П. Компьютерная схемотехника. Методы построения и проектирования: учеб. пособие / Н.П. Бабич, И.А. Жуков. – К. : МК-Пресс, 2004. – 576 с.

25. Микропроцессорные системы : учеб. пособие для вузов / Е.К. Александров, Р.И. Грушвицкий, М.С. Куприянов [и др.] ; под общ. ред. Д.В. Пузанкова. – СПб. : Политехника, 2002. – 935 с.
26. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Закон\\_Мура](https://ru.wikipedia.org/wiki/Закон_Мура)
27. В мире науки. – 1983. – № 08.
28. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп ; пер. с англ. Б.И. Копылова. – М. : Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.

## 5 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ И РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ. СИСТЕМНЫЙ УРОВЕНЬ

Машинная программа выполняет то,  
что вы ей приказали делать, а не то,  
что вы бы хотели, чтобы она делала.

*Третий закон Грида (Мэрфология)*

Люди с психологией машинопоклонников часто питают иллюзию,  
будто в высокоавтоматизированном мире потребуется  
меньше изобретательности, чем в наше время;  
они надеются, что мир автоматов возьмет на себя  
наиболее трудную часть нашей умственной деятельности...  
Это явное заблуждение.

*Норберт Винер*

Метод – это место встречи искусства и науки.

*Эдвард Джордж Бульвер-Литтон*

### 5.1 Постановка задачи

Рассмотрим общие вопросы постановки задач проектирования ЭРЭС, полагая, что оно осуществляется посредством САПР в соответствии со схемой типового маршрута.

Техническое задание на проектирование обычно представляет собой вербальное (словесное) описание целей и задач проектирования данного объекта. Эти задачи носят оптимизационный характер. Для осуществления проектирования конкретного ТО необходима его математическая модель и формализация понятия «оптимальный». В этом и заключается существо постановки задачи.

Результатом выполнения маршрута проектирования являются проектное решение и проектные документы, содержащие информацию о структуре и выходных параметрах технического объекта, а также о параметрах его элементов (внутренних параметрах объекта) при заданных внешних параметрах.

В общем случае задача проектирования имеет следующую математическую формулировку: определить структуру и внутренние параметры технического объекта, доставляющие экстремум некоторой скалярной функции  $F(\vec{X})$  при заданных ограничениях  $\bar{\varphi}(\vec{X}) > 0$ ,  $\bar{\psi}(\vec{X}) = 0$ , где  $\vec{X}$  – вектор оптимизируемых параметров.

Функцию  $F(\vec{X})$  называют *целевой функцией* или *функцией качества*. Она количественно выражает качество ТО. Эффективность и качество функционирования объекта характеризуются его выходными параметрами, поэтому они выступают в роли *критериев оптимальности*. Так как физические свойства объекта характеризуются множеством выходных параметров, то задача оказывается *многокритериальной*.

Процедура постановки задачи проектирования носит неформальный характер и включает следующие этапы: выбор критериев оптимальности, формирование целевой функции, выбор управляемых (оптимизируемых) параметров, назначение ограничений, нормирование управляемых и выходных параметров.

Многокритериальность задачи создает сложности формирования целевой функции и приводит к множеству возможных решений. Выделение некоторого подмножества решений задачи относится к проблеме выбора и принятия решения. Задачей принятия решения называют кортеж  $\alpha = \langle W, \theta \rangle$ , где  $W$  – множество вариантов решений задачи;  $\theta$  – принцип оптимальности, дающий представление о качестве вариантов, в простейшем случае – правило предпочтения вариантов. Решением задачи  $\alpha$  называют множество  $W_{OK} \subseteq W$ , полученное на основе принципа оптимальности.

Задачи принятия решений классифицируют по наличию информации о множестве  $W$  и принципе оптимальности  $\theta$ .

Если  $W$  и  $\theta$  неизвестны, возникает *общая задача принятия решения*. Это наиболее сложная задача, так как данные для получения множества вариантов  $W_{OK}$  определяют в процессе ее решения. Задачу с известным  $\theta$  называют *задачей выбора*, а задачу с известными  $W$  и  $\theta$  – *задачей оптимизации*.

Построение множества  $W$  в общем случае является задачей выбора. Следовательно, общую задачу принятия решения можно свести к решению последовательных задач выбора. Информацию о физических свойствах вариантов  $W$  при этом доставляет САПР, а выбор осуществляет лицо, принимающее решение (ЛПР), т.е. проектировщик.

Сложность задачи принятия решения связана с условиями неопределенности, характерными для начальных стадий проектирования ТО. Это приводит к необходимости многократного повторения процедур проектирования по мере раскрытия неопределенностей.

Раздел математической теории принятия решений в условиях неполной определенности называют *теорией статистических решений* [1].

Итак, на входе этапа, заключающегося в проведении компьютерного моделирования проектируемых ЭРЭС, имеем следующие исходные данные:

– множество вариантов структурных и функциональных электрических схем проектируемого ЭРЭС;

– дополнительные требования к объекту проектирования, представленные в виде доработанного варианта технического задания.

Результатами выполнения данного этапа должны быть:

- математическая и компьютерная модели ОП на системном уровне;
- выбранный вариант структуры проектируемой ЭРЭС.

## 5.2 Требования и моделирование систем

Важно понимать взаимосвязь между управлением требованиями и моделированием ТС. Они в равной степени поддерживают друг друга, но не следует ставить между ними знак равенства. На рисунке 5.1 эта взаимосвязь иллюстрируется на примере сэндвича. Здесь управление требованиями – это «хлеб с маслом» цикла разработки, а в качестве «начинки» выступает моделирование систем, которое посредством операций анализа и выработки вариантов проектного решения связывает между собой соседние уровни требований [2].



Рисунок 5.1 – «Сэндвич» системной инженерии

Иногда речь заходит о моделировании требований. Такой термин является некорректным. Моделируются проектные решения, относящиеся к системе, а не требования к ней. Моделирование поддерживает проектную и конструкторскую деятельность, то есть этап, на котором выполняется основная часть творческой работы. Моделирование помогает инженеру «вжиться» в систему в степени, достаточной для декомпозиции требований на определенном уровне, чтобы перейти на следующий, более низкий уровень. Сами требования представляют собой моментальный снимок полной картины того, что необходимо на каждом уровне, с повышением степени детализации по мере перехода на более низкие уровни.

Модель никогда не даёт полной информации о системе, в противном случае её нельзя было бы назвать моделью. Поэтому для получения как можно более полного представления о множестве разнообразных свойств системы часто используется несколько различных, возможно, взаимосвязанных моделей. Для свойств, которые невозможно промоделировать, остается описание на уровне требований, которые в подобных случаях выражаются преимущественно в вербально-дескриптивной форме.

Модель является абстрактным представлением системы. Оно целенаправленно отражает только выделенные свойства системы, оставляя без внимания все её прочие качества. В этом смысле абстракцию можно считать операцией отсечения всего, что отвлекает внимание, то есть отказ от подробностей, которые, являясь важными сами по себе, не имеют отношения к рассматриваемой модели. Преимущество такого подхода заключается в том, что он требует сбора, обработки, организации и анализа гораздо меньшего объёма информации. При этом используются различные специализированные методики, наиболее уместные для изучаемых аспектов.

Там, где необходимо управлять большими объемами сложной информации, моделирование предоставляет средства укрупнения, позволяющие объединять подмножества данных для достижения определенной цели, и средства, позволяющие подняться на более высокие уровни, чтобы оценить все картину в целом. Это обеспечивает сопровождение всей системы посредством сосредоточения именно на том небольшом объеме информации, который необходим в текущий момент времени.

На рисунке 5.2 показана взаимосвязь между ролями, которые исполняют требования и моделирование систем. Модель помогает системному аналитику, ответственному за работу с требованиями, анализировать требования на определенном уровне с целью:

- обсуждения с заказчиком / потребителем в интересах улучшения взаимопонимания в отношении создаваемой системы;
- убедиться в наличии желаемых эмерджентных свойств (и отсутствии нежелательных);
- определить способы удовлетворения требований посредством порождения новой группы требований на следующем, более низком уровне.

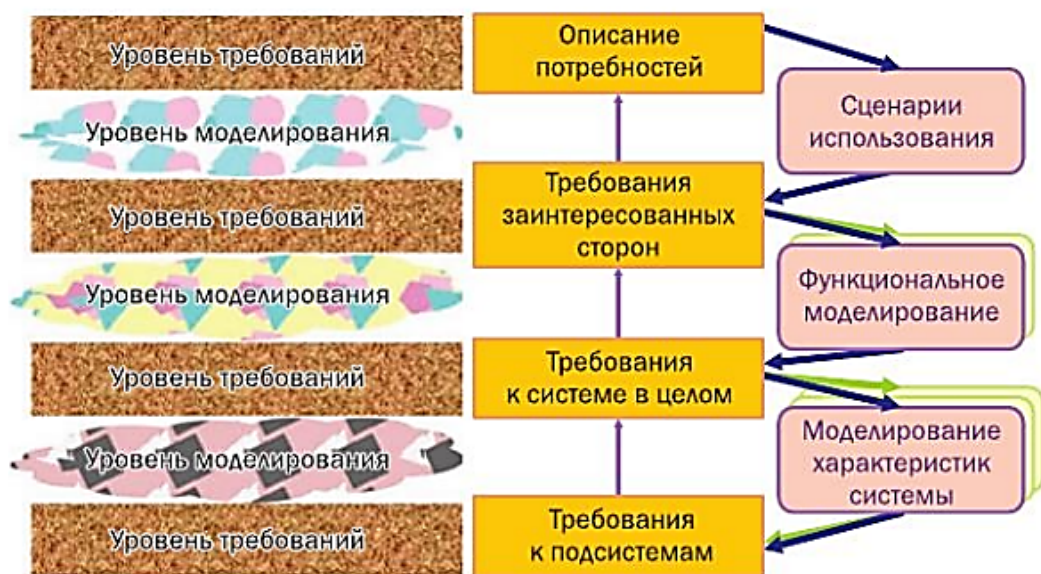


Рисунок 5.2 – Требования и моделирование

Природа используемых моделей будет меняться от уровня к уровню. На самом верхнем уровне применяются модели, подобные «сценарию использования системы заинтересованными сторонами», при этом основная цель состоит в получении исходной версии описания требований заинтересованных сторон. Впоследствии возможно применение различных типов моделей функционирования, которые служат для установления требований к системе на основе требований заинтересованных сторон. В случае ПО (также применимы и к ТС) к подобным моделям можно отнести UML-диаграммы: диаграммы классов (class diagrams), диаграммы последовательностей сообщений (message sequence charts) и диаграммы состояний (state charts).

При переходе от требований к системе в целом к описанию архитектуры все внимание концентрируется на характеристиках системы. Для уверенности в том, что выбранная архитектура даёт возможность выполнения всей совокупности как функциональных, так и других требований, можно воспользоваться множеством различных моделей.

---

*Например, для моделирования поведения могут использоваться модели теории очередей, для моделирования аэродинамических характеристик – результаты продувки в аэродинамической трубе, наконец, для моделирования транспортных потоков – модели теории расписаний.*

---

Из приведенных примеров становится понятно, что природа моделей также меняется от одной области применения к другой. Математическая модель расписания подходит, когда создается авиатранспортная или железнодорожная система, но не для проектирования летательного аппарата, где более уместно моделирование аэродинамических качеств (разумеется, аэродинамические испытания весьма важны и для высокоскоростных поездов). Применение диаграммы последовательностей сообщений уместно для систем связи, но для приложений, обрабатывающих большие объемы данных, лучше использовать методики моделирования, ориентированные на данные, например диаграммы типа «сущность–связь».

Несмотря на такое разнообразие моделей, общие принципы управления требованиями остаются неизменными для любых приложений.

## **5.3 Определение, цели и задачи моделирования электронных и радиоэлектронных средств на системном уровне**

### **5.3.1 Значение моделирования**

Как следует из вышеизложенного, центральным элементом деятельности, ведущей к созданию качественной технической системы, является моделирование. Модели позволяют наглядно продемонстрировать желаемую структуру и поведение системы. Они также необходимы для визуализации и управления её архитектурой. Модели помогают добиться лучшего понимания создаваемой технической системы,

что зачастую приводит к её упрощению и возможности повторного использования. Наконец, модели нужны для минимизации рисков [3].

Если необходимо создать сложную техническую систему, то задача не сводится к разработке самой сложной её архитектуры. Проблема в том, чтобы разработать правильную архитектуру, причём так, чтобы её размер был минимален. При таком подходе разработка качественной ТС сводится к вопросам выбора архитектуры, подходящих инструментов и средств управления процессом.

Моделирование – это устоявшаяся и повсеместно принятая инженерная методика, которая позволяет проверить теории и испытать новые идеи с минимальным риском и затратами.

Итак, что же такое модель? В самом простом и общем смысле слова модель – это упрощённое представление реальности. Модель – это чертёж системы: в неё может входить как детальный план, так и более абстрактное представление системы. Хорошая модель всегда включает элементы, существенно влияющие на результат, и не включает те, которые малозначимы на данном уровне абстракции. Каждая система может быть описана с разных точек зрения, для чего используются различные модели, каждая из которых, следовательно, является семантически замкнутой абстракцией системы. Модель может быть структурной, подчеркивающей организацию системы, или поведенческой, то есть отражающей её динамику.

---

*Модель в широком смысле – любой образ, аналог (мысленный или условный): изображение, описание, схема, чертёж, график, план, карта и т.п.) какого-либо объекта, процесса или явления (оригинала данной модели).*

---

Зачем мы моделируем? На это есть одна фундаментальная причина. Мы разрабатываем модели для того, чтобы лучше понимать разрабатываемую систему.

Моделирование позволяет решить четыре различных задачи:

- визуализировать систему в её текущем или желательном для нас состоянии;
- определить структуру или поведение системы;
- получить шаблон, позволяющий затем сконструировать систему;
- документировать принимаемые решения, используя полученные модели.

Моделирование предназначено не только для создания больших систем. Чем больше и сложнее система, тем большее значение приобретает моделирование при её разработке. Дело в том, что моделировать сложную систему необходимо, поскольку иначе мы не можем воспринять её как единое целое.

Задача проектирования осложняется ещё и тем, что современные технические системы, работающие на принципах электроники, радиоэлектроники и радиотехники, становятся все более программно-насыщенными и программно-управляемыми. Сложные технические системы управляются сложными программными системами (ПС). Системный инженер должен быть компетентен не только в вопросах разработки математического и физического моделирования ЭРЭС, но и в вопросах разработки и моделирования программных систем. Поэтому, помимо средств математического и физического моделирования технических процессов и технических



систем, ему необходимо знать ещё языки моделирования, с помощью которых можно создавать модели программных систем. В настоящее время существуют универсальные языки моделирования, отвечающие данным требованиям и позволяющие моделировать как технические, так и программные системы. Их мы также рассмотрим далее.

Компьютерное моделирование ЭРЭС на системном уровне предназначено для определения и выбора функциональных принципов действия и функциональных структур, на основе которых будет создана ТС, для проверки правильности и надежности принятых проектных решений по определению и выбору архитектуры будущей системы, а также для валидации разработанной концепции системы без рассмотрения специфики её работы на принципиальном физическом уровне. Последнее становится возможным благодаря свойствам системотехнической и схемотехнической инвариантности технических систем, в частности ЭРЭС.

Свойство *системотехнической инвариантности* ЭРЭС, как говорилось выше, заключается в том, что конкретная целевая функция системы может быть реализована несколькими способами на уровне функциональной структуры этой системы [4].

---

*Например, целевую функцию радиоприёма информации можно осуществить с помощью радиоприёмных устройств разных типов: детекторного, прямого усиления, супергетеродинного, сверхрегенеративного, программно-управляемого (software defined radio или SDR), у каждого из которых будет своя функциональная структура, отражаемая в структурной электрической схеме.*

---

Свойство *схемотехнической инвариантности* ЭРЭС заключается в том, что конкретная техническая функция отдельного элементарного компонента (функционального узла) структуры системы может быть реализована несколькими способами на уровне физического принципа действия.

---

*Например, усилительный функциональный узел может быть реализован на электровакуумных лампах, полевых или биполярных транзисторах, операционных усилителях, специализированных интегральных микросхемах и даже на туннельных диодах, что отражается на принципиальной электрической схеме этого функционального узла.*

---

В процессе проектирования, еще до создания реального образца ТС, для исследования её характеристик может быть использована компьютерная модель, основанная на математическом описании системы. При имитационном моделировании модель ставится в те же условия и подвергается тем же внешним воздействиям, при которых будет работать реальная система [5].

В распоряжении инженера имеются различные уровни достижимой точности моделирования. На первых этапах синтеза весьма эффективными являются интерактивные прикладные пакеты САПР. При этом не так важно быстродействие

компьютера, как то, сколько времени потребуется инженеру для получения начального решения и доведения его итеративным путём до окончательного проекта. Решающее значение здесь имеют качественные графические средства.

Следует отметить основные преимущества компьютерного моделирования.

1. Поведение системы можно наблюдать в самых разных условиях.
2. Путем исследования модели можно предсказать, как поведет себя реальная система при натурных испытаниях.
3. По данным испытаний можно сделать некоторые умозаключения относительно систем, которые ещё предстоит синтезировать.
4. Всесторонние испытания системы можно выполнить за сравнительно короткий промежуток времени.
5. Результаты моделирования можно получить с гораздо меньшими затратами, чем при натурном эксперименте.
6. Можно изучить поведение системы в таких гипотетических условиях, которые в настоящее время вряд ли могут реально иметь место.
7. Компьютерное моделирование часто является единственным или безопасным методом анализа поведения системы.

Анализ и синтез ТС осуществляется более эффективно, если сопровождается имитационным моделированием (рисунок 5.3).

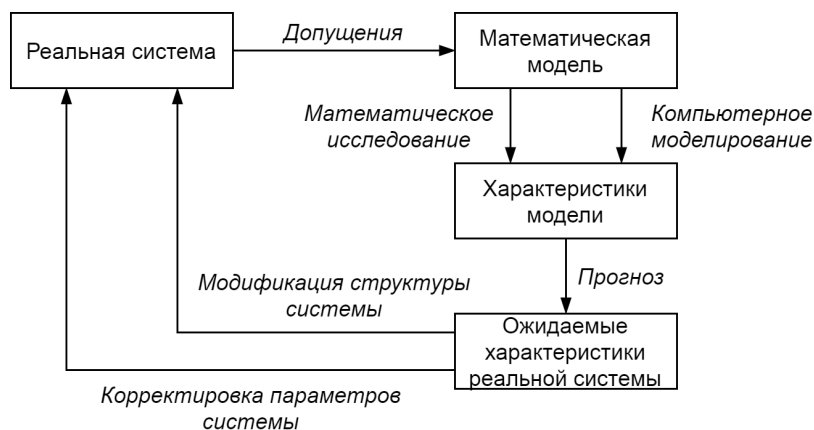


Рисунок 5.3 – Анализ и синтез технической системы с использованием ее модели

### 5.3.2 Структура стадии моделирования

Моделирование является одной из стадий проектирования системы и заключается в построении, анализе и оптимизации моделей.

Модель выступает как образ будущей системы. Модели делятся на познавательные и прагматические («практические») [6].

Прагматические модели проектируемых систем, так же как и сами системы, могут быть на разных уровнях иерархии.

Прагматические модели являются способом организации практических действий, способом представления как бы образцово правильных действий и их результатов, то есть являются рабочим представлением, мысленным образцом будущей системы. Таким образом, прагматические модели носят нормативный характер для дальнейшей деятельности, играют роль стандарта, эталона, под который «подгоняется» в дальнейшем как сама деятельность, так и ее результаты.

---

*Примерами прагматических моделей могут быть планы и программы действий, уставы организаций, кодексы законов, рабочие чертежи, отраслевые стандарты, экзаменационные требования и т.д.*

---

Стадия моделирования включает в себя этапы:

- построения моделей;
- оптимизации;
- выбора (принятия решения).

**Этап построения моделей.** Для создания моделей у человека есть всего два типа «материалов» – средства сознания и средства окружающего материального мира. Соответственно этому модели делятся на абстрактные (идеальные) и материальные (реальные, вещественные).

Абстрактные модели являются идеальными конструкциями, построенными средствами мышления, сознания.

Абстрактные модели являются языковыми конструкциями. Абстрактные модели могут формироваться и передаваться другим людям средствами разных языков, языков разных уровней специализации (естественных, профессиональных, искусственных).

В результате получается иерархия языков и соответствующая иерархия типов моделей. На верхнем уровне этого спектра находятся модели, создаваемые средствами естественного языка, и так вплоть до моделей, имеющих максимально достижимую определенность и точность для сегодняшнего состояния данной отрасли профессиональной деятельности.

Математические (в строгом смысле) модели обладают абсолютной точностью. Но чтобы дойти до их использования в какой-либо области, необходимо получить достаточный для этого объем достоверных знаний. Нематематизированность многих общественных и гуманитарных областей не означает их ненаучности, а есть следствие познавательной сложности их предметов. В них модели строятся, как правило, с использованием средств естественного языка.

Можно выделить следующие функции моделирования:

- дескриптивную;
- прогностическую;
- нормативную.

Дескриптивная функция заключается в том, что за счет абстрагирования модели позволяют достаточно просто объяснить наблюдаемые на практике явления и процессы (другими словами, объяснить, почему мир устроен так). Успешные в этом

отношении модели становятся компонентами научных теорий и являются эффективным средством отражения их содержания (поэтому познавательную функцию моделирования можно рассматривать как составляющую дескриптивной функции).

Прогностическая функция моделирования отражает его возможность предсказывать будущие свойства и состояния моделируемых систем, то есть отвечать на вопрос «что будет?».

Нормативная функция моделирования заключается в получении ответа на вопрос «как должно быть?». Если, помимо состояния системы, заданы критерии оценки ее состояния, то за счет использования оптимизации возможно не только описать существующую систему, но и построить ее нормативный образ – желательный с точки зрения субъекта, интересы и предпочтения которого отражены используемыми критериями.

Нормативная функция моделирования тесно связана с решением задач управления, то есть с поиском ответа на вопрос «как добиться желаемого (состояния, свойств системы и т.д.)?».

Для того чтобы создаваемая модель соответствовала своему назначению, необходимо, чтобы она отвечала ряду требований, обеспечивающих ее функционирование (рисунок 5.4). Невыполнение этих требований лишает модель ее модельных свойств.

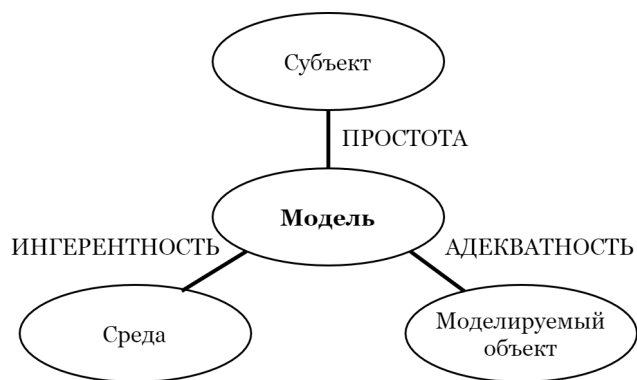


Рисунок 5.4 – Требования, предъявляемые к моделям

Первым таким требованием является ее ингерентность, то есть достаточная степень согласованности со средой, чтобы создаваемая модель (в соответствии с принципом коммуникативности) была согласована с культурной средой, в которой ей предстоит функционировать, входила бы в эту среду не как чужеродный элемент, а как естественная составная часть.

Другой аспект ингерентности модели состоит в том, что в ней должны быть предусмотрены не только «стыковочные узлы» со средой (интерфейсы), но и в самой среде должны быть созданы предпосылки, обеспечивающие функционирование будущей системы. То есть не только модель должна приспосабливаться к среде, но и среду необходимо приспособлять к модели будущей системы.

*Например, проблема внедрения банковских карт и банкоматов заключается не только в том, чтобы изготовить карты и повсеместно установить банкоматы, но и в том, чтобы научить и приучить население пользоваться ими.*

Второе требование – простота модели. С одной стороны, простота модели – ее неизбежное свойство: в модели невозможно зафиксировать все многообразие реальной ситуации.

С другой стороны, простота модели неизбежна из-за необходимости оперирования с ней, использования ее как рабочего инструмента, который должен быть обзорим и понятен, доступен каждому, кто будет участвовать в реализации модели.

Есть еще третий аспект требования простоты модели, который заключается в том, что чем проще модель, тем она ближе к моделируемой реальности и тем она удобнее для использования.

Следующее требование, предъявляемое к модели, – ее адекватность. Адекватность модели означает возможность с ее помощью достичь поставленной цели проекта согласно сформулированным критериям. Адекватность модели означает, что она полна, точна и истинна в той достаточной мере, которая позволяет достичь поставленной цели. Иногда удается (и это желательно) ввести некоторую меру адекватности модели, то есть определить способ сравнения разных моделей по степени успешности достижения цели с их помощью.

**Этап оптимизации.** Оптимизация заключается в том, чтобы среди множества возможных вариантов моделей проектируемой системы найти наилучшие в заданных

условиях при заданных ограничениях, то есть оптимальные альтернативы (рисунок 5.5).

Говоря «наилучшие», мы предполагаем, что имеется критерий (или ряд критериев), способ (способы) сравнения вариантов. При этом важно учесть имеющиеся условия, ограничения, так как их изменение может привести к тому, что при одном и том же критерии (критериях) наилучшими окажутся другие варианты.

Если не вдаваться в подробности оптимизации в рамках математических моделей, то интуитивно оптимизация сводится в основном к сокращению числа альтернатив и проверке модели на устойчивость.

Пусть построена модель и найдено оптимальное в ее рамках решение.

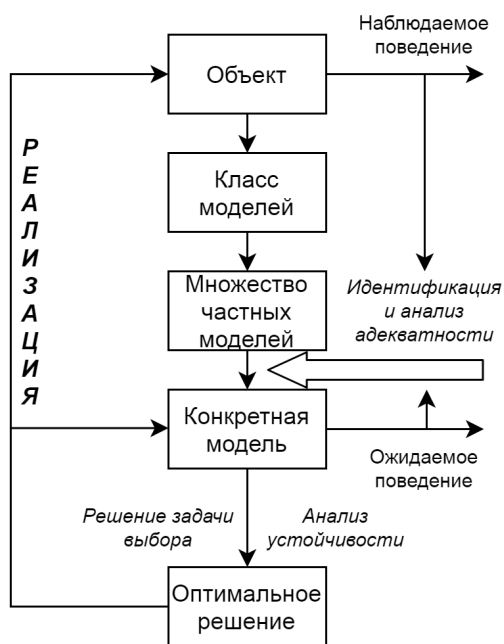


Рисунок 5.5 – Этапы построения и исследования математической модели

Важно при этом знать, что будет, если параметры модели немного отличаются от параметров реальной системы. Может получиться, что задача выбора решалась не для той системы. Отрицать такую возможность, естественно, нельзя. Поэтому необходимо выяснить:

– насколько оптимальное решение чувствительно к ошибкам описания модели, то есть будут ли малые возмущения модели приводить к столь же малым изменениям оптимального решения (задача анализа устойчивости);

– будут ли решения, обладающие определенными свойствами в рамках модели (например, оптимальность, эффективность не ниже заданной и т.д.), обладать этими же свойствами и в реальной системе и насколько широк класс реальных систем, в которых данное решение еще обладает этими свойствами (задача анализа адекватности).

Качественно основная идея, используемая в математическом моделировании, заключается в следующем [7]. Применение оптимальных решений приводит к тому, что они, как правило, оказываются неоптимальными при малых вариациях параметров модели. Возможным путем преодоления этого недостатка является расширение множества оптимальных решений за счет включения в него так называемых приближенных решений (то есть немного худших, чем оптимальные). Оказывается, что ослабление определения «оптимальность» позволяет, установив взаимосвязь между возможной неточностью описания модели и величиной потерь в эффективности решения, гарантировать некоторый уровень эффективности множества решений в заданном классе реальных систем, то есть расширить область применимости решений за счет использования менее эффективных из них. Иными словами, вместо рассмотрения фиксированной модели реальной системы необходимо исследовать семейство моделей.

Таким образом, существует определенный дуализм между эффективностью решения и областью его применимости (областью его устойчивости и/или областью адекватности).

В практике проектирования систем, так же как и во многих других областях профессиональной деятельности, не поддающихся пока математизации, для оптимизации используются такие методы, как анализ, проигрывание возможных ситуаций, мысленный эксперимент (что произойдет, если изменятся такие-то условия? и т.д.).

Отобранные и проверенные на устойчивость и адекватность модели становятся основой для последнего, решающего этапа стадии моделирования – выбора модели для реализации.

**Этап выбора модели (принятия решения).** Выбор модели является действием, придающим всей деятельности целенаправленность. Именно выбор реализует подчиненность всей деятельности определенной цели.

В системном анализе выбор (принятие решения) определяется как действие над множеством альтернатив, в результате которого получается подмножество выбранных альтернатив (как правило, это один вариант, одна альтернатива) [6]. При этом выбор тесно связан с оптимизацией, так как последняя есть не что иное, как выбор оптимальной альтернативы.

Каждая ситуация выбора может разворачиваться в разных вариантах:

- оценка альтернатив для выбора может осуществляться по одному или нескольким критериям, которые в свою очередь могут иметь как количественный, так и качественный характер;

- режим выбора может быть однократным (разовым) или повторяющимся, допускающим обучение на опыте;

- последствия выбора могут быть точно известны (выбор в условиях определенности), иметь вероятностный характер (выбор в условиях риска) или иметь неопределенный исход (выбор в условиях неопределенности);

- ответственность за выбор может быть односторонней (в частном случае индивидуальной, например ответственность проектировщика) или многосторонней (например, когда за принятое решение несут ответственность члены проектной группы). Соответственно различают индивидуальный или групповой, многосторонний выбор;

- степень согласованности целей при многостороннем выборе может варьироваться от полного совпадения интересов сторон до их полной противоположности (выбор в конфликтной ситуации). Возможны также промежуточные случаи, например компромиссный выбор, коалиционный выбор, выбор в условиях конфликта и т.д.

Как правило, выбор рационального варианта модели проектируемой системы основывается на последовательном сокращении числа рассматриваемых вариантов за счет анализа и исключения неконкурентоспособных по различным соображениям и показателям альтернатив. При выборе альтернатив следует иметь в виду, что цели проектируемой системы могут быть подразделены по их приоритетности:

- цели, достижение которых определяет успех проекта;

- цели, которыми частично можно пожертвовать для достижения целей первого уровня;

- цели, имеющие характер дополнения.

В любом случае выбор (принятие решения) является процессом субъективным, и лица (лицо), принимающие решение, должны нести за него ответственность. Поэтому в целях преодоления (уменьшения) влияния субъективных факторов на процесс принятия решения используются чаще всего методы экспертизы.

### **5.3.3 Структурно-функциональное моделирование**

Структурно-функциональное моделирование – вид моделирования, при котором моделями являются схемы, графики, чертежи, диаграммы, таблицы, рисунки и взаимосвязи между ними. Структурно-функциональное моделирование берет свои истоки из теории электрических цепей и радиотехники [8].

Впервые понятие «структурный анализ» было использовано в конце 60-х годов прошлого столетия профессором Массачусетского технологического института Дугласом Россом, который разработал основы современных методов структурно-функционального анализа моделирования сложных систем.

Методология структурно-функционального моделирования и анализа сложных систем (SADT) широко использовалась для эффективного решения целого ряда проблем, среди них:

- управление финансами и материально-техническим снабжением крупных фирм;
- разработка программного обеспечения АСУ телефонными сетями;
- долгосрочное и стратегическое планирование деятельности фирм;
- проектирование вычислительных систем и сетей и др.

Методы структурно-функционального моделирования основаны на следующих принципах:

- разделение систем на части типа «черный ящик»;
- иерархическая организация «черных ящиков»;
- использование графических средств для определения функциональных связей между блоками.

Вкратце рассмотрим эти принципы. Как говорилось в разделе 3, удобство применения принципа «черного ящика» при изучении систем заключается в том, что нет необходимости знать внутреннее устройство каждого отдельного блока, следует лишь знать набор его входов и выходов, а также назначение, т.е. функцию, согласно которой происходит преобразование входного сигнала в выходной.

Разбиение на «черные ящики» должно удовлетворять следующим критериям:

- каждый «черный ящик» реализует единственную функцию системы;
- функция каждого «черного ящика» является легко понимаемой независимо от сложности ее внутренней структуры;
- связь между «черными ящиками» вводится только при наличии связи между соответствующими функциями системы;
- связи должны быть простыми, количество перекрестных и обратных связей между составными блоками должно быть минимальным для обеспечения их независимости друг от друга.

Принцип иерархии (расположение частей или элементов системы в порядке от высшего к низшему) заключается в последовательной детализации структурно-функционального описания системы: сначала система описывается как взаимодействие наиболее крупных блоков, затем каждый блок детализируется. Это значительно облегчает понимание работы сложных систем.

Принцип использования графических средств описания связей дает представление о взаимодействии блоков системы и в полной мере реализует принципы, отмеченные выше.



## 5.4 Введение в моделирование сложных технических систем

### 5.4.1 Языки системного моделирования

Рассмотрим два языка для реализации объектно-ориентированных моделей.

Во всех методиках описания архитектуры системы для отображения различных системных аспектов, ракурсов и представлений применяются модели. Традиционные модели, в том числе структурные схемы, основаны на использовании нисходящей декомпозиции системы. Обычно такие методы базируются на функциональных представлениях и предполагают формирование иерархии моделей со все большей степенью детализации. В 1970-х годах, когда программная инженерия развивалась ускоренными темпами, появилась формальная методика моделирования, получившая название «структурный анализ и проектирование» (structured analysis and design – SAAD)<sup>4</sup>. Этот термин применялся к любым, а не только к программным системам [9].

Модели, которые использовались на протяжении нескольких десятилетий, во многом напоминают конструкции SAAD, поэтому для них было предложено собирательное название *традиционные иерархические методы* или просто *традиционное системное моделирование*.

Появление SAAD подтолкнуло разработку новых языков моделирования, основанных на принципах объектно-ориентированного анализа и проектирования (object-oriented analysis and design – OOAD). В этой методике при анализе и проектировании главным образом используется подход, предполагающий восхождение от нижних к верхним уровням системной иерархии, и упор делается на сущностях или объектах, а не на функциях, хотя те и другие тесно связаны. В 1990-х годах был формализован новый язык моделирования, вобравший в себя принципы и приёмы OOAD: унифицированный язык моделирования (Unified Modeling Language – UML).

#### **Язык моделирования UML**

При разработке сложной системы важно создавать высокоуровневые модели её структуры и поведения, чтобы понять, как может быть сконфигурирована система, отвечающая предъявляемым требованиям. При разработке методологии OOAD несколько известных учёных-практиков независимо создали подобные модели. В середине 1990-х годов трое из них (Гради Буч, Джеймс Рамбо и Ивар Яacobсон) предложили единую терминологию для моделирования, которую они назвали UML. Сообщество разработчиков ПО приняло этот язык в качестве стандарта, после чего он стал широко использоваться в коммерческих и государственных проектах. UML поддерживается развитыми инструментами, разрабатываемыми несколькими ведущими производителями инструментального ПО.

UML предлагает аналитикам и специалистам по проектированию 13 разных способов схематического представления характеристик системы. Среди них

---

<sup>4</sup> В нашей стране чаще используется другое название, а именно методология структурного анализа и проектирования (Structured Analysis and Design Technique – SADT).

выделяется шесть статических, или структурных, диаграмм и семь динамических, или поведенческих, диаграмм. На рисунке 5.6 показаны оба этих набора диаграмм.

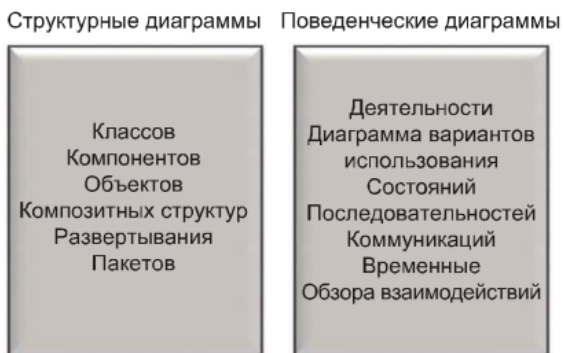


Рисунок 5.6 – Модели в UML

*Структурные диаграммы* служат для отображения различных представлений о связях между сущностями, образующими систему.

На *диаграммах классов (class diagram)* показывается набор классов, связей между ними и их интерфейсов.

На *диаграммах объектов (object diagram)* показываются экземпляры классов (объекты) системы и связи между ними.

*Диаграммы компонентов (component diagram)* обычно используется для пояснения структуры физических объектов и связей между ними.

*Диаграмма развертывания (deployment diagram)* даёт статическое представление физических компонентов системы.

На *диаграмме композитной/составной структуры (composite structure diagram)* демонстрируется декомпозиция классов во время выполнения задачи.

На *диаграммах пакетов (package diagram)* представляется иерархия компонентов.

*Поведенческие диаграммы* служат для отображения различных представлений о динамических характеристиках системы.

На *диаграммах вариантов использования (use case diagram)* показываются отношения между вариантами использования, представляющими функции системы, которые отвечают за взаимодействия с внешними сущностями (акторами).

На *диаграммах последовательностей (sequence diagrams)* отражаются хронологически упорядоченные взаимодействия между объектами при реализации сценария системы.

На *диаграммах состояний (state machine diagrams)* моделируются события перехода состояний и действия, которые изменяют состояние системы.

*Диаграммы деятельности (activity diagrams)* представляют собой схемы различных действий в некоторой части системы и потоки управления между ними.

На *диаграммах коммуникаций (communication diagrams)* определяются связи между объектами с акцентом на их взаимодействия.

*Диаграммы обзора взаимодействий (interaction overview diagrams)* – это комбинация диаграмм последовательностей и деятельности.

На *временных диаграммах (timing diagrams)* представляются взаимодействия между объектами вместе с хронометрической информацией.

Диаграммы классов в UML приблизительно соответствуют диаграммам «сущность–связь» в структурном анализе, а диаграммы состояний – диаграммам перехода состояний. Прочие диаграммы, в особенности диаграммы деятельности, – это различные виды схем функциональных потоков. Новый язык был быстро принят на вооружение сообществом системных инженеров как стандарт де-факто для представления программных концепций и преимущественно программных систем. Хотя истоки языка лежат в мире программного обеспечения, в последнее время он успешно применялся для разработки систем, включающих как программные, так и аппаратные средства.

Развитие языка UML направляется всемирным консорциумом Object Management Group (OMG). UML продолжает развиваться, выходят новые версии, увеличивается сложность. Вместо того чтобы подробно рассказывать обо всех диаграммах, приведем несколько примеров поведенческих диаграмм – вариантов использования, деятельности и последовательности, и одну структурную – диаграмму классов.

*Диаграмма вариантов использования* находит применение при описании функционирования и поведения системы. В программных и некоторых аппаратных приложениях диаграмма вариантов использования применялась для выявления и анализа требований назначения и функциональных требований.

На рисунке 5.7 моделируется взаимодействие действующего лица, или субъекта действия, – актора («библиотекарь»), с одним вариантом использования (представлен овалом), который ведет к выполнению подчинённого действия (отдельный вариант использования), тогда как три других варианта взаимодействуют со вторым (внешним) актором. Стрелки показывают, кто инициирует вариант использования, а не направление потока информации. Например, актер «библиотекарь» может инициировать вариант использования «управление абонементом». Тот же вариант может быть инициирован вариантом использования «вернуть книгу».

Каждый изображённый на диаграмме вариант использования представляет отдельную последовательность действий и событий. В UML определен стандартный набор компонентов для варианта использования:

- название;
- краткое описание;
- список акторов;
- начальные условия (предусловия), описывающие состояние окружения до начала варианта использования;
- конечные условия (поступления), описывающие состояние окружения после завершения варианта использования;
- последовательность событий – список событий или действий, происходящих в определённой последовательности.



Рисунок 5.7 – Диаграмма вариантов использования

В таблице 5.1 приведен пример описания варианта использования «выдать книгу». В последовательности событий перечислены действия и виды деятельности, выполняемые актором и подсистемами. В данном случае в варианте использования участвуют один актер и две подсистемы: пункт выдачи книг и подсистема управления абонементом. Этот вариант использования представляет автоматизированную библиотечную систему выдачи книг с применением универсального товарного кода (Universal Product Code – UPC). Хотя это и необязательно, иногда полезно перечислять действия каждого актора и подсистемы в столбцах таблицы. Это наглядно показывает читателю, кто выполняет действия и в каком порядке (бывает, что одновременно). Конечно, автор варианта использования может оформить его применительно к конкретной ситуации по своему вкусу. Иными словами, два инженера могут предложить совершенно разные последовательности событий для одного и того же варианта использования. Это необязательно признак ошибки или проблемы. На самом деле у варианта использования может быть несколько разновидностей, которые в UML называются сценариями.

Таблица 5.1 – Пример варианта использования «выдать книгу»

Название	Выдать книгу		
Краткое описание	Этот вариант использования описывает процесс выдачи читателю книги из библиотеки		
Список акторов	Читатель		
Начальные условия	На абонементе читателя нет книг		
Конечные условия	На абонементе читателя появилась одна книга		
Номер события	Читатель	Пункт выдачи книг	Подсистема управления абонементом
1		Выводит сообщение «Проведите карточкой вдоль считывающего устройства»	

Окончание таблицы 5.1

Номер события	Читатель	Пункт выдачи книг	Подсистема управления абонементом
2	Проводит библиотечной карточкой вдоль устройства		
3		Считывает данные читателя с карточки	
4		Отправляет запрос на подтверждение отсутствия задолженности	
5			Запрашивает у базы данных информацию о читателе
6			Подтверждает отсутствие задолженности
7		Получает информацию	
8		Выводит сообщение «Поместите UPC книги под сканер»	
9	Помещает UPC книги под сканер		
10		Сканирует UPC книги	
11		Отправляет запрос на подтверждение наличия книги	
12			Запрашивает у базы данных информацию о книге
13			Подтверждает наличие
14		Получает подтверждение	Посылает подтверждение
15		Выводит сообщение «Спасибо! Книга должна быть возвращена через две недели»	Помечает, что книга «на руках»

**Диаграмма деятельности.** На таких диаграммах можно представить любой тип потока в системе, включая процессы, операции и управление. На диаграмме это достигается посредством последовательности действий и событий, которая регулируется с помощью различных управляющих узлов. Основные компоненты диаграммы деятельности:

- *действие (action)* – элементарный осуществимый шаг в рамках деятельности (прямоугольник со скруглёнными углами);

- *дуга деятельности (activity edge)* – линия, соединяющая действия, а также действия и узлы (со стрелкой). Дуги деятельности бывают двух типов: потоки объектов и потоки управления;

- *поток объектов (object flow)* – дуга деятельности, по которой перемещаются объекты (или символические обозначения объектов);
- *поток управления (control flow)* – дуга деятельности, которая представляет направление управления (кроме того, по ней перемещаются маркеры управления);
- *соединитель, или скрепка (pin)* – связующее звено между параметрами действия и потоком (прямоугольник, соединённый с действием и потоком). Соединитель принимает явные входы или порождает явные выходы действия;
- *начальный узел (initial node)* – начальная точка потока управления (сплошной круг);
- *конечный узел (final node)* – конечная точка потока управления (сплошной круг внутри окружности большего радиуса);
- *узел принятия решения (decision node)* – точка ветвления потока, каждая ветвь содержит условие, при котором она выбирается (ромб);
- *узел слияния (merge node)* – точка, в которой несколько потоков объединяются в один (ромб);
- *узел разделения (fork node)* – точка, в которой один поток разветвляется на несколько параллельно выполняемых (жирная линия);
- *узел соединения (join node)* – точка, в которой несколько параллельно выполняемых потоков синхронизируются и соединяются в один поток (жирная линия).

На рисунке 5.8 показана простая диаграмма деятельности для примера с библиотечной системой, аналогичная схеме функциональных потоков. Здесь одна деятельность разветвляется на две, соответствующие двум логическим путям: выдача и возврат книги.

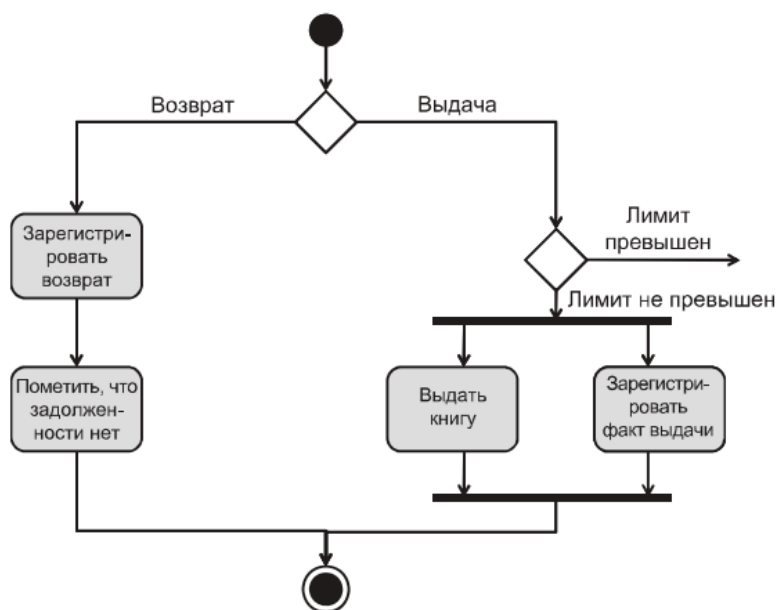


Рисунок 5.8 – UML-диаграмма деятельности

**Диаграмма последовательности.** Такие диаграммы обычно связываются с вариантами использования, в которых действия или события следуют в определённом порядке. На диаграмме последовательности этот порядок изображается в виде цепочки событий, каждое из которых ассоциировано с выполняющим его актором или подсистемой.

На рисунке 5.9 приведен пример диаграммы последовательности для операции выдачи книги. Эта диаграмма связана с представленным выше вариантом использования, но содержит дополнительную информацию.

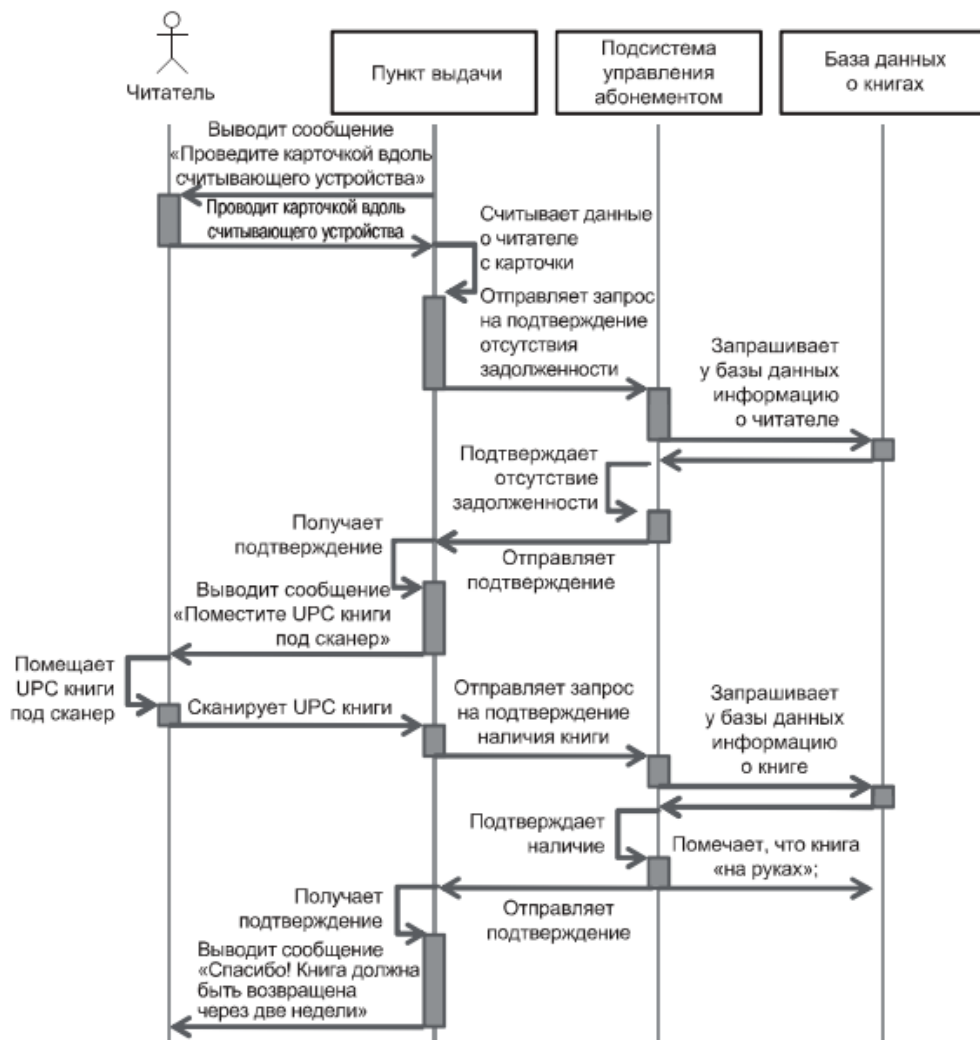


Рисунок 5.9 – UML-диаграмма последовательности

**Диаграмма классов.** В основе UML лежит понятие класса; для его представления предназначены диаграммы классов. Можно считать, что класс – это множество объектов (реальных или виртуальных), обладающих одинаковыми

характеристиками и семантикой. Объект может быть практически чем угодно, представимым программными средствами. Типичный класс описывает структуру и поведение объектов класса.

Определение класса содержит три основных компонента (в числе прочих):

- *атрибуты* – структурные свойства класса;
- *операции* – поведенческие свойства класса;
- *обязанности* – обязательства класса.

Обычно между классами имеются связи. Самая простая структурная связь называется *ассоциацией*. На рисунке 5.10 показана простая ассоциация между двумя классами – «Работник» и «Компания». Линия, соединяющая два класса, может быть снабжена стрелкой; если же стрелка отсутствует, подразумевается двусторонняя связь. Характер ассоциации можно также описать с помощью треугольника. В этом случае ассоциация читается следующим образом: «Работник *работает в* компании» и «Компания *нанимает* работника». Наконец, автор может указать *кратность* ассоциации, которая определяет её численные аспекты и записывается отдельными числами или в той или иной сокращённой нотации. Например, запись 0..2 означает любое значение от 0 до 2, а символ звездочки (\*) интерпретируется как «много». Таким образом, в нашем примере звездочка и число «1» означают, что работник работает только в одной компании, а компания может нанять много работников.

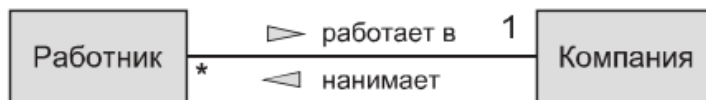


Рисунок 5.10 – Пример ассоциации классов

Между классами могут существовать связи ещё двух типов: *обобщение* и *зависимость*. Обобщение описывает таксономическую связь между частным и общим классами. На рисунке 5.11 изображены обобщения, связывающие три класса: клиент, корпоративный клиент и клиент – физическое лицо. В данном случае как корпоративные клиенты, так и физические лица являются частными случаями более общего класса «Клиент». Такая связь изображается в виде стрелки с широким острием. На данной диаграмме представлены также атрибуты и операции всех классов.

Частные классы, связанные отношением обобщения с более общим классом, наследуют атрибуты и операции своего родителя. Следовательно, класс «Корпоративный клиент» обладает не только собственными атрибутами и операцией, но также атрибутами *Name* и *Adress* и операцией *getCreditRating()*. То же самое справедливо и для класса «Клиент–физическое лицо».

Третий тип связи – зависимость – применяется в ситуации, когда в описании или реализации одного класса используется другой. Следует отметить, что отношение зависимости может существовать не только между классами, но и между другими элементами UML.



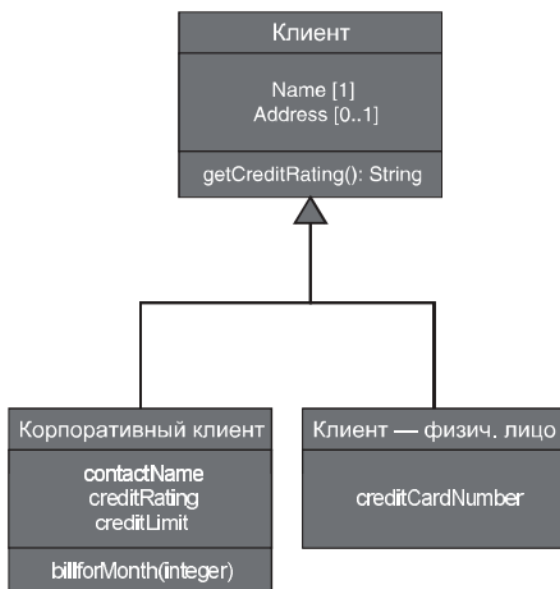


Рисунок 5.11 – Пример классов, связанных отношением обобщения

На рисунке 5.12 показана диаграмма классов для примера системы управления библиотечным абонементом. Здесь мы видим ассоциации нескольких типов, а также отношение зависимости.

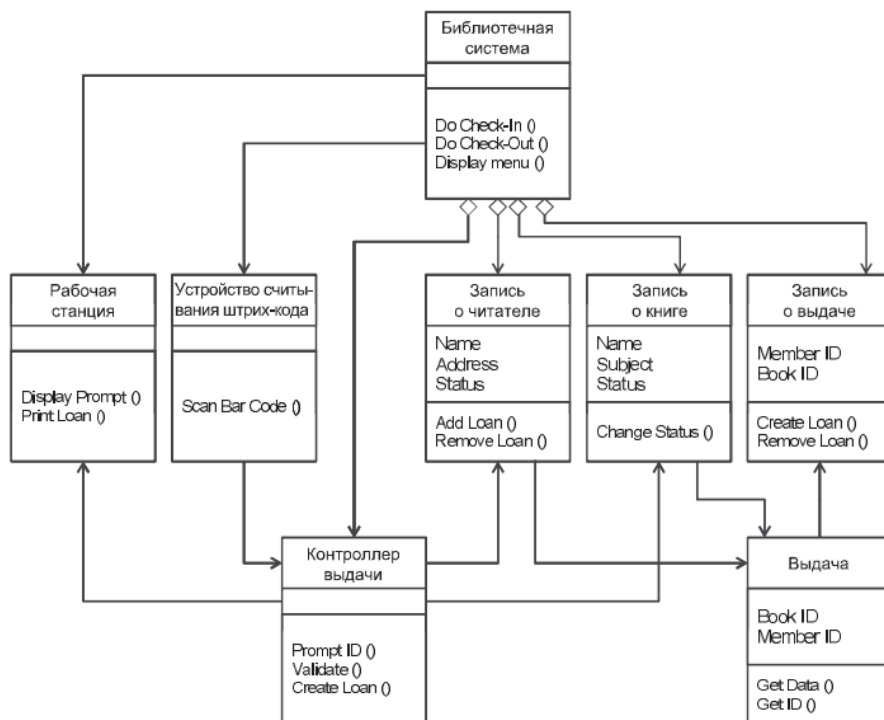


Рисунок 5.12 – Диаграмма классов для системы управления библиотечным сервисом

## Язык моделирования SysML

Хотя язык UML применялся к системам, включающим как программные, так и аппаратные компоненты, постепенно стало ясно, что более эффективным был бы вариант UML, разработанный специально для таких программно-аппаратных систем. К тому же по мере развития в 1990-х годах системной инженерии и особенно построения архитектуры систем пришло понимание, что наличие формального языка моделирования полезно закрепить в виде единого стандарта. В 2001 году Международный совет по системной инженерии (The International Council on Systems Engineering – INCOSE) взял на себя разработку стандартного языка моделирования. Отдавая должное популярности и гибкости UML, разработчики взяли за основу именно этот язык, точнее, его версию 2.0. В этом мероприятии приняли участие группа OMG и сформированная в 2001 году специальная группа по системной инженерии (Systems Engineering Domain Special Interest Group). Действуя совместно, обе организации разработали и опубликовали расширение UML для системной инженерии – язык моделирования систем (Systems Modeling Language), сокращенно SysML.

Пожалуй, наиболее существенное различие между UML и SysML заключается в том, что пользователь SysML может не быть специалистом в области объектно-ориентированного анализа и проектирования. SysML поддерживает многие традиционные принципы, возможности и модели системной инженерии. На рисунке 5.13 представлены диаграммы, составляющие основу этого языка.



Рисунок 5.13 – Модели SysML

Добавлена новая категория, включающая всего одну диаграмму – диаграмму требований. Не подверглись изменениям только четыре из 13 диаграмм UML: пакетов, вариантов использования, состояний и последовательности. Диаграммы, опирающиеся на объектно-ориентированные методологии и подходы, исключены.

Как и для UML, приведём по одному примеру диаграммы из каждой категории: диаграмму требований, диаграмму внутренних блоков и диаграмму деятельности. Последние две очень похожи на UML-диаграммы классов и деятельности соответственно, однако имеются отличия, на которых остановимся подробнее.

**Диаграмма требований.** В UML требования к программному обеспечению представлены главным образом диаграммами вариантов использования [2, 3, 9]. Однако это в основном функциональные требования; для нефункциональных требований в UML нет явного представления. Чтобы восполнить данное упущение, были разработаны стереотипы, но в SysML реализована новая модель, специально ориентированная на требования этого вида.

На рисунке 5.14 приведен простой пример диаграммы требований. Основное требование – максимизация скорости самолета. Это требование уровня системы, имеющее три атрибута – идентификатор, текст и единицу измерения. Текст содержит «классическое» описание конкретного требования. Для требования уровня системы имеется метод верификации – в данном случае испытание, обозначенное «TestCase». Детальные сведения об испытании AircraftVelocityTest находятся где-то в другом месте.

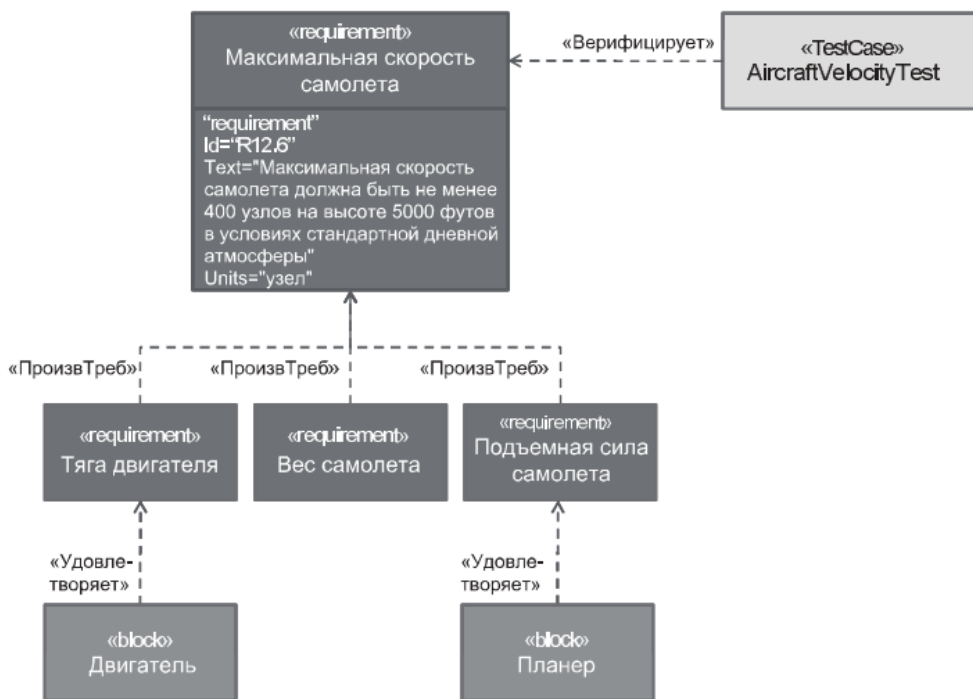


Рисунок 5.14 – Диаграмма требований в SysML

Это требование уровня системы может породить ряд производных требований, как правило, ассоциированных с подсистемами. На рисунке 5.14 показаны три производных требования: тяга двигателя, вес самолета и подъёмная сила самолета. У этих требований также имеются атрибуты и характеристики, хотя на данной диаграмме они не показаны.

Мы видим на рисунке связь «Удовлетворяет». Так обозначается механизм или объект, удовлетворяющий производному требованию. В случае тяги двигателя за удовлетворение производного требования отвечает подсистема двигателя.

Диаграмма требований обычно предстает в виде набора прямоугольников, которые идентифицируют и ассоциируют многочисленные требования уровня системы с требованиями уровня подсистем, методами их верификации, производными требованиями и соответствующими концепциями удовлетворения требований. Последнее позволяет отобразить требования на функциональные или физические объекты (выполнить трассировку требований).

Эти диаграммы обновляются по мере изменения требований к функционированию, требований к показателям функционирования и функциональных требований на протяжении процесса разработки системы и в ходе применения метода системной инженерии. Связи между компонентами диаграммы требований, представленной на рисунке 5.14, и функциональными и физическими моделями, представленными на других диаграммах SysML, имеют важнейшее значение для успешного построения системы. Для создания и сопровождения таких связей между компонентами модели разработаны и продолжают разрабатываться современные инструменты.

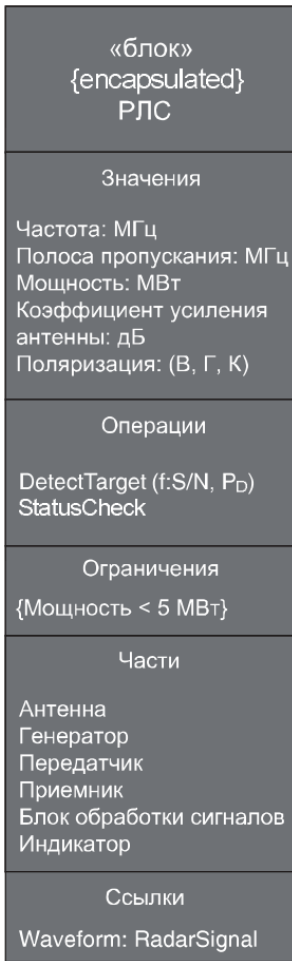
**Привязка.** В SysML включен формальный механизм, позволяющий соединять элементы разных моделей. Этот механизм называется привязкой. В языке SysML встроены три типа привязок: поведения, структуры и потока объектов, но можно определять дополнительные. Привязка поведения связывает поведение (представленное на одной или нескольких поведенческих диаграммах) с блоком, который это поведение реализует.

Напомним, что обычно поведение представляет собой деятельность или действие. Привязка структуры соединяет (или привязывает) логические структуры с физическими (и наоборот). Этот механизм даёт возможность связывать компоненты логического описания системы (обычно представлены логическими блоками) с компонентами физического описания (обычно представлены физическими блоками и пакетами). Наконец, привязка потока объектов связывает поток элементов (на структурной диаграмме) с дугой потока объектов (на диаграмме деятельности). На многих диаграммах SysML привязки можно распознать по пунктирной стрелке.

**Диаграмма определений блоков.** В UML базовым элементом является класс, а экземпляры класса представлены объектами. Поскольку эти термины слишком тесно ассоциируются с разработкой ПО, то в SysML для базового элемента употребляется другое название – блок. Структура и семантика блока почти такие же, как у класса. Блок содержит атрибуты, может ассоциироваться с другими блоками и описывать набор выполняемых деятельностей или раскрываемых поведений.

Блоки применяются для представления статической структуры системы. Они могут представлять как логические (функциональные), так и физические элементы. Последние можно отнести к разным типам в соответствии с физическим воплощением – оборудование, программное обеспечение, документация и т.д. На рисунке 5.15 изображён пример определения блока в SysML вместе с различными его компонентами. Это определение могло бы стать частью диаграммы определений блоков (или набора таких диаграмм).

Сверху показано имя блока. Значения – существенные атрибуты или характеристики РЛС; на рисунке изображено несколько таких атрибутов. В следу-



ющем разделе располагаются операции (действия, поведения) блока. В данном случае РЛС выполняет только два типа операций: *DetectTarget* (обнаружить цель) и *StatusCheck* (проверка состояния). Конечно, у настоящих РЛС количество операций гораздо больше. На операции, как и на атрибуты блока, могут налагаться ограничения, они перечислены в следующем разделе. Блок можно также определить через его подсистемы или компоненты, которые обычно называются частями. В примере перечислено шесть основных подсистем РЛС. Наконец, в последнем разделе приведены ссылки на другие блоки.

На рисунке 5.16 показано несколько типов ассоциаций блоков. Как и в UML, ассоциации представляют связи между блоками. Простые ассоциации изображаются в виде линий, соединяющих блоки. Если требуется указать направление, то на одном конце линии рисуется стрелка – такие ассоциации называются *направленными*. Существуют также специальные виды ассоциаций; так, агрегирование означает, что блоки являются частями одного целого, композиция – один блок входит в другой, зависимость – один блок зависит от другого, а обобщение – блок является частным случаем более общего блока [1].

Рисунок 5.15 –  
Определение блока в SysML

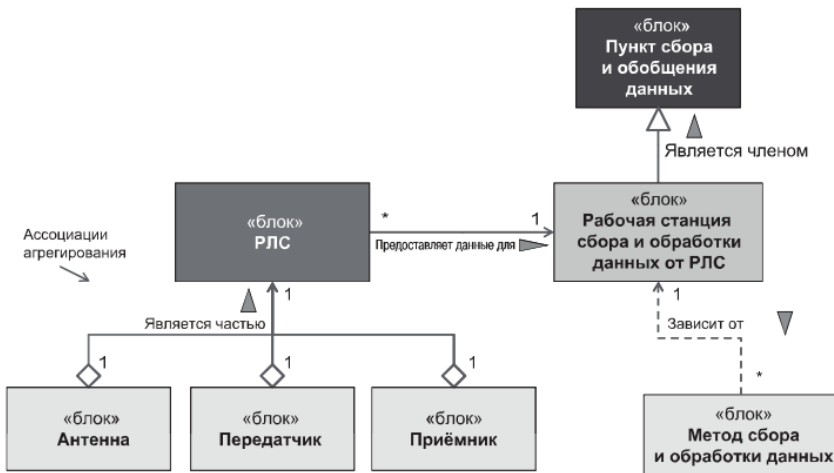


Рисунок 5.16 – Ассоциации блоков в SysML

**Диаграмма деятельности.** Из всех поведенческих диаграмм UML лишь одна – диаграмма деятельности – подверглась в SysML значительной модификации. Добавлены четыре расширения:

- поток управления дополнен управляющими операторами;
- с помощью непрерывных потоков объектов стало возможно моделировать непрерывные системы;
- с потоками можно ассоциировать вероятности;
- расширены правила моделирования деятельности.

Благодаря этим расширениям появилась возможность реализовать некоторые существующие приёмы функционального моделирования, например расширенные схемы функциональных потоков (extended functional flow block diagram – EFFBD). Кроме того, новые расширения позволяют без труда представить дерево функций, например использование функций кофеварки на рисунке 5.17, как показано на рисунке 5.18.

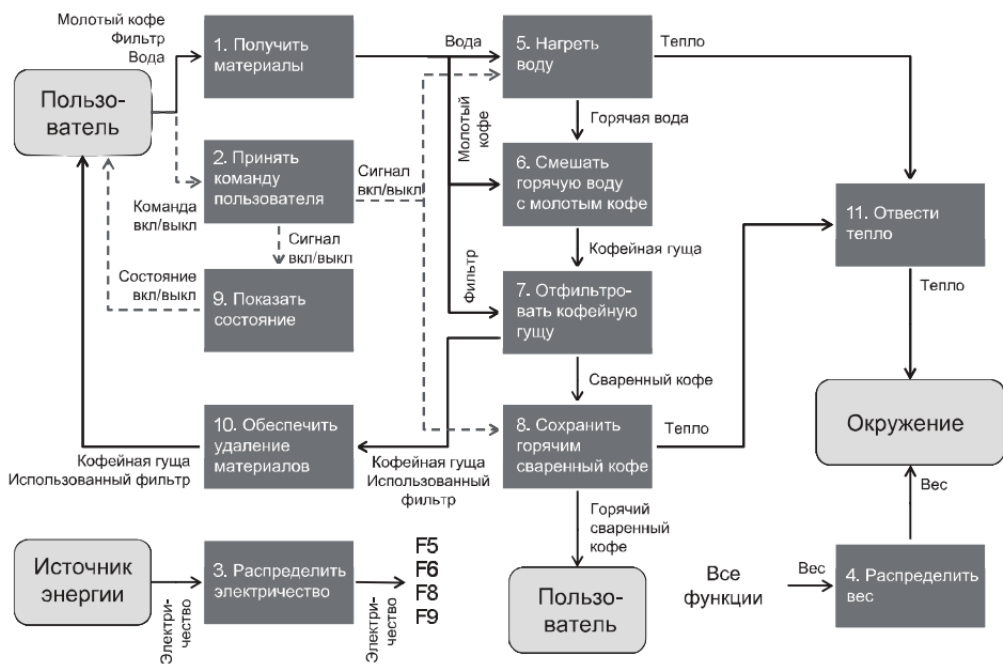
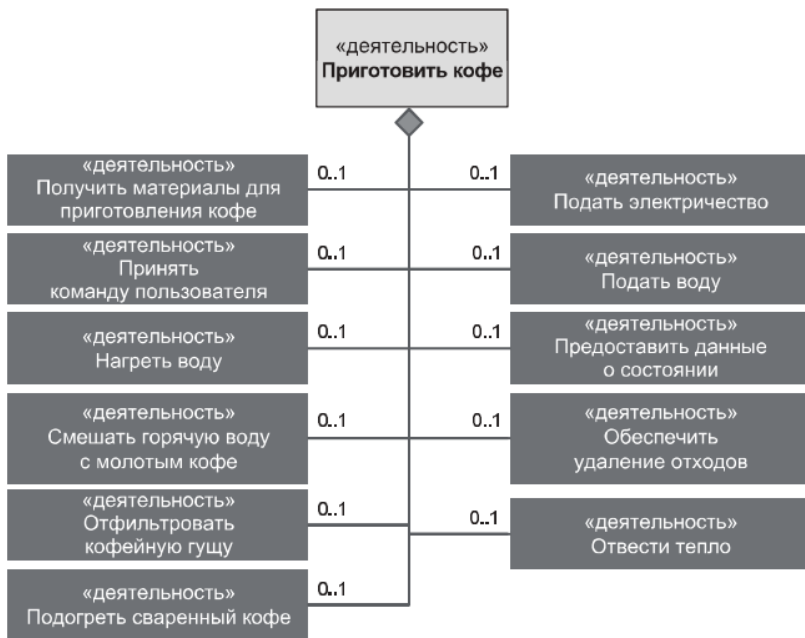


Рисунок 5.17 – Функциональная блок-схема стандартной кофеварки

Эти функции можно изобразить и на более привычной диаграмме деятельности, представленной на рисунке 5.18,б. Для большей наглядности мы не стали включать все 11 функций. Общий поток управления показан стрелками и соответствует потоку на рисунке 5.17 (схеме функциональных блоков). Входы и выходы изображены специальными соединителями – стрелками со скрепками (или прямоугольниками, примыкающими к деятельности). С каждым соединителем ассоциирована метка, описывающая, какие объекты передаются через данный интерфейс. Для иллюстрации включен также управляющий оператор – в данном случае он определяет, что

передается деятельности «Показать состояние» при различных комбинациях трёх его входов.

а



б

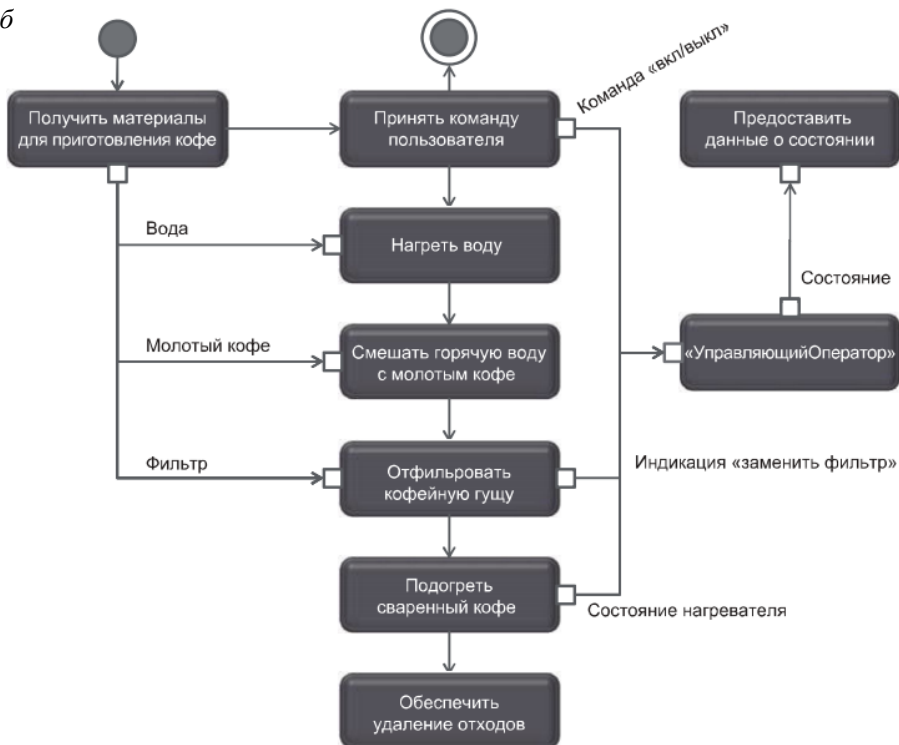


Рисунок 5.18 – Модель кофеварки:

а – дерево функций в SysML; б – диаграмма деятельности в SysML

Как и UML, SysML предоставляет системному инженеру и системному архитектору комплект гибких средств моделирования, которые дают возможность представить многие аспекты, относящиеся к концепции системы. Кроме того, SysML позволяет преодолеть некоторые присущие UML проблемы, мешающие использовать более традиционные методы системной инженерии. Пожалуй, самый очевидный пример такого рода – диаграмма требований. После выхода SysML появилось множество коммерческих приложений, помогающих инженеру разрабатывать, анализировать и уточнять концепции системы.

## 5.4.2 Математическое моделирование систем

Система представляет собой совокупность находящихся в определённой взаимосвязи компонентов, которые принадлежат части реального мира, являющейся объектом исследования. Это определение отражает две содержательные стороны понятия системы – наличие множества компонентов и определённых взаимосвязей между ними, за счёт которых система имеет новые свойства, отсутствующие у входящих в неё компонентов. Свойства системы в равной степени определяются как характеристиками составляющих её компонентов, так и характеристиками взаимосвязей между ними [10].

Можно показать, что с увеличением числа компонентов системы количество всевозможных парных связей между ними растёт асимптотически как квадрат их числа. Таким образом, даже если влияние на работу системы каждой взаимосвязи будет невелико по сравнению с влиянием компонентов, количественное преобладание связей приведет к существенному, а зачастую и преобладающему их влиянию на функционирование системы. Отсюда следует, что систему нельзя рассматривать, а значит, и моделировать по отдельным образующим её компонентам, так как при этом могут потеряться существенные свойства системы, определяемые её взаимосвязями. Это обстоятельство является одним из отличительных свойств системных моделей, что объясняет трудности, возникающие при моделировании больших систем, по сравнению с моделированием отдельных компонентов.

Для формального описания наличия у системы как главного целого новых свойств, отсутствующих у составляющих её компонентов, обычно используется определитель ковариационной матрицы  $R$  параметров компонентов системы или сигналов на их входах. Величина определителя  $\det R$  зависит от количества элементов в матрице  $R$  и от значений  $r_{ij}$  коэффициентов ковариации между выходными параметрами компонентов системы. Чтобы проиллюстрировать вышесказанное, рассмотрим удобный для вычислений случай равенства всех коэффициентов ковариации, образующих ковариационную матрицу  $R$ . Значения определителя  $\det R$  в зависимости от числа компонентов системы  $n$  и величин  $r_{ij}$  приведены в таблице 5.2.



Таблица 5.2 – Значения определителя  $\det R$

$n$	Det R			
	$r_{ij}$			
	0	0,1	0,5	1,0
2	1	1	0,25	0
4	1	0,8	0,3	0
8	1	0,63	0,036	0
12	1	0,5	0,004	0

Как видно из таблицы, по мере увеличения взаимной ковариации между выходными сигналами компонентов, составляющих систему, величина определителя ковариационной матрицы  $\det R$  уменьшается от единицы (отсутствие связей между компонентами:  $r_{ij} = 0$ ) до нуля в случае максимально возможной связи компонентов:  $r_{ij} = 1$ . Из таблицы также видно, что  $\det R$  убывает и по мере увеличения числа компонентов в системе даже при сравнительно слабых связях между ними. В первом случае систему часто называют *сложной*, во втором – *большой*. Совокупность компонентов будет проявлять себя как система при условии  $\det R \ll 1$ , и в этом случае её нельзя рассматривать по отдельным образующим её компонентам независимо от того, чем обеспечивается малая величина определителя  $\det R$  – большим числом компонентов или сильными связями между ними.

Кроме большой размерности и сложности, отметим ещё ряд характерных особенностей больших и сложных систем: слабую структурированность теоретических и фактических знаний о системе и её компонентах; физическую разнородность подсистем и компонентов, образующих систему; случайность и неопределённость факторов, действующих в системе; многокритериальность оценок качества функционирования системы.

Имитационное компьютерное моделирование является одним из важнейших инструментов изучения системы, помогающим во многом преодолеть трудности, возникающие при проектировании из-за перечисленных выше особенностей больших и сложных систем. Вычислительные эксперименты с математической моделью системы позволяют сделать выводы о поведении системы в различных ситуациях без её построения, если это проектируемая система; без вмешательства в её работу, если это действующая система, экспериментирование с которой дорого и небезопасно; без разрушения системы, если цель исследования состоит в нахождении предельных условий её работы. Процесс моделирования системы включает построение модели, организацию вычислительных экспериментов с ней, создание программного обеспечения моделирования.

Процесс построения модели состоит из ряда этапов, из которых можно выделить два: построение формальной аналитической или алгоритмической модели на основе знаний о моделируемой системе и формирование машинной модели по построенной формальной. Второй этап является предметом ответственности специалистов по программированию и здесь рассматриваться не будет. Построение формальной

модели системы производится её разработчиком и представляет сложную научную задачу. В последнее время чаще используются алгоритмические формальные модели больших систем на основе специальных средств автоматизации системотехнического моделирования, в состав которых входят:

- язык описания моделируемых систем;
- средства обработки конструкций языка описания (компилятор, транслятор или интерпретатор);
- управляющая программа моделирования, осуществляющая имитацию моделирования системы во времени;
- набор стандартных программных средств, используемых для организации вычислительных экспериментов с моделью.

Такие специализированные средства моделирования обладают перед моделями, реализованными с помощью универсальных языков программирования, рядом преимуществ: меньшими затратами на программирование, возможностью использования моделей стандартных компонентов, автоматическим формированием данных, соответствующих принятому способу моделирования системы, удобством их накопления и представления.

Вычислительные эксперименты с любой технической системой вообще, и радиотехнической в частности, проводятся для получения информации о её поведении, а эта информация довольно многообразна и характеризует различные стороны функционирования ТС. На основании полученной информации вычисляются показатели эффективности системы, что представляет собой сложную задачу, которая решается на этапе организации вычислительных экспериментов и требует привлечения теории планирования, эксперимента, статистики и других математических методов. В связи с тем что ТС работают в условиях действия случайных факторов, значения многих функционалов, характеризующих эффективность системы, могут оказаться случайными величинами. Поэтому при выборе показателей эффективности обычно пользуются средними значениями соответствующих функционалов, либо вероятностями совершения некоторых случайных событий, либо строятся совокупности функционалов, характеризующие свойства системы интегрально, такие как помехозащищённость, надёжность и т.п.

С точки зрения целевого назначения и описательных свойств различные уровни моделирования систем имеют свои характерные особенности. Можно выделить ряд уровней моделирования ТС, каждому из которых соответствуют свои формальные модели системы. Отметим прежде всего следующие:

- *модели потенциальной предельной достижимости*, которые характеризуют потенциальные возможности моделируемой системы в целом или отдельных её подсистем и компонентов. Они создаются на основе изучения фундаментальных достижений науки в данной области;
- *системотехнические* или *имитационные модели*, которые описывают функционирование системы в кибернетических терминах. С помощью этих моделей выполняется имитационное моделирование ТС. Термин «имитационное моделирование» означает, что результат моделирования нельзя вычислить или предсказать

заранее и необходим вычислительный эксперимент на модели, чтобы исследовать поведение проектируемой системы;

– *функциональные модели*, в основу построения которых положены макро-модели отдельных компонентов и подсистем. При классификации функциональных моделей радиосистем обычно учитывают способы получения и свойства макро-моделей отдельных компонентов, а также способы описания сигналов и помех в системе. Подобные системные модели имеют большую конкретность по сравнению с имитационными и благодаря этому позволяют уточнять характеристики отдельных компонентов системы в процессе проектирования, а также изучать их влияние на работу системы в целом. Однако они требуют больших затрат на программирование и организацию вычислительных экспериментов.

## **5.5 Краткий обзор САПР в области системотехники электронных и радиоэлектронных средств**

### **5.5.1 Пакеты прикладных программ компьютерного математического моделирования электронных и радиоэлектронных средств**

В процессе проектирования необходимо не просто создать аппаратуру, которая будет обеспечивать требуемое функционирование, но и оптимизировать её по широкому спектру функциональных, конструкторско-технологических, эксплуатационных и экономических показателей. На отдельных этапах для частных задач оптимизацию можно осуществить на основе разработанных формальных математических методов. Однако применительно к комплексным ЭРЭС задача оптимизации часто не поддается формализации. Встречаясь с такой ситуацией, разработчики обычно рассматривают несколько вариантов решения поставленной задачи, подсказанных, как правило, предшествующим коллективным опытом, интуицией, и выбирают лучший из них. Такой подход называется *эвристическим многовариантным анализом*. Однако в связи с возрастающей сложностью ЭРЭС, с повышением требований к ним необходимые расчеты оказываются все более трудоёмкими, а количество вариантов, целесообразных для рассмотрения, катастрофически увеличивается. Эта ситуация получила название «тирания альтернатив». Часто на этапе проектирования трудно предвидеть некоторые требования, вытекающие из условий эксплуатации. В результате создание нового ЭРЭС затягивается на долгие годы. Представляемые к испытаниям опытные образцы не удовлетворяют заданным требованиям, а доводка аппаратуры происходит в процессе испытаний, что удорожает проектирование во много раз [10].

Подобное положение не является виной разработчиков. Это результат возникшего принципиального несоответствия традиционного подхода к проектированию и сложности современных ЭРЭС. Указанное противоречие вызвало интенсивное

развитие новой технологии проектирования ЭРЭС, базирующейся на системном подходе и совершенствовании процессов проектирования с применением математических методов и средств вычислительной техники, комплексной автоматизации трудоемких и рутинных проектных работ, с заменой макетирования и натурального моделирования математическим и компьютерным моделированием, использованием эффективных методов многовариантного проектирования и оптимизации, а также с повышением качества управления проектированием.

В процессе проектирования ЭРЭС на системном уровне важную роль играют пакеты прикладных программ компьютерного математического моделирования, схемотехнического проектирования.

Среди систем компьютерной математики наиболее популярными являются интерактивные среды универсального типа: Mathcad, MatLAB, Maple, Mathematica и др. Каждая из них имеет свои достоинства и недостатки, связанные со спецификой построения и наиболее эффективной областью применения [11].

**MatLAB.** Система MatLAB занимает лидирующее положение среди математических и инженерных пакетов. Она в основном ориентирована на компьютерное моделирование сложных систем, решение задач многомерной обработки данных, исследование процессов имитационного моделирования и цифровой фильтрации. Моделирование динамических систем в MatLAB осуществляется с помощью встроенного пакета программ Simulink. Система также имеет большое число инструментов и пакетов расширений (Toolboxes) для проектирования специфических объектов и проведения различных исследований, в том числе решения задач идентификации систем (System Identification, Frequency Domain Identifications), разработки систем управления (Control Systems), моделирования и проектирования систем связи (Communications), событийного моделирования систем (Stateflow), моделирования в реальном времени (Real-Time Workshop) и пр.

При моделировании с использованием Simulink реализуется принцип так называемого визуального программирования, в соответствии с которым пользователь на экране монитора из библиотеки стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет расчеты. При этом, в отличие от прежних классических способов моделирования, не нужно досконально изучать язык программирования и численные методы математики, а достаточно общих знаний, требующихся при работе на компьютере, и, естественно, знаний в данной предметной области.

**Maple и Mathematica.** Системы Maple и Mathematica создавались как инструменты, позволяющие выполнять сложные символьные аналитические преобразования. Поэтому они в первую очередь предназначены для научных работников и математиков, профессионально работающих в этой области.

**Mathcad.** Система Mathcad получила наибольший спрос среди «массовых» потребителей. Она в максимальной степени доступна широкому кругу пользователей, так как обладает уникальным интерфейсом, исключая необходимость изучения для работы в этой среде какого-либо алгоритмического языка высокого уровня. Mathcad использует общепринятую символику математических выражений и нотаций. В сочетании с развитым программным обеспечением, обширной

библиотекой встроенных функций, наличием удобного редактора текста и формул, а также с большим количеством продуманных и выверенных учебно-практических пособий Mathcad стал наиболее популярной средой для выполнения расчетно-графических работ, особенно в вузовском техническом образовании. С помощью Mathcad можно решать самые разные математические задачи, выполнять сложные исследования и оформлять их результаты на высоком профессиональном уровне.

### 5.5.2 Пакеты прикладных программ компьютерного схемотехнического моделирования ЭРЭС

Среди схемотехнических САПР необходимо отметить следующие пакеты прикладных программ: LabVIEW, SysCalc, Hypersignal RIDE, Vis Sim, Visual System Simulator, System Vue, MicroCAP.

Если программы компьютерного математического моделирования можно применять для математического описания объекта проектирования на разных уровнях – от системного уровня до уровня элементной базы, то программы схемотехнического проектирования применяются на уровне систем, подсистем и функциональных узлов, а также для моделирования каналов распространения сигналов на физическом уровне.

Рассмотрим основные САПР.

**Simulink.** Simulink является достаточно самостоятельным инструментом MatLAB и при работе с ним совсем не требуется знать сам пакет MatLAB и остальные его приложения. С другой стороны, доступ к функциям MatLAB и другим его инструментам остается открытым, их можно использовать в Simulink. Имеются также дополнительные библиотеки блоков для разных областей применения (например, Power System Blockset – моделирование электротехнических устройств, Digital Signal Processing Blockset – набор блоков для разработки цифровых устройств и т.д.).

При работе с Simulink пользователь имеет возможность модернизировать библиотечные блоки, создавать свои собственные, составлять целые библиотеки новых блоков.

При моделировании можно выбирать стратегию и технику моделирования, например численный метод решения дифференциальных уравнений, способ изменения модельного времени (с фиксированным или переменным шагом) и т.д. В ходе моделирования имеется возможность следить за процессами, происходящими в системе. Для этого используются специальные устройства наблюдения, входящие в состав библиотеки Simulink. Результаты моделирования могут быть наглядно представлены в виде графиков или таблиц.

Преимущество Simulink заключается также в том, что он позволяет пользователю самостоятельно пополнять библиотеки блоков с помощью подпрограмм, написанных как на языке MatLAB, так и на классических языках алгоритмического программирования (C ++, Fortran).

На рисунке 5.19 показан пример моделирования ветрогенератора в пакете Simulink.

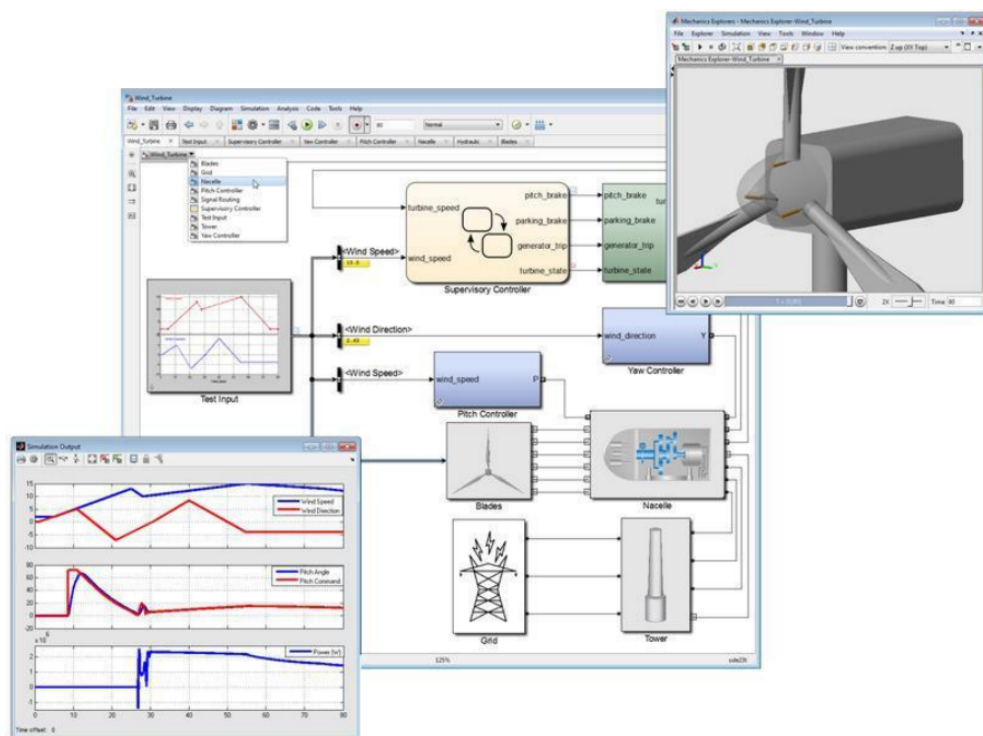


Рисунок 5.19 – Пример моделирования в Simulink

**LabVIEW.** Система LabVIEW – это программный продукт фирмы National Instruments (США), предназначенный для создания моделей виртуальных приборов и контрольно-измерительных систем на базе алгоритмического языка графического программирования (<http://www.labview.ru/LabVIEW>). Система LabVIEW используется для проектирования и исследования систем сбора и обработки данных, удаленного управления ходом эксперимента, управления роботами и системами машинного зрения, генерации и цифровой обработки сигналов, проектирования систем управления техническими объектами и технологическими процессами и пр. По принципам построения эта система аналогична SCADA-системам.

LabVIEW – это среда прикладного графического программирования, которая используется разработчиками, инженерами, преподавателями и учеными по всему миру для быстрого создания комплексных приложений в задачах измерения, тестирования, управления, автоматизации научного эксперимента, а также в области образования.

В основе LabVIEW лежит концепция графического программирования (графический язык G), заключающаяся в описании системы в виде графической блок-диаграммы, состоящей из функциональных блоков и связей между ними [5]. Несмотря на графический ввод, в языке G используются те же конструкции

и методы, что и в классических языках программирования: типы данных, циклы, переменные, рекурсия, обработка событий и объектно-ориентированное программирование.

LabVIEW является идеальным программным средством для создания информационно-измерительных систем, а также систем автоматизации управления на основе технологии виртуальных приборов. LabVIEW позволяет взаимодействовать с реальными аппаратными средствами, такими как встраиваемые в компьютер многоканальные измерительные аналого-цифровые платы, платы захвата и синхронизации видеоизображения для систем машинного зрения, платы управления движением и исполнительные механизмы, измерительные приборы, подключаемые к компьютеру через стандартные интерфейсы RS-232, RS-485, USB, GPIB (КОП), PXI, VXI. Все это в комплексе позволяет разрабатывать системы измерения, контроля, диагностики и управления практически любой сложности.

Кроме того, LabVIEW может интегрировать в себя программы, написанные в среде MatLAB и на языке C. Большое количество встроенных алгоритмов цифровой обработки одномерных и двумерных сигналов позволяет осуществлять весьма сложную обработку сигнала, изображения и экспериментальных данных во временной, в пространственной и спектральной областях. Программная среда LabVIEW постоянно расширяется новыми средствами обработки сигналов на основе вейвлет-анализа, алгоритмов нечеткой логики, сетевых технологий и т. д.

Эффективность использования среды LabVIEW в научных исследованиях состоит в том, что, оставаясь в ее рамках, можно разрабатывать математическую модель объекта и снабжать эту модель экспериментальными данными с помощью аппаратных средств ввода-вывода, сопряженных с реальным объектом.

На рисунке 5.20 приведен пример графического моделирования в пакете LabVIEW.

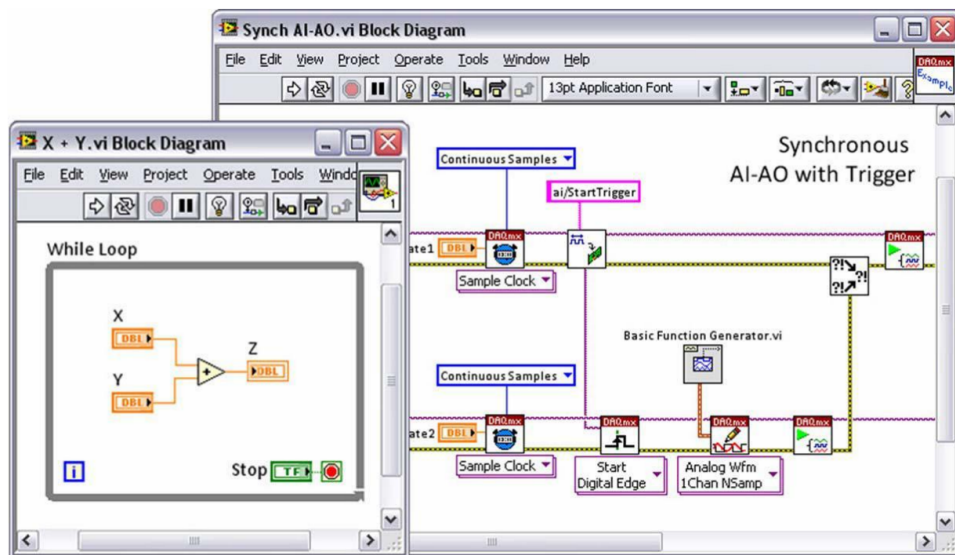


Рисунок 5.20 – Интерфейс программы LabVIEW

**SysCalc.** SysCalc – это программный пакет от компании Arden Technologies Inc. для расчета на системно-техническом уровне различных характеристик: шумовых, коэффициента усиления, интермодуляционных характеристик и суммарного коэффициента усиления последовательности каскадно включенных компонентов, где каждый компонент описывается своими параметрами (<http://www.ardentech.com/>).

Программа SysCalc позволяет на этапе эскизного проектирования осмысленно подбирать такие параметры системы и отдельных блоков, как динамический диапазон, чувствительность, уровни побочных гармоник, и находить их оптимальное покаскадное распределение [8]. Используя данную программу, можно оценить, какие узлы в тракте вносят ухудшение в результирующие характеристики всего тракта, а также исчерпывающе документировать разрабатываемые проекты. SysCalc использует иерархические закладки, чтобы объединить компоненты в связанные страницы автономной системы.

Страницы затем объединяются, формируя законченную систему. Каждая системная страница может быть отдельно настроена, чтобы отображать только важную для пользователя информацию и поля данных. Число компонентов, которые могут быть помещены в страницу, или число страниц, которые могут быть созданы в проекте, произвольно. Можно присоединять один или большее количество отчетов (таблиц и графиков) к каждой системной странице.

Система отчетов программы SysCalc позволяет производить моделирование фазового шума, анализ линейности и ее диапазона, оценку энергетического потенциала канала связи, анализ побочного электромагнитного излучения и т.п. (рисунок 5.21).

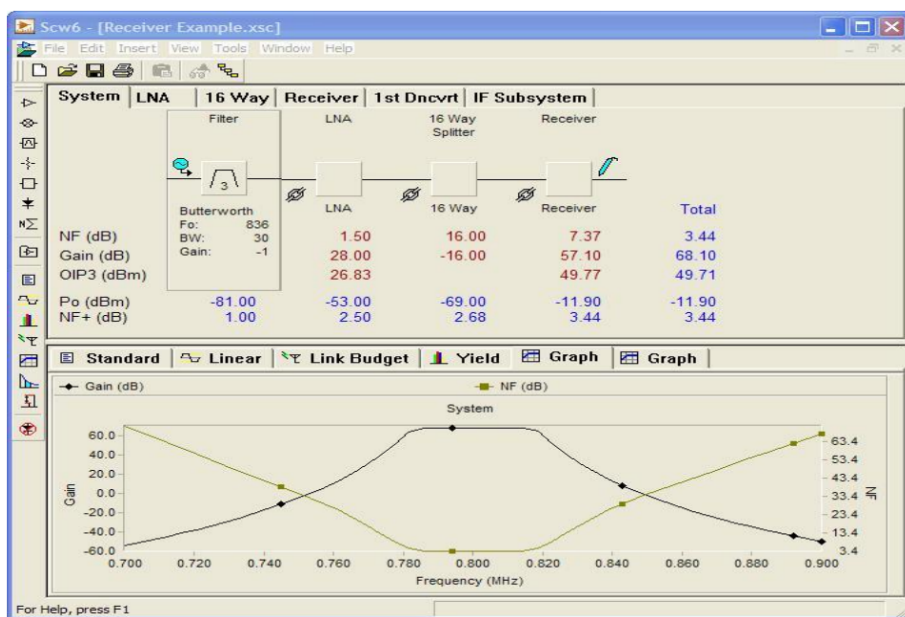


Рисунок 5.21 – Интерфейс программы SysCalc



**Hypersignal RIDE (Hypersignal Block Diagram).** В 1990 г. фирма Hyperception выпустила систему автоматизированного проектирования Hypersignal Block Diagram для визуального проектирования и моделирования на ПК сложных динамических систем с использованием вычислительных возможностей ПК (<http://www.ni.com/support/ride.htm>). В 2003 году компания National Instruments объявила о приобретении Hyperception. Логическим развитием пакета Block Diagram стала САПР Hypersignal RIDE, которая поддерживает аппаратные средства цифровой обработки сигналов (ЦОС), установленные в ПК или связанные с ним по последовательному интерфейсу, и позволяет комбинировать в одном проекте как функции, выполняющиеся в среде процессора ПК, так и функции, выполняющиеся в среде процессора ЦОС.

В состав Hypersignal входит несколько сотен тематически сгруппированных функций-блоков [8]. Среди них блоки генераторов сигналов, блоки арифметических функций, блоки матричных и векторных операций, блоки функций ЦОС, блоки файловых операций, блоки визуализации сигналов и так далее. В состав САПР Hypersignal также входят блоки управления клавиатурой, переключателями, линейными и стрелочными индикаторами и так далее. Наличие этих функциональных блоков позволяет создавать пользовательский интерфейс разрабатываемой системы совместно с разработкой алгоритма функционирования. В дополнение поставляются специализированные библиотеки функций для обработки речи (Advanced Speech Library), библиотеки коммуникационных функций (Advanced Transmission Library) и библиотеки функций для обработки изображений (Image Processing Library).

Пользователям САПР Block Diagram и RIDE дополнительно предлагается генератор ANSI Си-кода. Генератор Си-кода генерирует ANSI Си-код, соответствующий визуализированному алгоритму, разработанному с помощью Hypersignal RIDE или Hypersignal Block Diagram. В дальнейшем этот код может быть встроен в различные программные продукты для ПК, перенесен на альтернативные UNIX-платформы или встроен с применением соответствующих средств кросс компиляции в автономные системы реального времени, созданные на базе различных процессоров.

На рисунке 5.22 приведен пример моделирования системы амплитудной модуляции/демодуляции в пакете Hypersignal.

**Vis Sim.** Программа Vis Sim от компании Visual Solutions (<http://www.vissim.com/>) предназначена для построения, исследования и оптимизации виртуальных моделей физических и технических объектов, в том числе систем управления [8]. Vis Sim – это сокращение выражения Visual Simulator – визуальная, т.е. непосредственно воспринимаемая зрением, программная среда и средство моделирования.

Программный пакет предоставляет развитой графический интерфейс, используя который исследователь создает модель из виртуальных элементов (с некоторой степенью условности и идеализации компонентов) так же, как если бы он строил реальную систему из настоящих элементов (рисунок 5.23). Это позволяет создавать, а затем исследовать и оптимизировать модели систем широкого диапазона назначения и различного уровня сложности.

При использовании Vis Sim не требуется владеть программированием на языках высокого уровня или на ассемблере. В то же время специалисты, владеющие программированием, могут создавать собственные блоки, дополняя ими богатую библиотеку стандартных блоков Vis Sim.

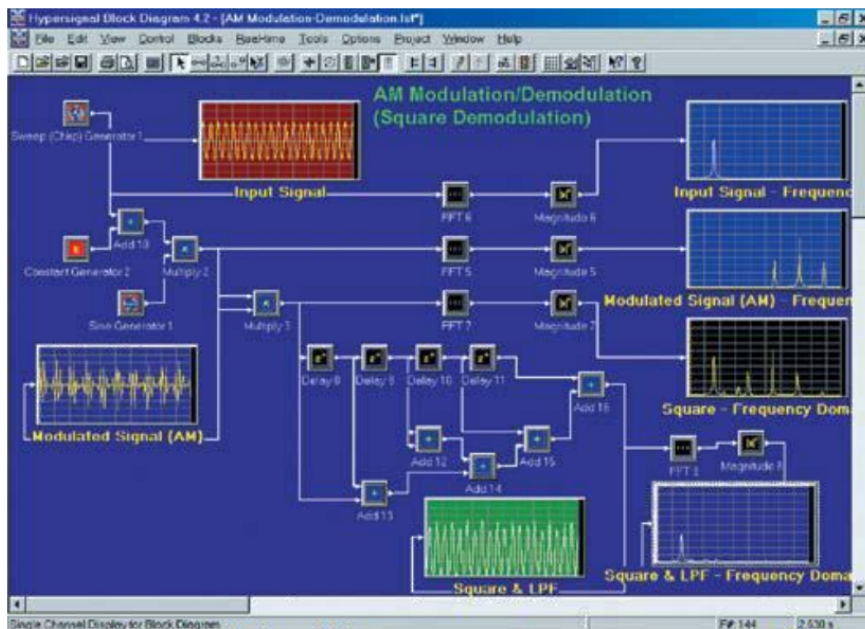


Рисунок 5.22 – Интерфейс программы Hypersignal

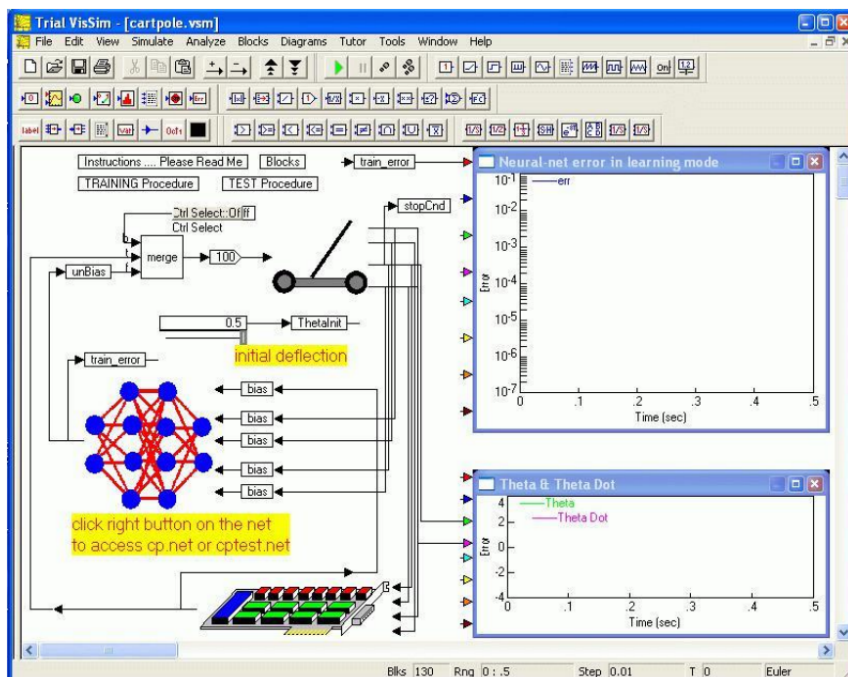


Рисунок 5.23 – Интерфейс программы Vis Sim



**System Vue.** System Vue от компании Agilent Technologies является специализированным программным средством автоматизированного проектирования электронных устройств на системном уровне (<http://www.agilent.com/find/eesof-systemvue>). System Vue позволяет проектировать физический уровень наземных беспроводных и аэрокосмических оборонных систем связи и имеет ценность для разработчиков, программирующих алгоритмы с помощью цифровых сигнальных процессоров и ПЛИС [8].

Платформа System Vue представляет собой простую в использовании среду с современными технологиями моделирования, возможностью подключения к реальной измерительной аппаратуре и проведения испытаний. Она позволяет создавать алгоритмы работы и прототипы архитектур сложных систем связи.

System Vue имеет интуитивно понятный блочный интерфейс среды разработки с обширными библиотеками блоков для построения коммуникационных систем, элементов адаптивного управления и компонентов цифровой обработки сигналов. System Vue поддерживает алгоритмы разработки прототипов и реализации через генерацию VHDL-кода для ПЛИС (FPGA) и ANSI C-кода для встраиваемых цифровых сигнальных процессоров.

На рисунке 5.25 приведен пример моделирования радиосистемы в пакете System Vue.

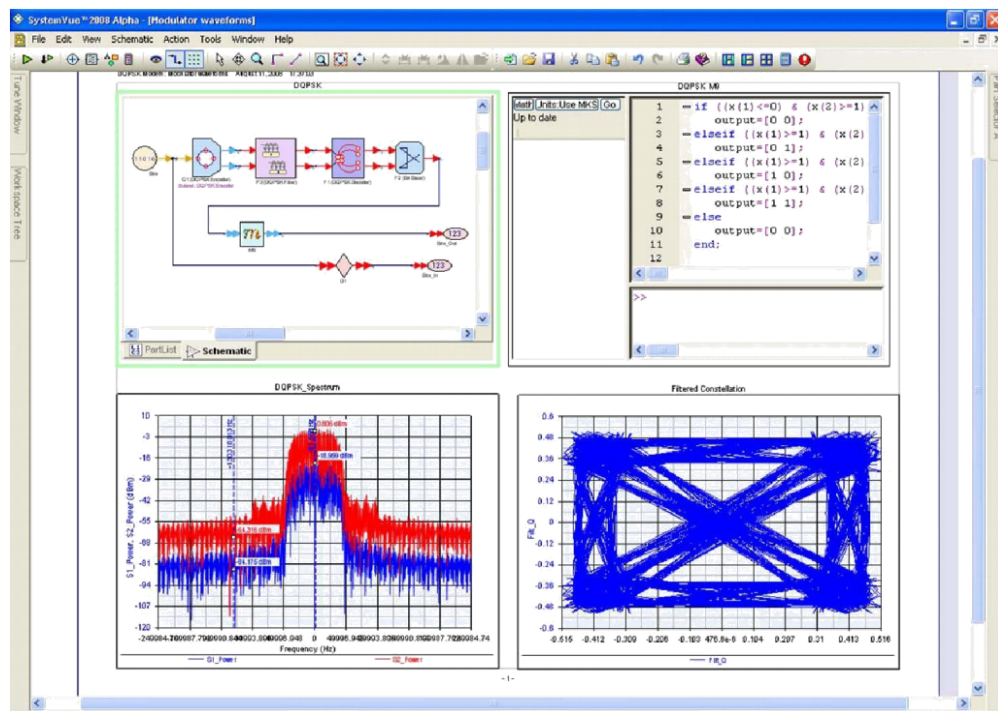


Рисунок 5.25 – Интерфейс программы System Vue

**MicroCAP.** Система MicroCAP фирмы Spectrum Software наиболее распространена в студенческой среде как наиболее простая и доступная в изучении (в 2019 году она стала свободно распространяемой и доступна для скачивания с официального сайта разработчика). Несмотря на простоту, у MicroCAP имеется обширный перечень возможностей. Программа содержит удобный многостраничный редактор принципиальных схем, поддерживающий различные структуры. Имеется возможность описания цифровых компонентов с помощью логических выражений, что в сочетании с библиотекой графических символов типовых операций (суммирование, вычитание, умножение, интегрирование, применение преобразований Лапласа и др.) позволяет моделировать динамические системы, заданные не только принципиальными, но и функциональными схемами. Кроме того, в систему MicroCAP входит специальная программа MODEL для расчета параметров математических моделей аналоговых компонентов по справочным и экспериментальным данным [12].

Пакет MicroCAP рекомендуется для выполнения исследовательских работ, не предусматривающих немедленную конструкторскую реализацию (т.е. разводку печатной платы и оформление конструкторской документации). В состав программы входит модуль расчета параметров моделей аналоговых элементов по результатам экспериментальных исследований (таким способом создаются новые модели). В системе предусмотрен режим исследования чувствительности выходного сигнала к изменению параметров любого элемента схемы. Есть возможность определять входное и выходное сопротивления устройства, а также разрабатывать активные и пассивные фильтры с заданными параметрами.

Полная совместимость со SPICE-моделями и SPICE-схемами и развитые возможности конвертирования позволяют успешно использовать все разработки других схемотехнических САПР (например, ORCAD). Полученные при работе с MicroCAP навыки проектирования и моделирования помогут в случае необходимости гораздо быстрее осваивать более сложные профессиональные пакеты моделирования.

Пример моделирования принципиальной электрической схемы в пакете MicroCAP приведен на рисунке 5.26.

Программа схемотехнического анализа MicroCAP позволяет анализировать аналоговые, цифровые и смешанные (аналого-цифровые) устройства, осуществлять синтез пассивных и активных фильтров. Опытные пользователи могут в нестандартной ситуации создавать собственные модели и макромодели, облегчающие имитационное моделирование сложных электронных систем.

Потенциал схемотехнического моделирования MicroCAP находится на одном уровне с интегрированными пакетами ORCAD и PCAD2002, достаточно сложными в освоении и подразумевающими в первую очередь профессиональное использование.

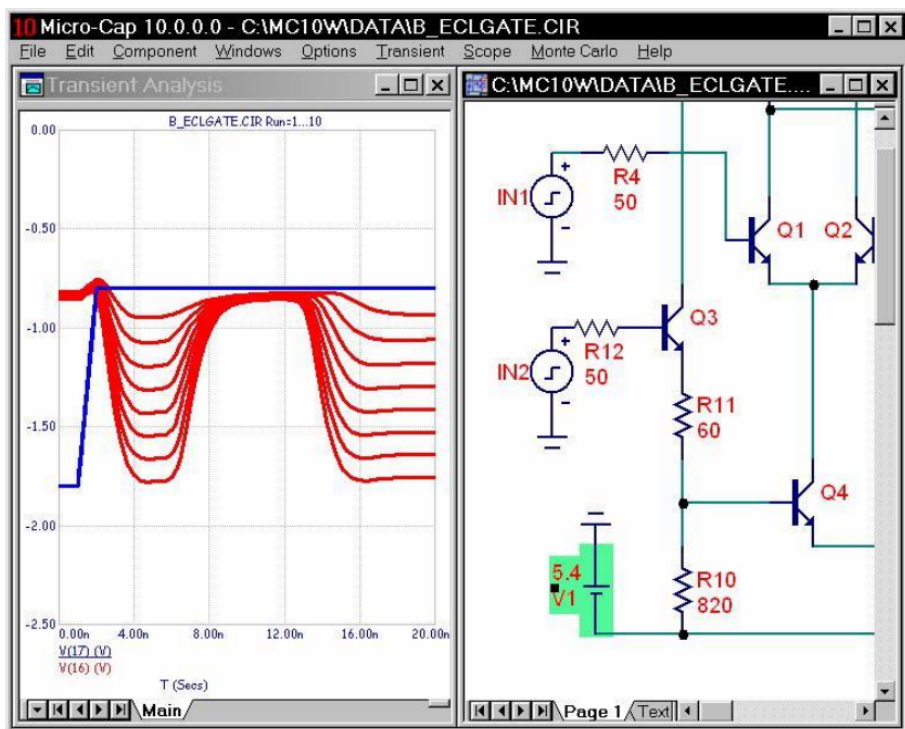


Рисунок 5.26 – Интерфейс программы MicroCAP

Назовем основные возможности моделирования в MicroCAP [13].

1. Моделирование режимов работы электронных устройств, заданных с помощью принципиальных и функциональных схем.

2. Анализ переходных процессов в схемах при подаче напряжения питания и (или) воздействий произвольной формы с построением графиков переменных состояния схемы и их функций:

- зависящих от времени;
- зависящих друг от друга;
- разложенных в ряд Фурье по гармоническим составляющим.

3. Анализ малосигнальных частотных характеристик схемы (линеаризованной в окрестности режима по постоянному току) при воздействии на нее одного или нескольких источников гармонического сигнала с постоянной амплитудой и меняющейся частотой. При этом возможен вывод следующих графиков:

– зависимости комплексных значений переменных состояния (амплитуды, фазы, групповой задержки) от частоты в линейном, логарифмическом, полулогарифмическом (логарифмическом по оси  $X$  или по частоте и линейным по оси  $Y$ ) масштабах;

– зависимости составляющих комплексных величин переменных состояния друг от друга (например, построение годографа радиус-вектора переменной состояния при использовании в качестве переменной  $X$  частотно-зависимой действительной части, в качестве переменной  $Y$  частотно-зависимой мнимой части);

– зависимости спектральных плотностей напряжений шума, приведенных к указанным входному и выходному узлам, от частоты.

4. Анализ передаточных характеристик по постоянному току. Возможно проведение анализа при изменении двух входных переменных, что позволяет строить на графике семейства характеристик устройства:

– зависимости выбранных переменных состояния от изменяемой входной переменной 1 (DCINPUT1);

– зависимости переменных состояния схемы друг от друга.

5. Использование буфера графиков для трех основных режимов анализа, что позволяет воспроизвести в окне графиков результаты предыдущих сеансов моделирования всех видов текущей схемы и других схем.

6. Расчет чувствительностей в режиме по постоянному току. В этом режиме рассчитываются чувствительности одной или нескольких выходных переменных к изменению одного или нескольких входных параметров (частные производные по входным параметрам). В качестве входных изменяемых параметров могут выступать все параметры моделей, величины пассивных компонентов, символьные параметры.

7. Расчет малосигнальных передаточных функций в режиме по постоянному току. Рассчитывается отношение изменения выходного выражения к вызвавшему это изменение малому возмущению входного источника постоянного напряжения (тока). При этом автоматически рассчитываются входное (относительно клемм входного источника) и выходное (относительно узлов выходного напряжения) сопротивления схемы на постоянном токе.

8. Параметрическая оптимизация схемы для всех режимов анализа (кроме Sensitivity и Transfer function). Для трех основных режимов моделирования оптимизируемая функция выбирается из меню PERFORMANCE, включающего большой набор стандартных параметров графиков (длительность нарастания/спада, глобальный максимум/минимум и т.п.).

9. Анализ Монте-Карло – многовариантный анализ при статистическом разбросе параметров компонентов в каждом из трех основных режимов моделирования. Внутри этого анализа возможен вывод гистограмм распределения заданной функции (например, длительности фронта, глобальных максимума и минимума) по интервалам значений.

10. Использование графического постпроцессора PROBE при анализе переходных процессов, малосигнальном частотном анализе и анализе передаточных характеристик по постоянному току, что позволяет выводить любые графики переменных состояния схемы без повторения расчета.

Кроме того, пользователь получает дополнительные удобства для вывода графиков интересующих переменных состояния схемы, которые появляются в графическом окне после клика в соответствующем месте схемы.

Возможности создания новых моделей компонентов заключаются в оформлении моделей в виде схем-макроопределений с обозначенными выводами и списком параметров, которым затем в редакторе компонентов присваивается имя и УГО и тем

самым добавляются новые компоненты, доступные для построения схем и моделирования.

В MicroCAP возможно моделирование идеализированных схем, построенных на основе функциональных блоков (рисунок 5.27).

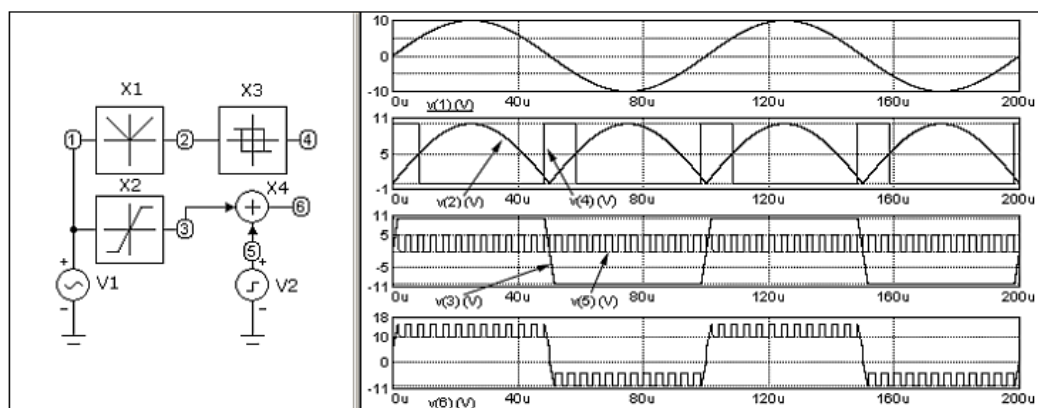


Рисунок 5.27 – Использование функциональных блоков для формирования сигналов

Эти функциональные блоки находятся в разделе Macros библиотеки аналоговых примитивов. В схему они добавляются точно так же, как и остальные компоненты. По своей структуре функциональные блоки – это макроопределения. В принципе, имеется возможность их редактировать, менять внутреннюю структуру и параметры, создавать новые.

Стандартный набор функциональных блоков включает практически все разновидности звеньев, используемых в теории автоматического управления (пропорциональное звено, интегрирующее звено, дифференцирующее звено, сумматор, умножитель и т.д.). Имеются и более сложные функциональные блоки: триггер Шмидта, амплитудный модулятор, пиковый детектор, ПИД-контроллер и т.п. Функциональные цифровые блоки упрощают моделирование сложных цифровых устройств.

MicroCAP позволяет достаточно просто оформлять созданные и отлаженные схемы как макромоделли, которые потом могут являться составной частью каких-либо новых схем.

В качестве примера использования MicroCAP для синтеза структурных схем ЭРЭС рассмотрим решение линейного дифференциального уравнения (ЛДУ) с постоянными коэффициентами методами ТАУ и результат синтеза структурной схемы решающей АСУ [14].

Требуется найти в натуральном масштабе времени решение дифференциального уравнения третьего порядка

$$\frac{d^3 x}{dt^3} - 0,05 \frac{d^2 x}{dt^2} + 0,006 x = 0,01$$

при заданных начальных условиях  $x(0) = 0; x^{(1)}(0) = 0; x^{(2)}(0) = 0$ .



При составлении структурной схемы используется метод понижения порядка производной, т.е. последовательное интегрирование с суммированием величин после каждого интегрирования на входе суммирующего блока (рисунок 5.28).

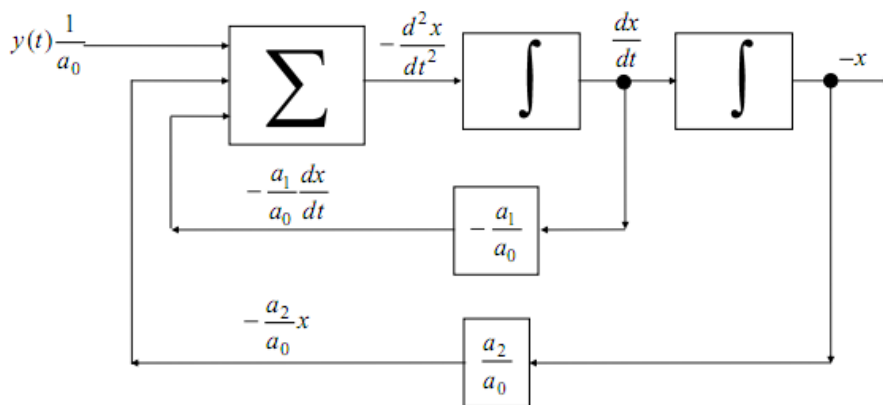


Рисунок 5.28 – Структурная схема набора линейного дифференциального уравнения второго порядка методом понижения порядка производной

Структурная схема решателя ЛДУ, собранного из функциональных узлов в программе MicroCAP, приведена на рисунке 5.29

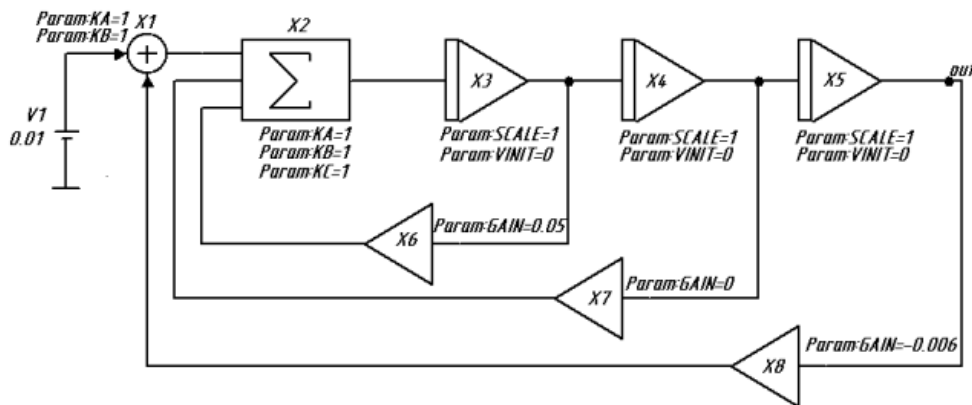


Рисунок 5.29 – Структурная схема для решения дифференциального уравнения

На схеме  $V1$  – задающее воздействие, представленное источником постоянного напряжения величиной 0,01 В;  $X1$  – сумматор на два входа с масштабными коэффициентами, равными единице;  $X2$  – сумматор на три входа;  $X3$ – $X5$  – интегрирующие звенья (интеграторы);  $X6$ – $X8$  – пропорциональные безынерционные звенья (масштабирующий усилитель). Коэффициенты передачи GAIN равны по модулю соответствующему коэффициенту дифференциального уравнения и противоположны по знаку. Искомый результат – значения функции  $x(t)$  – наблюдается на выходе схемы (точка out).

Результат решения дифференциального уравнения в системе MicroCAP на основе структурной схемы (см. рисунок 5.28), состоящей из аналоговых функциональных блоков, представлен на рисунке 5.30.

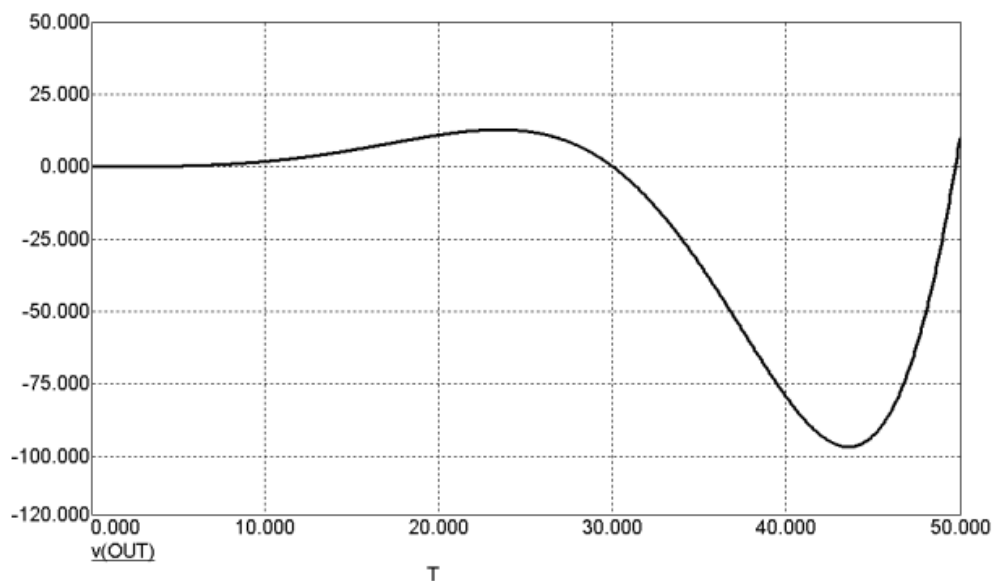


Рисунок 5.30 – Результат решения дифференциального уравнения на основе структурной схемы

### 5.5.3 Особенности технологии автоматизированного проектирования

Технология автоматизированного проектирования ТО базируется на методологии системного подхода. Схема типового маршрута проектирования ТО в среде САПР представлена на рисунке 5.31. Основные компоненты маршрута предусматривают выполнение процедур анализа и синтеза, выступающих в диалектическом единстве [1].

*Анализ ТО* – это изучение его физических свойств, характеризуемых выходными параметрами. При анализе не создаются новые объекты, а исследуются заданные на основе изучения процессов их функционирования. Для этого проводятся вычислительные эксперименты с использованием математических моделей объектов.

*Синтез ТО* – это создание новых вариантов, обеспечивающих заданный алгоритм функционирования и выполнение технических требований к объекту.

Если определяют наилучшие в некотором смысле структуру и параметры, то синтез называют оптимизацией. При определении оптимальных значений параметров говорят о *параметрической оптимизации*. Задачу выбора оптимальной структуры называют *структурной оптимизацией*.

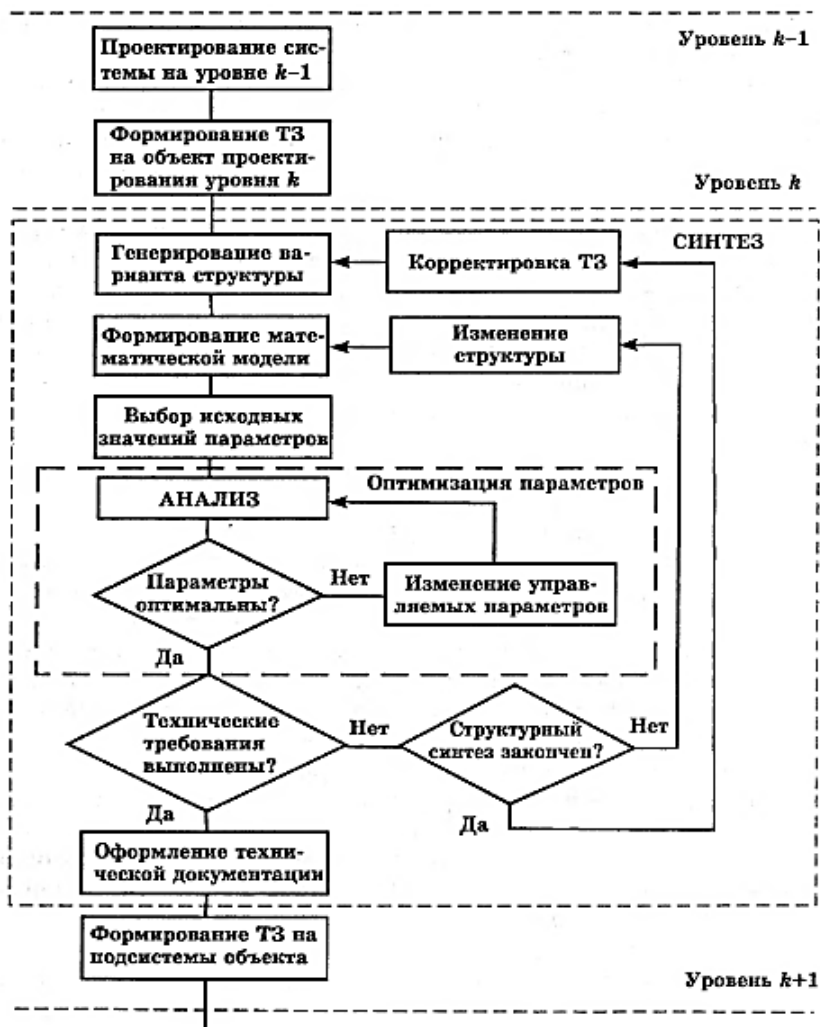


Рисунок 5.31 – Схема типового маршрута проектирования технического объекта в САПР

Декомпозиция и иерархичность процесса проектирования технического объекта обуславливают многообразие решаемых задач, их целей и используемых математических моделей на различных стадиях и этапах. Разнообразие учитываемых при этом физических свойств разделяет объекты на дискретные и непрерывные. Такое различие определяется мощностью множества значений переменных, характеризующих количество вариантов проектных решений. Если множество имеет мощность континуума, объект называют *непрерывным*, а если множество счетно – *дискретным*. Соответственно математические модели этих объектов называют непрерывными и дискретными.

В общем случае задачей синтеза является определение структуры и параметров ТО. В связи с различием математических моделей непрерывных и дискретных объектов методы решения задач их синтеза различны.

Рассмотрим подробнее проектирование непрерывного ТО на основе маршрута, приведенного на рисунке 5.31 [1, 11]. Объектом проектирования может быть любой элемент ТО, выделенный в результате декомпозиции.

Формализовать и автоматизировать процедуру синтеза структуры в большинстве случаев весьма сложно, поэтому синтез структуры объекта обычно осуществляется путем перебора возможных вариантов, генерируемых эвристическими методами. Для каждого варианта структуры формируется математическая модель и выбираются исходные значения внутренних параметров. Сравнить альтернативные варианты структур можно лишь после определения оптимальных параметров элементов объекта. При этом для каждого варианта осуществляется имитация процесса функционирования объекта и определяются его *выходные параметры – показатели качества и эффективности*, которые используются для оценки оптимальности анализируемого варианта.

Математические описания элементов структуры проектируемого объекта известны и хранятся в базе данных. В результате формирование математической модели представляет собой, по существу, синтез абстрактной модели объекта. Процедура синтеза при этом легко формализуется и автоматизируется.

Оптимизации подлежат обычно не все параметры объекта, а только некоторая их часть. Это обусловлено тем, что при проектировании ТО широко используются стандартные и унифицированные элементы, параметры которых не могут быть изменены. Параметры элементов объекта, подлежащие оптимизации, называют *управляемыми параметрами*.

При проектировании часто ограничиваются сравнением нескольких альтернативных вариантов структур, а иногда поиск решения заканчивают, если найден вариант, удовлетворяющий заданным техническим требованиям. Такое проектное решение называют *допустимым*.

Если сравнивается ограниченное число вариантов структур, то основными компонентами технологического маршрута проектирования являются синтез структуры, анализ и оптимизация параметров вариантов структур, процедура оценки и принятия решения.

## Выводы

1. Моделируются проектные решения, относящиеся к системе, а не требования к ней.
2. Моделирование поддерживает проектную и конструкторскую деятельность, то есть этап, на котором выполняется основная часть творческой работы.
3. Моделирование помогает инженеру «вжиться» в систему в степени, достаточной для декомпозиции требований на определенном уровне, чтобы перейти на следующий, более низкий уровень. Сами требования представляют собой моментальный снимок полной картины того, что необходимо на каждом уровне, с повышением степени детализации по мере перехода на более низкие уровни.

4. Конкретная модель никогда не даёт полной информации о системе, в противном случае её уже нельзя было бы назвать моделью. Поэтому для получения как можно более полного представления о множестве разнообразных свойств системы часто используется несколько различных, возможно, взаимосвязанных моделей.

5. Если необходимо создать сложную техническую систему, то задача не сводится к разработке самой сложной её архитектуры. Проблема в том, чтобы разработать правильную архитектуру, причём так, чтобы её размер был минимален. При таком подходе разработка качественной ТС заключается в выборе архитектуры, подходящих инструментов и средств управления процессом.

6. Свойство системотехнической инвариантности ЭРЭС заключается в том, что конкретная целевая функция системы может быть реализована несколькими способами на уровне функциональной структуры этой системы.

7. Стадия моделирования включает в себя этапы построения моделей, оптимизации, выбора (принятия решения).

8. При разработке сложной системы важно создавать высокоуровневые модели её структуры и поведения, чтобы понять, как может быть сконфигурирована система для того, чтобы она отвечала предъявляемым требованиям.

9. Унифицированный язык моделирования UML предлагает аналитикам и специалистам по проектированию 13 разных способов схематического представления различных характеристик системы. Среди них выделяется шесть статических, или структурных, диаграмм и семь динамических, или поведенческих, диаграмм.

10. В настоящее время существует большое разнообразие программных пакетов системотехнического проектирования и моделирования ЭРЭС. Одной из первостепенных задач системотехника является выбор оптимальной программы, наиболее подходящей для решения имеющихся задач.

11. Формализовать и автоматизировать процедуру синтеза структуры в большинстве случаев весьма сложно, поэтому синтез структуры ТС обычно осуществляется путем перебора возможных вариантов, генерируемых эвристическими методами.

### **Контрольные вопросы**

1. Моделируются ли требования к проектируемой системе? Ответ поясните.
2. Как соотносятся требования, выдвигаемые к объекту проектирования, и процесс его моделирования?
3. Какую роль играет моделирование в проектной деятельности системотехника?
4. Из каких этапов состоит стадия моделирования?
5. Каковы функции моделирования?
6. Каковы требования, предъявляемые к моделям?
7. В чем смысл оптимизации модели?
8. Что такое структурно-функциональное моделирование?

9. Какие языки системного моделирования применяются в системотехнике?
10. Как связаны математическое и компьютерное моделирование?
11. Какие САПР в области системотехники вам известны?
12. Какова последовательность операций типового маршрута проектирования технического объекта в САПР?

### Упражнения

1. Разработайте UML-диаграмму использования вашего мобильного телефона.
2. Разработайте диаграмму классов для системы управления малым космическим аппаратом формата CubeSAT.
3. Разработайте с помощью языка моделирования SysML диаграмму требований для радиотехнической системы постановки активных помех.
4. Разработайте с помощью языка моделирования SysML модель сценария использования системы телеметрии лунохода.
5. Разработайте диаграмму вариантов использования стиральной машины.
6. Разработайте в SysML дерево функций и диаграмму деятельности для аэропортовой системы досмотрового контроля.
7. Выполните лабораторные работы в программе MicroCAP, руководствуясь лабораторным практикумом [14].
8. Выполните лабораторные работы в программе System Vue, руководствуясь учебным пособием [2].

### Рекомендуемая литература

1. Анализ и проектирование ВЧ и цифровых систем с помощью Keysight SystemVue : учеб. пособие. – М. : KeySV, 2017. – 136 с.
2. Борисов Ю.П. Математическое моделирование радиотехнических систем и устройств / Ю.П. Борисов, В.В. Цветнов. – М. : Радио и Связь, 1985.
3. Los Santos H.J.D. Radio Systems Engineering : A tutorial approach / H.J.D. Los Santos, C. Strum, J. Pontes. – Springer, 2015.
4. Трухин М.П. Основы компьютерного проектирования и моделирования радиоэлектронных средств : учеб. пособие для вузов / М.П. Трухин. – М. : Горячая линия – Телеком, 2017. – 386 с.
5. Цапенко М.П. Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование : учеб. пособие для вузов / М.П. Цапенко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 438 с.
6. Трухин М.П. Математическое моделирование радиотехнических устройств и систем: лабораторный практикум / М.П. Трухин. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 190 с.
7. Трухин М.П. Моделирование сигналов и систем. Сетевые модели : учеб. пособие / М.П. Трухин. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 204 с.

8. Кубланов В.С. Анализ биомедицинских сигналов в среде MATLAB : учеб. пособие / В.С. Кубланов, В.И. Борисов, А.Ю. Долганов. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 120 с.
9. Дьяконов В.П. MatLAB и SimuLINK для радиоинженеров. – М. : ДМК Пресс, 2011. – 976 с.
10. Загидуллин Р.Ш. SystemView. Системотехническое моделирование электронных устройств / Р.Ш. Загидуллин, С.Н. Карутин, В.Б. Стешенко. – М. : Горячая линия – Телеком, 2005. – 294 с.
11. Разевиг В.Д. SystemView – средство системного проектирования радиоэлектронных устройств / В.Д. Разевиг, Г.В. Лаврентьев, И.Л. Златин ; под ред. В.Д. Разевига. – М. : Горячая линия – Телеком, 2002. – 352 с.
12. Златин И.Л. SystemView 6.0 (SystemVue). Системное проектирование радиоэлектронных устройств / И.Л. Златин. – М. : Горячая линия – Телеком, 2006. – 424 с.
13. Бабич А.В. UML: Первое знакомство / А.В. Бабич. – М. : НОУ «Интуит», 2016. – 209 с.
14. Буч Г. UML. Руководство пользователя / Г. Буч, Д. Рамбо, А. Джекобсон ; пер. с англ. Н. Мухина. – 2-е изд. – М. : ДМК Пресс, 2006. – 496 с.
15. Леоненков А.В. Нотация и семантика языка UML и IBM Rational Rose / А.В. Леоненков. – М. : НОУ «Интуит», 2016. – 205 с.
16. Леоненков А.В. Самоучитель UML 2 / А.В. Леоненков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2007. – 576 с.
17. Ларман К. Применение UML 2.0 и шаблонов проектирования. Практическое руководство : пер. с англ. / К. Ларман. – 3-е изд. – М. : Вильямс, 2013. – 736 с.
18. Unhelkar B. Software Engineering with UML / B. Unhelkar. – CRC Press, 2018. – 427 p.
19. Dennis A. Systems Analysis and Design: An Object-Oriented Approach with UML / A. Dennis, B.H. Wixom, D. Tegarden. – 5<sup>th</sup> ed. – Wiley, 2015. – 544 p.
20. Lamsweerde A. Requirements Engineering: From System Goals to UML Models to Software Specifications / A. Lamsweerde. – Wiley, 2012. – 714 p.
21. Мизгулин В. Системный инженер. Как начать карьеру в новом технологическом укладе / В. Мизгулин. – М. : Издательские решения, 2017. – 109 с.

### **Список литературы**

1. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем : учеб. для вузов / В.П. Тарасик. – Минск : ДизайнПРО, 2004. – 640 с.
2. Халл Э. Инженерия требований / Э. Халл, К. Джексон, Дж. Дик ; пер. с англ. А. Снастина ; под ред. В.К. Батоврина. – М. : ДМК Пресс, 2017. – 218 с.
3. Буч Г. UML. Руководство пользователя / Г. Буч, Д. Рамбо, А. Джекобсон ; пер. с англ. Н. Мухина. – 2-е изд. – М. : ДМК Пресс, 2006. – 496 с.

4. Кривин Н.Н. Введение в методологию системо- и схмотехнического проектирования электронных и радиоэлектронных средств : учеб. пособие для бакалавриата, специалитета и магистратуры / Н.Н. Кривин. – Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2020. – 250 с.
5. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп ; пер. с англ. Б.И. Копылова. – М. : Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.
6. Перегудов Ф.И. Введение в системный анализ : учеб. пособие для вузов / Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасенко. – М. : Высш. шк., 1989. – 367 с.
7. Новиков А.М. Методология / А.М. Новиков, Д.А. Новиков. – М. : Синтег, 2007. – 668 с.
8. Шостак А.С. Особенности применения САПР System Vue / А.С. Шостак, И.И. Горелкин. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2019. – 76 с.
9. Системная инженерия. Принципы и практика / А. Косяков, У. Свит [и др.] ; пер. с англ. под ред. В.К. Батоврина. – М. : ДМК Пресс, 2014. – 624 с.
10. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств : учеб. пособие для вузов / О.В. Алексеев, А.А. Головков, И.Ю. Пивоваров [и др.] ; под ред. О.В. Алексеева. – М. : Высш. шк., 2000. – 479 с.
11. Щепетов А.Г. Основы проектирования приборов и систем : учеб. и практикум для академического бакалавриата / А.Г. Щепетов. – М. : Юрайт, 2016. – 458 с.
12. Антипенский Р.В. Схмотехническое проектирование и моделирование радиоэлектронных устройств / Р.В. Антипенский, А.Г. Фадин. – М. : Техносфера, 2007. – 128 с.
13. Амелина М.А. Программа схмотехнического моделирования MicroCAP. Версии 9, 10 / М.А. Амелина, С.А. Амелин. – Смоленск : Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2013. – 618 с.
14. Озеркин Д.В. Основы автоматики и системы автоматического управления: Компьютерный лабораторный практикум / Д.В. Озеркин. – Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроника, 2012. – 176 с.



## 6 ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМОТЕХНИКИ ЭЛЕКТРОННЫХ И РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Если вы хотите, чтобы команда выиграла прыжки в высоту, найдите одного человека, который может прыгнуть на семь футов, а не семь человек, прыгающих каждый на один фут.

*Закон новшества (Мэрфология)*

Как только идея становится понятной всем, её пора менять.

*Закон доступности Джексона (Мэрфология)*

### 6.1 Факторы развития технических систем

Этот заключительный раздел учебного пособия содержит взгляд в будущее системной инженерии, на законы её развития и области, в которых инженеры-системотехники могли бы рассчитывать на то, что их профессия будет вносить своевременный и значимый вклад в развитие всего общества.

Методология системотехники ЭРЭС базируется на пяти основаниях: философско-психологическом, системном, науковедческом, этическом и эстетическом [1]. Соответственно развитие каждого из оснований обеспечивает развитие системотехники ЭРЭС.

Переосмысление человеком своего положения в мире и природе, своего места среди технических систем, эволюция когнитивного состояния людей, развитие системных представлений об объектах, окружающих человека, эволюция онтологий человеческой деятельности, обогащение человеческого опыта с точки зрения этической, моральной стороны деятельности, развитие наук о мироздании и о самом человеке, а также эволюция его эстетического восприятия – все это и многое другое определяет дальнейшее развитие многогранной отрасли системотехники.

Системотехника, зародившись в недрах аэрокосмического и оборонного сообществ, распространилась во многие другие сферы жизнедеятельности человечества, такие как транспорт, кибербезопасность, здравоохранение, коммуникации, наука и т.д. Инженерам необходимо анализировать и прогнозировать будущее системотехники, чтобы выявлять значимые потенциальные изменения, своевременно адаптироваться к ним и развиваться, сохраняя актуальный уровень своей научно-технической подготовки.

Можно выделить четыре основных фактора развития технических систем:

- 1) эволюцию потребностей общества;
- 2) эволюцию назначения систем;
- 3) изменение конкуренции и характеристик проектных команд;
- 4) эволюцию потенциальных техногенных угроз.

Три основных вызова станут в будущем причиной необходимости в адаптации инженера-системотехника к меняющимся условиям окружающей среды и требованиям специальности:

- 1) усложнение технологий;
- 2) усложнение процессов;
- 3) усложнение взаимодействий в человеко-машинных системах.

Успешный инженер-системотехник должен воспринимать любой новый вызов как новую возможность для своего профессионального и интеллектуального развития.

**Эволюция потребностей общества.** По мере того как люди всё более познают возможности системотехники ЭРЭС и использование её наработок в современных условиях, они должны смотреть в будущее, прогнозируя направления её развития. Это необходимо, чтобы опережать своих конкурентов, предвидеть возможные угрозы и изменения среды обитания. Такие события, как изменение климата или мировые конфликты, могут потребовать быстрого изменения возможностей ТС или учета потребностей общества и его опыта, которые будут определять новые характеристики существующих ТС. Таким образом, системному инженеру потребуется пересмотреть потребности общества и преобразовать эти новые потребности в системные и функциональные требования для разработки новых возможностей ТС [2].

**Изменение функций технических систем и развитие науки.** Иногда текущие события могут вызывать изменения в ТС такими способами, которые не предполагались разработчиками изначально. Поскольку эксплуатация ТС (обычно военного или космического назначения) осуществляется, как правило, в изменчивых средах, эти системы разрабатываются без учета некоторых непредсказуемых и непрогнозируемых свойств таких сред. Тем не менее операторы ТС должны выполнять свою задачу с теми возможностями, которые им предоставлены системотехниками. Случается, что операторы ТС адаптируют систему так, как не представляли разработчики и тестировщики. Это дает ценный опыт и уроки, а также представление о следующей версии системы, особенно если она была успешной на местах эксплуатации. В других случаях операторы могут отказаться от системы, если она не соответствует назначению. Системные функции могут созревать постепенно и включать со временем дополнительный функционал, чтобы ТС оставалась актуальной.

Военные системы должны выполнять со временем дополнительные задачи. Так, эсминцы и крейсера противовоздушной обороны будут модифицироваться, чтобы выполнять функции наземной атаки и противоракетной обороны, оставаясь в тренде возникающих угроз. Истребители класса «воздух-воздух» будут развиваться, чтобы обладать функциями класса «воздух-земля». При этом системный инженер должен будет оценивать, как существующая система сможет выполнять свои первоначальные задачи с учетом новых требований, архитектуры, интерфейсов и процедуры тестирования.

Как говорилось ранее, появление новых ТС связано с появлением новых функций, которые возникают в результате развития фундаментальной науки. Фундаментальная наука развивается благодаря открытию новых физических явлений и принципов, законов и закономерностей.

Потребности современного общества диктуют все более жесткие требования к науке. ТС, требования к свойствам и характеристикам которых ещё вчера были фантастическими, сегодня принимаются людьми как очевидная данность (умные материалы, искусственный интеллект, звуковой синтезатор речи, автомобили с автопилотом, робототехника с ИИ). Прикладная наука в таких условиях начинает все больше играть обслуживающую потребности общества роль. А вектор развития фундаментальной науки становится все более ориентированным на поиск новых принципов природы, которые позволяли бы воплощать самые смелые фантазии и желания людей. Возникает эффект, который можно назвать «знание по заказу» или «знание по требованию», когда формулируется «фантастическое» требование к ТС, не реализуемое посредством известных на текущий момент физических эффектов или принципов, затем формируется междисциплинарная группа ученых из самых разных отраслей науки и в предельно сжатые сроки находит это новое знание, передает эстафету системотехникам и схемотехникам, которые воплощают новые принципы в реальную ТС.

Вместе с тем возрастает масштаб этических проблем, возникающих на разных этапах жизненного цикла ТС, начиная с момента зарождения идеи воплощения какой-либо системы и заканчивая этапом ее утилизации.

**Проблемы рыночной конкуренции и проектных команд.** По мере развития деловых отношений и взаимодействий различных бизнес-систем изменяется их конкурентная среда. В будущем это будет все чаще происходить в форме изменения стратегии развития системы с целью увеличения доли рынка или посредством изменения направления деятельности компаний и попыток захвата бизнеса в новой области. Такие изменения могут породить дополнительные системы и возможности, которыми заинтересуются взаимодействующие стороны и стейкхолдеры, что заставит их конкурентов создавать новые ТС в ответ. Эти изменения могут быть также ответом на изменения самих пользователей и/или их целей. Системному инженеру необходимо выявить дополнительные требования, оценить существующие требования или рассмотреть вопрос об изменении потребностей пользователей и окончательной архитектуры системы, учитывая, как эти изменения повлияют на её текущую (и будущую) конфигурацию.

Командные отношения могут возникнуть в результате изменения среды, а бывшие конкуренты в новых условиях стать партнерами. Также системам могут потребоваться изменения интерфейсов и процедур интерпретации данных, чтобы взаимодействовать с новыми партнерами с целью получения желаемых конечных результатов. Системные инженеры должны хорошо разбираться в описании таких интерфейсов и применять эти знания.

**Изменение техногенных угроз и опасностей.** Развитие ТС приводит к росту рисков и угроз техносферной безопасности. Посредством оценки угроз

системотехник должен помочь стейкхолдерам проанализировать текущую систему, определить пробелы в знаниях о её поведении на основе желаемых результатов и сформулировать новые требования и возможности для устранения будущих угроз. Картина угрозы часто является расплывчатой, нечеткой и неполной, поэтому может потребоваться анализ в условиях отсутствия полных данных, а принятие решений может происходить в условиях неопределённости. Сроки внесения изменений могут быть предельно сжаты, чтобы предупредить возможность наступления этой угрозы [2].

**Проблемные технологии.** Внедрение новых технологий в жизнь общества может ускорить темпы изменений. Чтобы оставаться актуальными, пользователям и целым отраслям потребуется адаптация к изменяющимся условиям. Особенность современного общества в том, что оно гораздо охотнее принимает новые технологии.

Типичными примерами проблемных технологий являются система глобального позиционирования (GPS), предназначенная для предоставления услуг точного определения местоположения, и Интернет, предназначенный для обеспечения глобальной связи. Другие проблемные технологии связаны с источниками энергии, миниатюризацией, развитием сетей и внедрением новых материалов. Системные инженеры могут помочь предвидеть, как новые технологии увеличат существующие потребности пользователей, а также выявить новые потребности [3]. Системотехники должны способствовать улучшению существующих системных архитектур с целью адаптации новых технологий, а также разрабатывать обновлённые архитектуры, по мере того как новая технология будет становиться всё более распространённой.

**Проблемы процессов.** Поскольку правительства, компании и отдельные пользователи находят более инновационные способы достижения своих целей, в конечном итоге потребуется разработать политику, процедуры и стандарты, чтобы помочь кодифицировать и формализовать эти процессы.

Системотехнику потребуется найти общие определения этих процессов и помочь пользователям с переходом на новые процессы. Он должен провести анализ потребностей и затрат, чтобы показать законное обоснование смены процессов, а также участвовать в проверке (верификации) этих процессов с целью подтверждения, что они могут обеспечивать дополнительную ценность.

**Проблемы взаимодействия людей и технических систем.** Взаимодействие между пользователями и системами продолжает развиваться по мере внедрения в общество новых технических систем. Типичным примером является iPhone с уникальным пользовательским интерфейсом и то, как он повлиял на большую часть общества и взаимодействовал с цифровым миром.

По мере появления новых сценариев взаимодействия пользователей и систем системотехник может проанализировать, как изменится влияние ТС на пользователя, и помочь сформировать новые требования разных пользователей, а также провести анализ воздействия новых систем на социум по мере их внедрения.

## 6.2 Сферы применения системотехнического инженерного подхода

Системотехнический инженерный подход применяется в самых разнообразных областях: от военной и аэрокосмической до бытовой. В некоторых из них может применяться упрощенная модель жизненного цикла ТС, тогда как в других областях для разработки адекватной концепции будущей системы требуется применение масштабного подхода, охватывающего все стадии ЖЦ проектируемой ТС. Даже в традиционных областях человеческой деятельности внедрение интеллектуальных сетей или глобальных интерфейсов требует особого внимания. Рассмотрим области, которые могут либо извлечь выгоду из системного мышления и системного подхода, либо использовать методы, выходящие за рамки традиционного системотехнического подхода.

**Здравоохранение.** Новые подходы к организации способов взаимодействия человека с системой здравоохранения заключаются в предоставлении медицинских услуг с целью встраивания ТС в тело пациента для получения данных о его текущем психофизиологическом состоянии. Со стороны системной инженерии могут потребоваться новые подходы, чтобы включить дополнительные политики и стандарты для рассмотрения практических вопросов и требований безопасности. При тестировании, когда речь идет о встроенных системах, понадобятся другие подходы.

Сфера здравоохранения имеет сложную и взаимозависимую экосистему, которая включает такие факторы, как технологии, страхование, государственная политика, больницы, человеческий фактор, социальные факторы, медицинское обслуживание на дому и многое другое.

При лечении пациента каждый фактор влияет на один или несколько других факторов. Поэтому при разработке решений, направленных на удовлетворение потребностей заинтересованных сторон, необходимо учитывать целостную системотехническую перспективу. Следует обращать внимание на то, что эти взаимозависимости могут различаться в разных частях мира, поэтому системотехник должен учитывать индивидуальный подход к разработке систем при обслуживании предполагаемой группы населения. Глобальные взаимодействия и угрозы создают проблемы и возможности для применения методов системного проектирования, чтобы использовать технологии и услуги, которые ранее не рассматривались.

**Транспорт.** Сфера транспорта, скорее всего, будет опираться как на новые, так и на классические системотехнические подходы. Новые подходы должны выявлять уникальные транспортные потребности в ЭРЭС, которые нуждаются в новой инфраструктуре и новых системах. Классический системотехнический подход обеспечит использование существующей инфраструктуры и интеграцию с действующими системами. Системотехник может помочь удовлетворить транспортные потребности в ЭРЭС, начиная от самых загруженных городов и заканчивая самыми отдаленными сельскими районами. По мере изменения видов транспорта системный

инженер должен будет мыслить целостно, творчески, а также приспособливаться к этим изменениям.

Системотехник может помочь синхронизировать потребности с доступной инфраструктурой и окружающей средой, чтобы сбалансировать окружающую среду и удовлетворить прогнозируемые будущие потребности, возможно, используя существующие природные ландшафты и области. Системные инженеры также должны бороться с деградацией систем, которая может приводить к техногенным катастрофам. При проектировании систем следует учитывать широкий круг пользователей, услуг и условий эксплуатации. Системотехника может помочь определить эти условия и разработать новые системы.

**Окружающая среда и критическая инфраструктура.** Энергетика, водоснабжение, связь, финансы и транспорт образуют множество критических инфраструктурных секторов, обслуживающих социум. Решение крупных и растущих проблем станет задачей системной инженерии в аспектах моделирования, анализа и тестирования систем. Необходимо включение взаимозависимостей между различными критическими инфраструктурными секторами в моделирование проблемы, а также применение принципов системного мышления для выявления необходимых в будущем возможностей.

Представление, как система будет взаимодействовать с обществом и с окружающей средой, также должно быть сформировано системной инженерией. Благодаря системному мышлению и сложным адаптивным методам системного анализа будет обеспечиваться развитие возможностей всего социума.

**Кибербезопасность и Интернет вещей.** Увеличение количества подключенных к глобальной информационной сети устройств улучшит качество жизни множества людей. Наряду с этим улучшение безопасности должно идти в ногу с развитием угроз и гарантировать, что данные не будут повреждены или похищены. Системная инженерия должна рассматривать безопасность как важный фактор при проектировании систем, а также способствовать, чтобы системы, принимающие решения, учитывали требования безопасности (например, физической, экономической и социальной). Системотехнику необходимо понимать разницу между процессами принятия решений человеком, машиной и человеко-машинной системой, особенно когда системы увеличивают свои возможности по обработке данных. При большом количестве взаимозависимых систем, соединенных вместе, для которых требуются линии электропитания и связи, возникнут проблемы с определением изменяющихся требований, архитектуры и дизайна в больших масштабах и с более быстрым временем развертывания.

Отдельно стоит остановиться на процессах цифровой трансформации, происходящих практически во всех сферах деятельности людей. Термин «Индустрия 4.0» появился в Европе: в 2011 году на одной из промышленных выставок в Ганновере правительство Германии заявило о необходимости более широкого применения информационных технологий в производстве. Специально созданная для этого группа официальных лиц и профессионалов разработала стратегию превращения производственных предприятий страны в «умные». Этому примеру

последовали другие страны, активно осваивающие новые технологии. Термин «Индустрия 4.0» стали использовать как синоним четвертой промышленной революции [4].

Цифровая трансформация неразрывно связана с реализацией концепции «Индустрия 4.0». В то время как концепция «Индустрия 3.0» направлена на автоматизацию отдельных машин и процессов, «Индустрия 4.0» предусматривает сквозную цифровизацию всех физических активов и их интеграцию в цифровую экосистему вместе с партнерами, участвующими в цепочке создания стоимости. Достижение эффекта от воплощения концепции «Индустрия 4.0» возможно только при наличии хорошо налаженных процессов получения и анализа данных, а также обмена ими.

Концепция «Индустрия 4.0» включает соответствующие цифровые технологии:

- Интеллектуальные датчики;
- Дополненная реальность (Augmented Reality, AR);
- Роботизация бизнес-процессов (RPA);
- BigData;
- Облачные сервисы, Интернет вещей (IoT);
- Виртуальная реальность (Virtual Reality, VR);
- Мобильные устройства;
- 3D-печать.

Концепция «Индустрии 4.0» непосредственно опирается на понятие цифровых двойников. Цифровой двойник (digital twin) определяется как виртуальное представление физического объекта или системы на протяжении их жизненного цикла с использованием в реальном времени данных интеллектуальных датчиков.

В рамках технологии цифровых двойников для физического объекта, единицы оборудования или целого процесса создается математическая модель, которая используется для анализа поведения объекта. Цифровая модель постоянно обновляется, чтобы максимально полно соответствовать текущему рабочему режиму реальной установки. Это дает возможность выявить непредусмотренные изменения в процессах, оптимизировать режимы работы оборудования, предотвращать поломки и аварии, что в итоге существенно повышает надежность и эффективность эксплуатации.

Цифровая копия пространств, активов, оборудования и процессов позволяет удаленно управлять объектами, дистанционно эксплуатировать и устранять неполадки в системах. По данным Eutech Cybernetics, компании могут сократить расходы более чем на 30 %, перейдя на интеллектуальную эксплуатацию и управление.

«Индустрия 4.0» – это новый актуальный вызов для современных системотехников.

**Автономные системы и искусственный интеллект.** По мере развития интеллектуальных автономных систем их адаптация и сложность потребуют сопоставимого уровня системного проектирования. Такие системы включают в себя беспилотные транспортные средства, робототехнику, аэрокосмические объекты (включая дроны), разработку и сборку производственных технологических комплексов и системы финансовой торговли. Потребуется тщательно выверенные

методические подходы к системному проектированию для решения сложных социальных и этических проблем, возникающих в процессе разработки и эксплуатации таких систем. Автономные системы могут функционировать в условиях, в которых не могут работать люди. Они должны реагировать на неожиданные изменения в окружающей среде. Системная инженерия должна предложить способы реализации этих систем.

**Промышленность и производство.** Системная инженерия должна внести свой вклад в развитие технологий промышленности и производства. По мере того как изменяются потребности общества, производственные организации и системы должны быть более гибкими, чтобы адаптироваться к этим изменениям по скорости и масштабу для удовлетворения спроса. Поскольку новые продукты будут взаимодействовать с существующими системами и иметь обратную совместимость, в этих системах необходимо учитывать дополнительные сложность, интерфейсы и особенности обмена данными. Использование междисциплинарных методов для учета технических, социальных и пользовательских потребностей при разработке системы будет задачей системотехников, особенно на этапах концептуального проектирования, интеграции, тестирования и развертывания.

### 6.3 Образование для системотехников будущего

Чтобы опередить спрос на улучшенные продукты и услуги системной инженерии и повысить ценность образования в этой области, потребуется его переоценка. Проверенные временем концепции, процессы и подходы системной инженерии являются основой, которой должны следовать системотехники. Рассмотрим направления, которые необходимо изучить для разработки качественных продуктов системной инженерии [2].

**Основные предметные области системотехники.** Системные инженеры должны совершенствовать свои компетенции в области определения проблем, разработки требований, построения архитектуры, маркетингового анализа, а также тестирования и оценки. Повышение мастерства использования инструментария системного проектирования необходимо для взаимодействия с другими клиентами и отраслевыми партнерами. Однако стоит помнить, что инструментарий системотехника позволяет расширить влияние и совместимость мышления системного инженера, но не заменяет его мышления. Дополнительные знания в фундаментальных предметных областях, таких как системы систем и комплексный адаптивный системный анализ [2], могут помочь выйти за рамки единой системы мышления.

**Системное мышление и целостная перспектива.** В будущем системная инженерия может помочь в разработке комплексного подхода к проектированию систем за счет более широкого использования системного мышления в целостном ракурсе для изучения взаимозависимостей системы. Принимая во внимание различные точки зрения: пользователей, других систем, политик, культур или сред,



можно лучше понять значимые факторы, влияющие на производительность системы. Это приведет к ряду более строгих требований и может помочь системе стать более устойчивой в таких ситуациях, как бедствия или устаревание (деградация).

**Трансдисциплинарные разработки и разнообразная командная работа.** Системные инженеры должны иметь возможность беспрепятственно работать в разных группах, чтобы учитывать интересы и потребности разных пользователей, разные перспективы. Командная работа позволяет создать надежный набор требований для полного описания необходимых функций и интерфейсов. Включение различных дисциплин в проектирование может дать дополнительное понимание требований и интерфейсов во время разработки.

Работа в команде особенно важна для программно насыщенных продуктов и сервисных систем. Системная инженерия должна эффективно включать разработчиков программного обеспечения в процесс системного проектирования, особенно будущих систем, имеющих элементы программного обеспечения.

**Моделеориентированная системная инженерия и цифровая инженерия.** Разработка систем в моделеориентированной среде (MBSE) облегчает труд команды системотехников, предоставляя средства для быстрой визуализации продуктов при моделировании экосистемы вместо статического подхода на основе документов. Такое динамическое взаимодействие идей и продуктов может сократить продолжительность жизненного цикла системной инженерии, устранить ошибки из-за несинхронизации документов и позволит провести быстрый анализ воздействия для поддержки принятия решений. Возможность сравнивать варианты системы и оценивать процедуры тестирования и обслуживания с помощью цифровых двойников может помочь предвидеть проблемы до их возникновения и продлить работу систем.

**Интернет вещей и комплексный адаптивный системный анализ.** Системотехник должен быть знаком с подключаемыми и встраиваемыми системами, устройствами, а также с организациями и пользователями в более широком масштабе, чтобы понимать, как эти объекты могут работать. Поскольку все объекты работают и взаимодействуют в среде, могут возникать различные типы поведения, которые не были запланированы или предсказаны в ходе разработки, что предоставляет системотехнику возможность для понимания и формирования новых моделей поведения и правил, необходимых для успешной работы систем.

**Образование за пределами традиционных методов.** Системная инженерия должна учитывать образование, выходящее за рамки традиционных форматов, таких как очное или интерактивное обучение. Технологии дополненной реальности и / или виртуальной реальности – это две области, которые могут помочь специалистам и студентам увидеть работу системы с точки зрения различных заинтересованных сторон, что позволит получить более полное представление о разработке целостных и реалистичных требований. Глобальное сотрудничество и сотрудничество, которое охватывает традиционные академические границы, может стать новой нормой, а не исключением.

**Гибкая системотехника.** Методы гибкой системной инженерии (Agile SE) можно рассматривать как новый подход к разработке систем. В отличие от традиционного построения систем, база пользователей и пространство проекта становятся более гибкими и требуют большего количества изменений. Поскольку все больше систем разрабатывается с использованием этого подхода, системная инженерия может сформировать разработку и организацию усилий и взаимодействия как внутри, так и за пределами границы системы.

## **6.4 Перспективы развития теоретической системотехники**

### **6.4.1 Организация комплексного теоретического исследования в системотехнике**

При обсуждении проблемы синтеза научных знаний в методологии науки исследуются, как правило, процессы интеграции и дифференциации наук, междисциплинарные научные области, целостность и системность знания, теоретический синтез знаний «внутри» научных дисциплин [5, 6]. Решение проблемы синтеза системотехнических знаний в конечном счете должно способствовать преодолению практических трудностей, возникающих при создании сложных систем. Однако в данном случае классические естественные и традиционные технические науки вряд ли могут служить образцом. Их развитие увенчалось построением более или менее стройных теорий. Разнородность этих дисциплин, неизбежная на начальных этапах развития, была преодолена в соответствующих теориях. Комплексность системотехнического знания является его нормальным состоянием. Она обусловлена в первую очередь необходимостью решения комплексных инженерных задач в процессе системотехнической деятельности. Поэтому исследование проблемы синтеза системотехнических знаний связано с анализом системотехнической деятельности.

Поскольку каждая часть инженерной системы создается определенным специалистом, то целостность конечного продукта зависит от координации этих специалистов, организации единого процесса системотехнической деятельности.

В работах теоретиков системотехники намечаются попытки целостного описания системотехнической деятельности [5]. На уровне методологического анализа понятие целостности выступает в качестве инструмента исследования и предполагает направленность не на объекты как таковые, а на деятельность, в которую они включаются [7]. Поэтому целостное описание сложного инженерного объекта непосредственно зависит от результатов целостного описания системотехнической деятельности.

В [5] разработан один из возможных вариантов такого представления системотехнической деятельности (рисунок 6.1). В верхней части схемы приводятся типы системотехнических задач, решаемых на каждой фазе деятельности определенными специалистами. Эти задачи определяют в основном тип синтеза системотехнической деятельности.



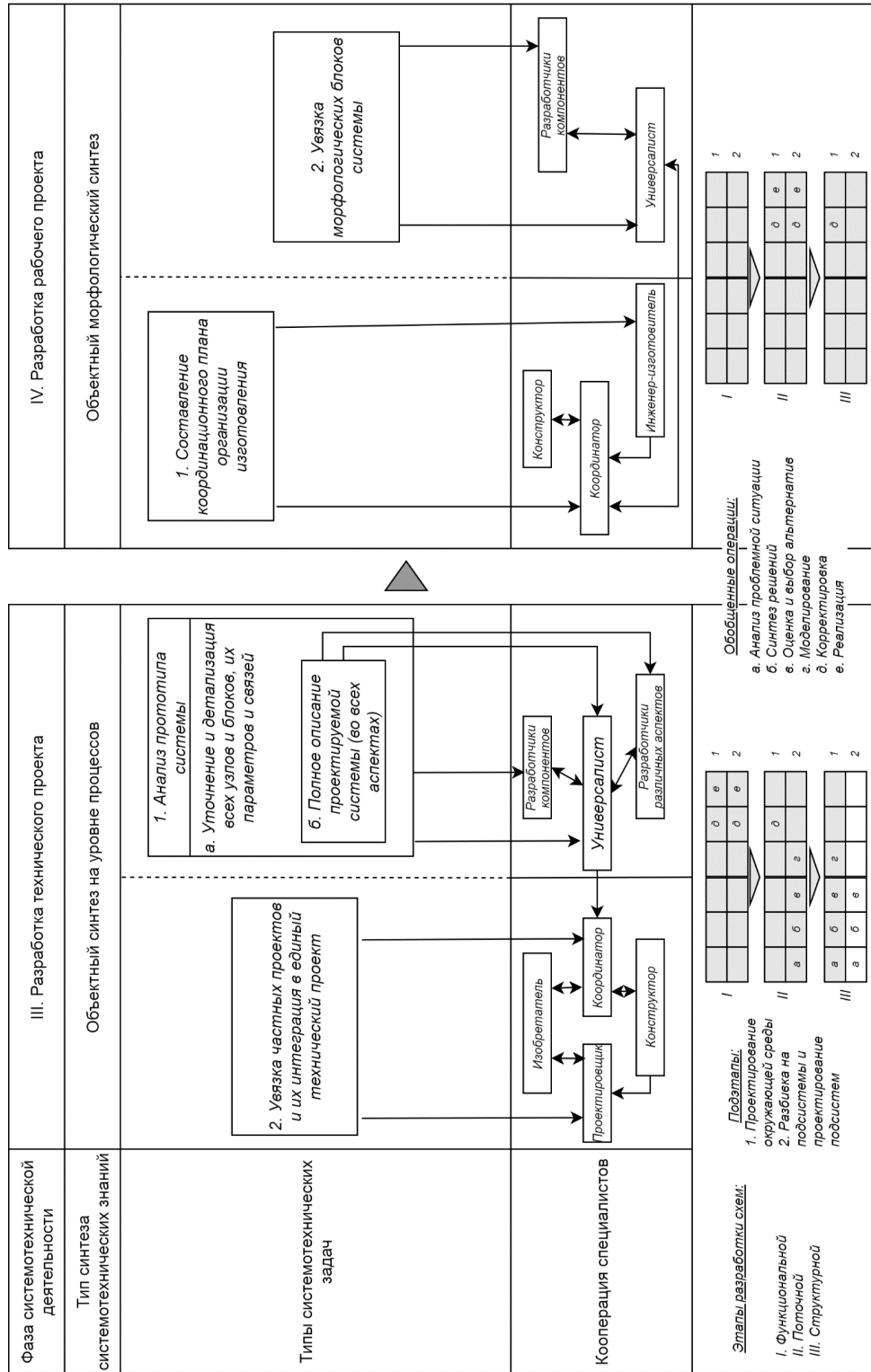


Рисунок 6.1 – Продолжение (начало см. на с. 170, окончание – на с. 172)

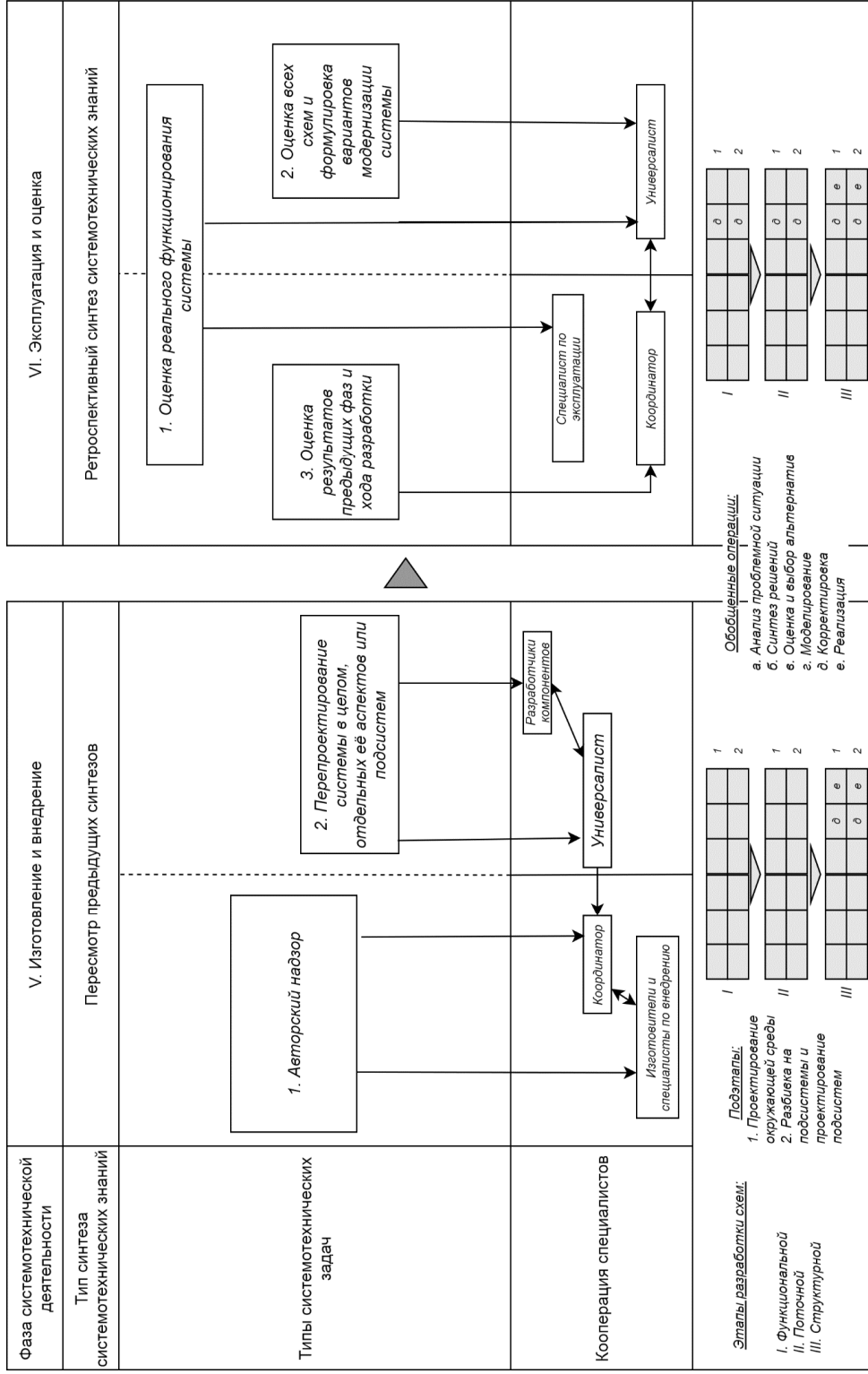


Рисунок 6.1 – Окончание (начало см. на с. 170)

технических знаний на каждой фазе. В нижней части изображены этапы разработки сложной системы: функциональной (I), поточной (II) и структурной (III) схем. Каждый этап распадается на два основных подэтапа:

1) проектирование окружающей среды системы (или системы в целом, решение задачи внешнего проектирования или представления системы моделью «черного ящика»);

2) разбивка системы на подсистемы и проектирование подсистем.

Эти этапы и подэтапы соответствуют функциональному, процессуальному, микроскопическому, макроскопическому, иерархическому представлениям системы.

На каждом этапе системотехнической деятельности выполняется фактически одна и та же последовательность обобщенных операций:

- а) анализ проблемной ситуации;
- б) синтез решения;
- в) оценка и выбор альтернатив;
- г) моделирование;
- д) корректировка;
- е) реализация решения.

Однако для определенной фазы главными являются не все операции и этапы, а только некоторые (эти операции обозначены буквами, а этапы закрашены серым цветом). Системотехнический цикл представляет собой итерационный процесс: возможны многократные возвращения на предыдущие фазы и этапы.

Рассмотрим более подробно фазы системотехнической деятельности и типы задач и синтезов, выполняемых на каждой из них.

I. *Подготовка технического задания.* В основном осуществляется проектирование окружающей среды системы этапа разработки функциональной схемы (этап I, подэтап 1), остальные этапы имеют второстепенное значение (не закрашены). Проводится анализ проблемной ситуации, синтез решений, а также оценка и выбор из альтернативных вариантов функциональной схемы (операции а, б, в). Для этапов разработки поточной и структурной схем системы (II, III) осуществляется только анализ проблемной ситуации и синтез решений (а, б). Остальные операции либо не выполняются на этой фазе вообще, либо выдается предварительное возможное их решение (но не окончательное).

На данной фазе решаются следующие системотехнические задачи.

1. Анализ требований заказчика и потребителя, изучение их выполнимости – осуществляется системотехником-координатором.

2. Формулировка основного замысла (т.е. внешних требований к системе и примерного содержания подсистем) и обоснование необходимости новизны и эффективности системы – выполняется системотехником-универсалистом.

3. Планирование исследований, оценка разработанности темы, имеющихся знаний и возможности их синтеза, координация и проведение исследований – проводятся соответственно универсалистом, координатором и исследователем.

4. Прикидка состава бригады проектировщиков, грубая оценка времени, денежных и людских ресурсов, необходимых для создания системы, – осуществляется системотехником-координатором.

Перечисленные системотехнические задачи определяют тип синтеза системотехнических знаний на данной фазе – предварительное системное решение проектной проблемы, определение общей идеи синтеза.

II. *Подготовка эскизного проекта.* Проектирование внешней среды системы этапа разработки функциональной схемы в основном уже выполнено (этап I, подэтап 1). Осуществляются только операции г, д — моделирование и корректировка первоначального решения (подэтап 1). Главным для этой фазы является разбивка системы на подсистемы и проектирование подсистем на функциональной схеме, а также проектирование окружающей среды на поточной схеме системы (этап I, подэтап 2 и этап II, подэтап 1). Выполняются операции а, б, в, г: анализ проблемной ситуации, синтез решений, оценка и выбор из альтернатив, моделирование проектного решения (этап I, подэтап 2 и этап II, подэтап 1). По остальным операциям выдаются только предварительные решения. При разбивке системы на подсистемы и проектировании подсистем для поточной схемы (этап II, подэтап 2) выполняются операции а, б, в – анализ проблемной ситуации, синтез решений и оценка и выбор альтернатив. Структурная схема на этой фазе, так же, как и на фазе подготовки ТЗ, доводится только до синтеза первоначальных решений (этап III, операции а, б). По остальным операциям (в, г) нет окончательных решений.

На этой фазе решаются следующие системотехнические задачи.

1. Описание прототипа системы:

а) детализовка системы (т. е. представление ее основных звеньев и их взаимосвязи) с выдачей заданий разработчикам подсистем, что является задачей системотехника-универсалиста;

б) описание подсистем (выполняется системотехниками-разработчиками компонентов);

в) создание альтернативных вариантов будущей системы, их анализ и выбор наиболее оптимального варианта, обоснование выбора и предполагаемые способы реализации (решается системотехниками-разработчиками компонентов системы).

2. Организация процесса проектирования:

а) составление программы проектировочной деятельности системотехником-координатором;

б) проектирование подсистем проектировщиками;

в) их координация системотехником-координатором.

Главной задачей является синтез системотехнических знаний с точки зрения организации проектировочной деятельности. Системотехник должен на основе системных представлений согласовать знания и действия проектировщиков подсистем. Кроме того, осуществляются текущие синтезы на уровне подсистем.

III. *Разработки технического проекта.* Эта фаза связана с проектированием подсистем на поточной схеме и окружающей среды системы на структурной схеме (этап II, подэтап 2 и этап III, подэтап 1). На данных подэтапах осуществляются анализ проблемной ситуации, синтез решений, оценка и выбор из альтернатив, моделирование решения (операции а, б, в, г). Корректировка и реализация не являются окончательными. Этап разработки функциональной схемы считается

завершенным (завершенные этапы закрашены серым цветом – этап I и этап II, подэтап 1), производится только корректировка этой схемы и реализация в виде поточной схемы (этап I, операции д, е). Проектирование окружающей среды системы на поточной схеме также в основном завершено, но его результаты могут еще корректироваться (этап II, подэтап 1, операция д). Разбивка на подсистемы и проектирование подсистем для структурной схемы является второстепенным подэтапом (этап III, подэтап 2) и включает на этой фазе операции а, б, в: анализ проблемной ситуации, синтез решений, оценку и выбор из альтернатив.

Решаются системотехнические задачи:

- 1) анализ прототипа системы;
- 2) увязка частных проектов и их интеграция в единый технический проект.

При решении первой задачи системотехником-универсалистом совместно с системотехниками-разработчиками компонентов (а) уточняются и детализируются все узлы и блоки, их параметры и связи, а разработчики различных аспектов системы (б) дают ее полное описание. Вторая задача решается координатором и системотехниками-проектировщиками. Осуществляется объектный синтез системотехнических знаний описание целостного функционирования системы на уровне процессов.

*IV. Разработка рабочего проекта.* На этой фазе завершается проектирование подсистем на структурной схеме (что обозначено заливкой серым цветом — этап III, подэтап 2). Осуществляется только корректировка и реализация поточной схемы, а также корректировка проекта окружающей среды на этапе структурной схемы (этап II, операции д, е и этап III, подэтап 1, операция д).

На данной фазе решаются две задачи:

- 1) координатор и инженер-изготовитель составляют координационный план организации процесса изготовления;
- 2) универсалист и разработчики компонентов осуществляют увязку «морфологических» блоков системы.

Эти задачи определяют объектный «морфологический» синтез системотехнических знаний, который является здесь основным, а также синтез знаний по организации деятельности изготовления.

*V. Изготовление и внедрение.* Все схемы разработаны (на рисунке 6.1 все этапы закрашены серым цветом). Проводится корректировка и реализация только структурной схемы (этап III, операции д, е). Системотехник-конструктор в содружестве с изготовителями и специалистами по внедрению осуществляет:

- 1) авторский надзор за изготовлением и внедрением системы и консультации;
- 2) перепроектирование системы в целом, отдельных ее аспектов или подсистем в процессе внедрения (если это, конечно, необходимо).

Эта задача решается системотехником-универсалистом совместно с разработчиками компонентов системы. Осуществляется пересмотр синтеза системотехнических знаний всех предыдущих фаз.



VI. *Эксплуатация и оценка.* Проводится корректировка всех схем (этапы I, II, III, операция д). Решаются системотехнические задачи оценки:

1) функционирования системы (специалистом по эксплуатации и универсалистом);

2) функциональной, поточной и структурной схем с последующей формулировкой идеи возможной модернизации системы (универсалистом);

3) результатов предыдущих фаз и хода разработки системы (координатором).

Осуществляется ретроспективный синтез системотехнических знаний, т.е. оценка и пересмотр предыдущих синтезов.

Каждая последующая фаза связана с предыдущей. Уже завершенная фаза может быть заново пересмотрена. Возможна ситуация, когда определенная фаза не может быть выполнена в силу каких-либо объективных причин: выделено недостаточно денежных средств или финансирование проекта неожиданно сократилось по сравнению с намеченным планом, не хватает персонала, поскольку часть его переброшена на более важную тему, не налажено производство первоначально спроектированных блоков, оказались безрезультатными научные исследования, на которые рассчитывали, и т.д. Тогда должна быть переделана предыдущая фаза или даже переформулировано все техническое задание.

Таким образом, из проведенного анализа системотехнической деятельности и попытки ее целостного описания видно, что все выделенные нами способы описания этой деятельности (по объекту, как последовательность фаз и операций, с точки зрения кооперации работ и специалистов) хорошо совмещаются. Сам синтез системотехнических знаний должен отражать их, поскольку целостное описание системотехнической деятельности предполагает целостное описание сложного инженерного объекта. Поэтому соединяются объектный и деятельностный синтез системотехнических знаний. Требование целостности представления сложного инженерного объекта должно соблюдаться на всех этапах и фазах системотехнической деятельности. Последовательность этапов и фаз создания сложной системы необходимо понимать как непрерывный процесс интеграции частичных представлений. На каждой фазе и этапе инженерный объект описывается как изменяющийся, включенный в определенную среду и состоящий из иерархически организованных блоков. При этом каждый раз целостность системы задается с разных точек зрения, зависящих от способов синтеза частичных представлений, включенных в системотехнический цикл.

Методологический анализ системотехники показывает, что в системотехнической деятельности используется множество типов знания и различных теоретических дисциплин.

Они применяются на разных этапах и фазах этой деятельности. Несогласованность знаний и дисциплин вызывает затруднения в самой системотехнической практике и в подготовке специалистов в области системотехники. Из необходимости преодолеть эти затруднения и возникает задача синтеза системотехнических знаний, выявления их взаимосвязи.

Научные дисциплины выполняют в данном случае функцию средств деятельности.

Средства деятельности могут быть разделены на идеальные (или знаковые), к которым относятся различные научные дисциплины, и средства реализации (или орудия) [8]. Если рассмотреть соотношение средств деятельности со всеми выделенными способами описания, то можно получить достаточно полную картину синтеза научных знаний, которые используются и вырабатываются в данной сложной деятельности.

Для разных типов подсистем используются знания различных дисциплин. Знания технических наук, например, применяются для проектирования машинных компонентов сложной системы, а общественных – в основном для исследования человеческих компонентов. Так, Г.Х. Гуд и Р.Э. Макол частям системы ставят в соответствие определенные научные дисциплины: входная и выходная аппаратура проектируется с использованием инженерной психологии, аппаратура связи разрабатывается с помощью теории информации и т.д. [9].

На разных фазах системотехнической деятельности также используются знания различных научных дисциплин. Например, методы исследования операций применяются в основном при подготовке эскизного проекта (фаза II) как средства организации процесса проектирования, а также для оценки работы аппаратуры и определения наилучших методов ее использования. Методы экономики применяются для оценки стоимости разработки и самой системы при подготовке технического задания, ее эксплуатации и оценки (фаза I, VI).

В системотехнике научные и технические дисциплины являются средствами деятельности различных специалистов. В горизонтальной структуре системотехнической деятельности разработчики машинных компонентов преимущественно используют конструктивно-технические, технологические знания и знания технических наук. Проектировщики человеческих компонентов применяют широкий спектр знаний общественных наук: психологии мышления, социальной психологии, социологии, педагогики, лингвистики, семиотики и т.д., а также таких естественных наук, как анатомия, биология, физиология человека. Системотехниками-специалистами по экономическим, организационным, статистическим и другим аспектам сложных систем применяются методы сетевого анализа, исследования операций, экономической статистики. Системотехник-универсалист, осуществляющий организацию специалистов в горизонтальной структуре деятельности, должен иметь знания о всех блоках системы и о разных типах систем. Он использует системные и другие методологические представления о способах организации различных аспектов и блоков системы, а также специалистов, их разрабатывающих. В деятельности универсалистов осуществляется горизонтальный синтез системотехнических знаний.

Вертикальная структура системотехнической деятельности связана с процессом последовательного решения системотехнических задач. Исследователь, изобретатель, проектировщик, конструктор, инженер-изготовитель и инженер по эксплуатации применяют в своей деятельности методы различных научных и технических

дисциплин. Системотехник-координатор должен обладать знаниями во всех кооперируемых видах деятельности, а также средствами их организации в единую систему, которые вырабатываются такими дисциплинами, как исследование операций, сетевой и системный анализ, теория управления и принятия решений. Деятельность координации обеспечивает целостность системотехнической деятельности и синтез системотехнических знаний в вертикальной структуре этой деятельности.

Системные представления и понятия, которые являются в основном орудием деятельности системотехника-универсалиста и системотехника-координатора, используются как средство синтеза системотехнических знаний. Причем универсалист ориентирован на объектный синтез, а координатор – на синтез знаний по организации деятельности. Применение системного подхода – это перспективный путь целостного описания сложного инженерного объекта. Однако решение проблемы синтеза системотехнических знаний существенно усложняется наличием парадоксов системного мышления [5], которые возникают из-за противопоставленности двух основных характеристик системы – целостности и иерархичности, и в то же время необходимости совмещения иерархического описания объекта исследования с его целостным представлением.

Парадокс иерархичности заключается в том, что исследование любой системы возможно лишь на основе решения задачи ее описания как элемента более широкой системы. В то же время решение этой задачи можно получить только исходя из описания системы как таковой. Иначе говоря, описание любой подсистемы данной системы выполнимо лишь на основе исследования последней, что возможно только при наличии описания подсистем.

В практике проектирования инженерных систем требования к подсистемам формулируются исходя из свойств системы в целом. Однако свойства системы являются результатом предварительного анализа подсистем. Действительно, чтобы разработать радиолокационную станцию как элемент, скажем, конкретной навигационной системы, необходимо иметь описание РЛС как некоторой системы, содержащей определенные электрические, механические и другие блоки. В то же время задача описания радиолокационной станции как системы непосредственно зависит от предварительного рассмотрения ее как элемента системы более высокого уровня иерархии. Без этого невозможно создать РЛС как особую систему, составляющую к тому же элемент конкретной навигационной системы.

Парадокс иерархичности каждый раз возникает при решении системотехнических задач и разрешается на практике методом последовательных приближений. На основе первоначальных (ориентировочных) представлений о характеристиках подсистем исследуются свойства системы. В ходе исследования формируются в первом приближении требования к подсистемам. Далее выполняется частичное проектирование подсистем, новое, более точное моделирование системы, уточнение требований и т.д. Такая итерационная процедура осуществляется несколько раз.

Парадокс целостности состоит в том, что решение задачи описания данной системы как некоторой целостности возможно лишь при «целостном» разбиении данной системы на части – разбиении системы на целые-части, т. е. части, которые сами являются целыми, а осуществление этого разбиения возможно только при условии решения первой задачи. Например, чтобы представить автоматизированную систему управления предприятием (АСУП) как целостную систему, необходимо ее разложить на целые-части, обладающие функциональной спецификой целого – системы. Однако такое разложение в свою очередь предполагает, что функциональная специфика АСУП выяснена. Она не сводится только к машинному преобразованию информационных потоков, а включает в себя организационные, экономические психологические и другие аспекты. Выяснение специфики АСУП как целостной системы составляет одну из основных теоретических и методологических задач создания автоматизированных систем. Задача «целостного» разбиения АСУ может быть решена на пути анализа управленческой деятельности, которую реализует данная АСУ.

Выход из круга парадоксов системного мышления возможен только при обращении к содержательным характеристикам системотехнического знания, которые могут быть зафиксированы именно через исследование использования и построения знаний, т.е. через анализ системотехнической деятельности.

Системные представления и понятия дают возможность получить описание системотехнической деятельности как единого целого и учесть разнородные компоненты этой деятельности, между которыми устанавливаются различные связи. Системные представления соотносимы со способами членения деятельности. Однако они должны быть уточнены относительно деятельностных характеристик. На основе результатов анализа системотехнической деятельности может быть скорректирована программа проведения комплексного теоретического исследования в системотехнике.

Особенность современных научно-технических дисциплин, в частности системотехники, заключается в том, что они имеют системную ориентацию. Другими словами, все они (системотехника, эргономика, техническая кибернетика, системный анализ и т.д.) ориентируются на некоторую универсальную онтологическую схему, являющуюся аналогом научной картины мира в естественной науке и представленную в различных вариантах общей теории систем и методах и средствах системного подхода. В онтологической схеме (системной онтологии) задается идеальная модель, специфическое видение объекта исследования и проектирования, та реальность, в которой работает и которую имеет перед собой инженер-системотехник, та единая действительность, в которой только и возможен синтез частичных теоретических представлений.

Комплексное теоретическое исследование в системотехнике включает в себя целый ряд одноаспектных и одноплановых теоретических исследований и характеризуется множеством частичных идеальных объектов. Средства и способы исследования выбираются из различных научных дисциплин или разрабатываются специально для каждой конкретной проблемы. В комплексном теоретическом

исследовании должны быть учтены все частичные представления, частные онтологические схемы. Они должны быть обобщены и переформулированы в своего рода частные теории систем, а их идеальные объекты, онтологические схемы, представлены как особые специальные системы, т.е. переведены в системный модус. Специальные системы могут быть далее синтезированы в различные (в зависимости от решаемой задачи) комплексные модели сложного инженерного объекта.

«Поле» всех возможных (в том числе и гипотетических) комплексных системных моделей (вместе с совокупностью специальных систем) составляет обобщающую онтологическую схему системотехники, являющуюся, с одной стороны, обобщением частных онтологических схем, используемых в ней теорий, а с другой – конкретизацией универсальной онтологической схемы.

Универсальная онтологическая схема выполняет по отношению к системотехнике функцию методологического ориентира в выборе теоретических средств и методов решения комплексных научно-технических задач, дает возможность транслировать их из смежных дисциплин или методологической сферы. Она задает также методологический принцип конструирования сложных идеальных объектов системотехники – комплексных системных моделей, их последующего имитационного моделирования и интерпретации, т.е. позволяет экстраполировать накопленный в системотехнике опыт на будущие проектные ситуации. Комплексные системные модели сложного инженерного объекта, полученные на теоретическом уровне, могут использоваться как исходные при проектировании новых систем.

Таким образом, комплексное теоретическое исследование в системотехнике является одновременно и теоретическим, и ориентированным на инженерную практику. Специфика такого исследования заключается в том, что оно имеет более жесткие связи с инженерной деятельностью. Поэтому одноаспектное исследование, в котором система задана как специальная, должно проводиться на основе системных представлений не только в плане исследования, но и в плане проектирования, изобретения, конструирования, изготовления и эксплуатации (рисунок 6.2).

При проектировании, конструировании, изготовлении и т.д. синтез знаний может выглядеть иначе, чем при исследовании сложной системы. Например, некоторых подсистем на уровне исследования может и не быть, так как они появляются только на уровне изготовления (например, экранирующие приспособления). В то же время некоторые подсистемы, имеющиеся на уровне исследования, могут отсутствовать на других уровнях системотехнической деятельности.

Комплексная системная модель сложного инженерного объекта может быть построена двумя способами (см. рисунок 6.2).

Комплексные модели  $S_{1 \rightarrow n}^i$  «собираются» из специальных систем  $S_1^1, \dots, S_n^i$  одного уровня вертикальной структуры, т.е. представляют собой только горизонтальный синтез системотехнических знаний в каком-либо одном плане: или исследования, или проектирования, или изготовления и т.д. С точки зрения

горизонтального синтеза (по объекту) в комплексную системную модель включаются представления различных специалистов горизонтальной структуры данной деятельности. Такие модели должны быть синтезированы в комплексном теоретическом исследовании по всем уровням вертикальной структуры системотехнической деятельности.

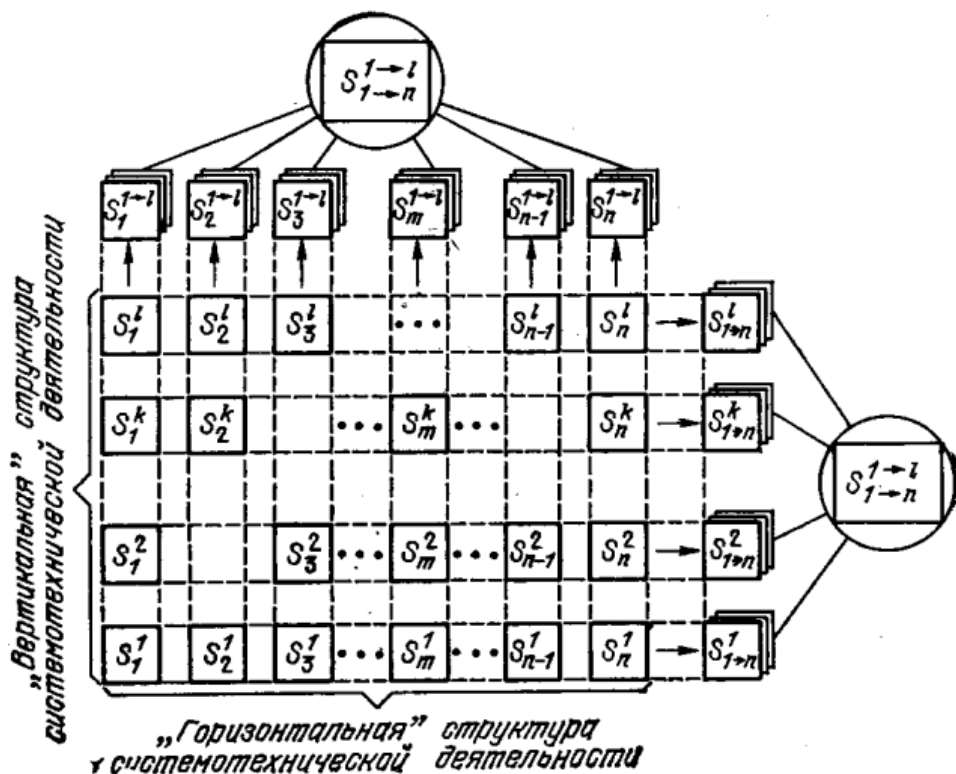


Рисунок 6.2 – Комплексная системная модель сложного инженерного объекта

Комплексные системные модели  $S_n^{1 \rightarrow l}$  строятся на базе вертикального синтеза всех представлений одной и той же подсистемы исследователем, изобретателем, проектировщиком и т.д. ( $S_j^1, \dots, S_j^l$ ). Полученные таким образом комплексные системные модели вертикальной структуры синтезируются затем в единую системную модель сложного инженерного объекта  $S_{1 \rightarrow n}^{1 \rightarrow l}$  по всем подсистемам горизонтальной структуры системотехнической деятельности.

Таким образом, гиперсистема не только задает общую схему горизонтального синтеза системотехнических знаний в плане исследования, но и определяет горизонтальный и вертикальный синтез знаний. В данной трактовке комплексное теоретическое исследование в системотехнике будет включать в себя уже три этапа, а не два, как это было сформулировано ранее. На первом этапе знания различных одноаспектных теоретических исследований сложного инженерного

объекта описываются в виде специальных систем. На втором этапе специальные системы синтезируются в комплексные системные модели вертикальной и горизонтальной структуры системотехнической деятельности (первый уровень синтеза). Наконец, на третьем этапе все комплексные системные модели «собираются» в единую модель (второй уровень синтеза). Только в этом случае синтез системотехнических знаний можно считать полным.

#### **6.4.2 Проблема построения системотехнической теории**

Задача методологического анализа заключается не в том, чтобы построить ту или иную теорию, а в определении перспектив, возможных путей, способов и методов построения различного типа теорий. Поэтому будем анализировать лишь проблему построения системотехнической теории, то направление, в котором должно развиваться исследование в системотехнике. Теории на ранних этапах развития естественно-научных и научно-технических дисциплин складывались стихийно. Сегодня же ставится задача сознательного построения, «конструирования» теории, в том числе в системотехнике. Что же может быть принято в качестве образца для такого рода работы? Это можно выяснить лишь в результате методологических исследований.

В настоящее время уже осуществлен основательный методологический анализ становления естественно-научной теории [10], выявлены этапы и механизмы ее формирования. Аналогичные исследования проводились и в плане генезиса технической теории [11, 12]. Для построения теории системотехники необходимо прежде всего, используя опыт, накопленный в методологических исследованиях науки, на конкретном историко-научном материале реконструировать закономерности формирования теории в классических научно-технических дисциплинах и выделить их особенности по сравнению с естественно-научными дисциплинами, а затем определить специфику построения системотехнической теории. Проведение такого сравнительного анализа может быть полезным не только для организации теоретических исследований в новых научно-технических дисциплинах, но и для корректировки «методологического стандарта» механизма формирования теории вообще. Однако решение последней задачи – предмет особого исследования, выходящего за рамки данной книги. Мы сформулируем исходные теоретические представления об этапах и механизмах построения технической теории, которые могли бы служить средством последующего содержательного методологического анализа. Здесь излагается не конечный результат, а скорее, программа предстоящих исследований. Поскольку содержательный методологический анализ естественно-научной теории практически уже проведен, представляется возможным использовать его результаты для исследования технической теории. В качестве исходных методологических средств будем использовать результаты анализа становления физической теории, полученные В.С. Степиным [10].

Формирование и технической, и естественно-научной теории (в условиях развитой науки) начинается, как правило, с использования в качестве исходной теоретической модели из какой-либо более разработанной области при соответствующей ее корректировке на новый класс явлений. Лишь на ранних стадиях развития науки теоретические модели создаются непосредственной схематизацией опыта. Затем в качестве средств для построения новых теоретических моделей используются эти исходные модели и такой способ становится определяющим в развитии науки. Это, конечно, не означает, что теперь не требуется схематизация нового эмпирического материала. Она осуществляется, но через призму накопленных прошлыми поколениями ученых и апробированных научной практикой теоретических моделей [10]. Например, Галилей заимствовал геометрокинематическую схему из астрономии, где в наиболее чистом виде рассматривалось движение небесных тел по идеальным кривым в соответствии с теоремами и постулатами евклидовой геометрии [13]. Похожая ситуация сложилась к концу XVIII в. при исследовании разнообразных машин, когда Г. Монж заимствовал теоретическую модель из начертательной геометрии [14]. Эта модель соответствовала геометрокинематической схеме Галилея, однако она была несколько модифицирована с учетом потребностей инженерной практики.

Дальнейшая перестройка данной модели осуществлялась за счет конструктивного введения новых идеальных объектов. То, что этот процесс для технической теории определялся инженерной деятельностью, ни у кого не вызывает сомнений. Однако на первых этапах возникновение естественно-научной теории было также во многом обусловлено запросами инженерной практики. Например, работы Н. Тартальи и Галилея по свободному падению тел стимулировались необходимостью проведения более точных инженерных расчетов траектории полета артиллерийских снарядов. В этом смысле сам эксперимент был первоначально связан с инженерной деятельностью. Образец такого рода деятельности, в частности, продемонстрировал Р. Гук, который работал и как ученый экспериментатор, и как инженер, совершенствуя конструкции экспериментальной техники и разрабатывая новые структурные схемы экспериментальных ситуаций. В то же время следует иметь в виду, что и инженерная, и экспериментальная деятельность стала возможна именно благодаря оперированию с идеальными объектами, позволяющими создавать идеализированные экспериментальные и инженерные ситуации, еще не существовавшие в природе.

Разработка частных теоретических схем, обслуживающих инженерную деятельность, характерна и для технических, и для естественных наук. Например, Гюйгенс разработал не только теорию качания маятника, но и соответствующую этой теории конструкцию часов и даже создал сами часы. Построение обобщенной теоретической (онтологической) схемы и математизированной теории является общим условием зрелости научного исследования в естественно-научных и научно-технических дисциплинах. В теории механизмов это позволило осуществлять не только анализ, но и теоретический синтез новых устройств, не существовавших еще в инженерной практике. Причем аналогом естественно-научной картины мира



в теории механизмов является обобщенная классификационная (онтологическая) схема всех возможных (в том числе и потенциально) механизмов [14].

Развитие классической электродинамики в трудах М. Фарадея, Дж. Максвелла и Г. Герца шло несколько иным путем. Экспериментальные исследования проводились Фарадеем на основе созданной им универсальной теоретической модели электромагнитных явлений.

Он не опирался на какой-либо математический аппарат. На базе этой модели Максвелл разработал адекватный математический аппарат, заимствуя (вместе с соответствующей теоретической схемой, приспособленной к исходной модели Фарадея) математические средства из механики сплошных сред. В работах Герца эта модель была не только экспериментально подтверждена, но и обобщена на электромагнитные и оптические явления (что логически вытекало из теории Максвелла, но не было экспериментально доказано).

Экспериментальные и теоретические исследования Фарадея, Максвелла и Герца неявно содержали в себе возможность организации передачи сообщений на расстоянии. Однако явным образом такая задача не ставилась и в принципе не могла быть поставлена в рамках естественно-научной теории. В теоретической радиотехнике, развившейся в связи с инженерными приложениями электродинамики, эта задача была поставлена сознательно. Ее математический аппарат и объяснительные теоретические схемы с самого начала были ориентированы на построение структурных схем новых инженерных объектов. Формирование теоретической радиотехники в наиболее чистом виде зависело от базовой естественно-научной теории – электродинамики. Влияние инженерной деятельности для нее было вторичным.

К моменту первых радиотехнических изобретений была построена и экспериментально доказана теория распространения электромагнитных волн, но первоначально не предполагалось никаких выходов этой теории в инженерную практику. Развитой промышленности тогда еще не было, и теория не могла быть обоснованием уже созданных устройств. В теории механизмов определяющим было влияние достаточно развитой к моменту ее возникновения инженерной практики, к которой она приспособлялась. В области радиотехники инженерная деятельность формировалась параллельно и под определяющим воздействием технической теории. Поэтому конструктивные расчленения радиотехники в значительной степени находятся в зависимости от ее теоретических схем.

Главное отличие технической теории от естественно-научной заключается в том, что процедуры отнесения теоретических моделей к конструктивным схемам реальных инженерных объектов являются здесь специально нормированными. И математический аппарат, и естественно-научное объяснение функционирования инженерных объектов имеют подчиненный характер в отличие от естественной науки, в которой главная цель – объяснение и предсказание природных явлений, а экспериментальные и математические построения выполняют вспомогательную роль, хотя в процессе становления и развития экспериментальная и инженерная деятельности иногда могут совпадать. Однако для естественной науки всякие

инженерные результаты являются побочными. Для технической науки они органично вплетаются в «тело» технической теории.

Итак, заимствованная из сферы методологического анализа генезиса естественно-научной теории схема [10] может быть модифицирована и конкретизирована для технической теории следующим образом. На первом этапе ее построения осуществляется трансляция исходной теоретической схемы из базовой естественно-научной теории или, если таковая неадекватна практическим инженерным задачам, из смежной теоретической области. На втором этапе происходит ее длительная адаптация, подведение под нее и обобщение определенного эмпирического материала (конструктивно-технических и технологических знаний). Этот процесс включает в себя серию попыток описать существующие инженерные объекты с помощью исходной теоретической схемы и выделить части инженерных объектов, наиболее хорошо представляемые в ней. Третий этап – модификация исходной теоретической модели – заключается в разделении «поточной» схемы (описывающей естественный процесс, протекающий в инженерном объекте) и структурной (отображающей его конструктивные элементы и технологические связи). Затем устанавливается эквивалентность этих схем и соответствующих им способов инженерного расчета.

Параллельно детально разрабатываются частные теоретические схемы.

Разработка обобщенной теоретической схемы, которая транслируется из смежных областей или базовой естественно-научной теории, является четвертым этапом формирования технической теории. Если в базовой естественно-научной дисциплине нет соответствующего этой теории раздела, то он строится заново. В научно-технической дисциплине вводятся однородные идеальные объекты, которые должны иметь типовые для всех инженерных объектов и иерархически организованные элементы и фиксированный набор связей между ними (правила сборки этих элементов). Устанавливается также обязательное соответствие идеальных объектов и конструктивных элементов реальных инженерных объектов, т. е. вводятся процедуры анализа и синтеза теоретических схем. Возможна перестройка инженерных объектов под теоретическую модель (подведение конструктивных элементов под элементы идеальных объектов). На этом этапе осуществляются попытки проецировать обобщенную теоретическую схему на класс гипотетических инженерных объектов. В результате возникает необходимость создания математизированной теории (пятый и завершающий этап). Это в свою очередь требует модификации обобщающей теоретической схемы. Задание операций эквивалентного преобразования данных схем (дедуктивный вывод) и позволяет осуществить проецирование, т. е. синтез еще не созданных инженерных объектов. Это приводит к формированию на эмпирическом уровне технической теории массива практико-методических знаний (рекомендаций для еще неосуществленной инженерной деятельности). Апробация технической теории проводится в инженерной практике. Доказательство жизненности и конструктивности теории – созданные на ее основе новые инженерные объекты.

Формирование системотехнической теории, конечно, осуществляется несколько иным, но все же сходным образом. Здесь можно провести аналогию сходства и различия в развитии классических и неклассических естественно-научных дисциплин, например классической и квантовой механики [10]. Системотехника также может быть отнесена к неклассическим научно-техническим дисциплинам.

Сегодня уже ясно, что технические науки представляют особый тип научных дисциплин, хотя и связанных генетически с экспериментальным естествознанием, но обладающих вполне определенной спецификой и самостоятельностью развития и функционирования [11, 12]. В еще большей мере это относится к современным научно-техническим дисциплинам, отличающимся и от классических технических наук.

За последние три десятилетия в сфере научно-технических дисциплин произошли существенные изменения, которые позволяют говорить о становлении качественно нового неклассического этапа в их развитии. Во-первых, количество технических наук, прикладных исследований, научно-технических дисциплин и их доля в общей массе научных исследований лавинообразно возрастают. Во-вторых, формируются новые способы организации научных знаний и исследований, направленные на повышение эффективности и результативности научной деятельности, в которые вовлекаются специалисты самых различных сфер и отраслей. Все это предопределяет более жесткую ориентацию современной науки на решение практических проблем, и прежде всего инженерных. В то же время инженерные методы, методические и проектные приемы работы все более глубоко проникают в сферу чистой науки, коренным образом преобразуя традиционные нормы научного исследования и его ценностные ориентации. Возникает блок новых научно-технических дисциплин, использующих системные представления, методы и понятия для решения своих специфических проблем (техническая кибернетика, системотехника, системный анализ, эргономика и т.п.). Даже традиционные естественные и технические науки испытывают на себе влияние этого нового стиля мышления и способов работы. Новые дисциплины часто не укладываются в существующий методологический стандарт научного исследования, но это не значит, что они не могут претендовать на статус научных дисциплин, хотя и нетрадиционного типа. Скорее наоборот, устаревшие методологические представления должны быть модифицированы с учетом новых явлений, возникающих в реальной научной деятельности. Изменился сам способ формирования научно-технических дисциплин и организации в них теоретических исследований.

Будем различать три основных способа формирования современных научно-технических дисциплин: в виде комплексного теоретического исследования, на методической основе и по псевдоклассическому образцу.

При формировании технической теории в виде комплексного теоретического исследования, как правило, первоначально возникает некоторый достаточно общий конкретно-методологический подход с «универсальной» сферой применения, которая постепенно специфицируется относительно определенной проблемной области (комплексной научно-технической проблемы). Исходным в данном случае

является широкое научное движение, в результате которого возможно появление новой научно-технической дисциплины. При этом отдельные теоретические средства, методы и дисциплины, включенные в такое комплексное исследование, хотя соответствующим образом перерабатываются, переосмысливаются и испытывают обратное воздействие со стороны новой дисциплины, продолжают сохранять самостоятельность и развиваются (вне данной комплексной проблемы) обособленно. К данному типу дисциплин относится, например, системотехника и эргономика [5].

При формировании новых научно-технических дисциплин на методической основе в принципе не ставится цель создания единого (и даже комплексного) теоретического исследования. Однако это не значит, что в данном случае не проводятся теоретические исследования. Совокупность научных методов и практических приемов решения разнообразных проблем (в определенной области) консолидируется на общей методологической основе, но без создания единого математического аппарата и обобщающих онтологических схем. Функцию последних выполняют системные (или какие-либо другие общенаучные, например кибернетические) представления и понятия, что и гарантирует целостность и специфичность теоретического исследования, проводимого каждый раз заново и новыми средствами. Именно к такого рода дисциплинам относится системный анализ, который характеризуется не специфическим научным аппаратом и методами (как правило, заимствованными из других наук), а особыми принципами и подходом к организации теоретического исследования слабоструктурированных проблем, возникающих прежде всего в сфере управленческой деятельности [15, 16].

Даже при формировании новых технических теорий по псевдоклассическому образцу, т.е. с преимущественной ориентацией на определенную базовую естественно-научную дисциплину, они испытывают сильное влияние неклассических методов организации теоретических исследований.

---

*Например, физика горных пород, которая первоначально формировалась как прикладной раздел физики твердого тела, в действительности базируется на ряде фундаментальных наук (физике, химии, геологии, минералогии, петрографии, механике сплошных сред, горном деле и т.д.) и отличается комплексностью подхода к изучению свойств и процессов в горных породах и массивах, практической направленностью на создание эффективных способов ведения горных работ, новых методов решения актуальных задач горного производства. Еще одним элементом нетрадиционности физики горных пород является ее ориентация на учет окружающей среды, проектирование систем «человек – машина – природа», необходимость чего диктуется не только формированием нового стиля мышления, но и теми практическими задачами, которые должна решать данная научно-техническая дисциплина. В то же время она стремится к созданию единого теоретического исследования по псевдоклассическому образцу [17].*

---

Образование новой дисциплины по этому способу может происходить и за счет отпочкования новой области исследования от классической технической теории (например, радиолокации от радиотехники). При этом в качестве базовой выступает уже не естественно-научная, а техническая теория, из которой и транслируются нормы и образцы научного исследования. Такое выделение возможно также при ориентации старой технической теории на новую базовую естественно-научную (так появилась, например, квантовая электроника).

Таким образом, можно выделить некоторые общие черты и особенности технической теории, характерные для неклассического этапа развития современных научно-технических дисциплин.

Прежде всего это комплексность теоретических исследований (в какой бы форме они ни проводились и каким бы способом ни формировались), направленность на решение комплексных научно-технических задач, требующих участия представителей многих научных дисциплин, группирующихся относительно единой проблемной области. Объектом комплексного исследования в современных научно-технических дисциплинах становится качественно новый деятельностный объект. Например, эргономика связана с исследованием и проектированием трудовой деятельности в системе «человек – машина» и включает в себя два блока знаний: знания об объекте (т.е. о трудовой деятельности) и знания о том, как исследовать и проектировать этот объект (т.е. тоже о деятельности). В кибернетике, которая первоначально была ориентирована на «машинизированное» представление инженерного объекта, намечился переход от «автоматной» кибернетики к кибернетике «деятельностной» [14].

Ситуация, сложившаяся в современных научно-технических дисциплинах, во многом напоминает изменения в экспериментально-измерительной деятельности, характерные для неклассической физики и связанные с так называемым парадоксом неизмеримости. В классической физике предполагается, что измерительный прибор не влияет на состояние измерительного объекта, с которым он взаимодействует, и всегда можно подобрать такие условия эксперимента, что этим возмущением можно пренебречь либо учесть его, введя поправки в результаты измерения. Однако для микросистем достичь этого не удастся. Поэтому результаты уже проведенного измерения не всегда точно можно воспроизвести, а только предсказать с определенной степенью вероятности, т.е. возмущающим воздействием экспериментально-измерительной деятельности нельзя пренебречь. Объект измерения не может рассматриваться отдельно от этой деятельности: он не является себе тождественным до, во время и после эксперимента [10].

Аналогичная ситуация наблюдается и в современной инженерной деятельности. Она становится эволюционным системным проектированием – проектирование не прекращается и тогда, когда система уже создана. Поскольку система может устареть еще до того, как она создана, в проекте должны быть предусмотрены ее возможные модификации. Так как в проекте сложной системы невозможно учесть все особенности ее функционирования, то необходима особая деятельность – внедрение. Она направлена на корректировку проектных решений в процессе

отладки системы и в соответствии с изменениями условий функционирования. Поэтому сложный инженерный объект является системой «человек – машина – окружающая среда». И деятельность использования, и деятельность создания и совершенствования таких систем являются как бы слитыми, неразрывно связанными с самими системами.

Наиболее ярко эта тенденция проявляется в сфере социально-инженерных разработок, например в градостроительном проектировании, использующем знания социальных и технических дисциплин. Здесь уже невозможно пренебречь возмущающим воздействием исследования и проектирования, поскольку и объект проектирования (исследования), и проектировщик (исследователь) имеют однопорядковую деятельностную сущность.

Подобно тому как в неклассической физике все большее значение придается методу математической гипотезы (минуя промежуточные интерпретации) и идеализированным экспериментам (без воспроизведения их на всех промежуточных стадиях в виде реальных экспериментов), в современных научно-технических дисциплинах определяющую роль начинает играть имитационное моделирование на ЭВМ, позволяющее проанализировать различные варианты будущего функционирования сложной системы. При этом промежуточные интерпретации, как правило, опускаются.

Аналогию между неклассическими естественно-научными и научно-техническими дисциплинами можно провести по той роли, которую играет в них научная картина мира (универсальная онтологическая схема). Современные неклассические научно-технические дисциплины используют сложную совокупность различных типов знания и методов для решения комплексных научно-технических проблем. Поэтому первым условием эффективной организации теоретического исследования в них является необходимость реконструкции той единой действительности, в которой возможно соотнесение всех частичных подходов и особое целостное видение объекта исследования (и проектирования). Причем поскольку эти дисциплины имеют дело с множеством теоретических представлений, выполняющих функцию частных онтологических схем по отношению к комплексному исследованию, то формирование неклассической технической теории начинается с этапа разработки обобщенной онтологической схемы. А так как базовой теории нет, то она транслируется из методологической сферы. Эту функцию чаще всего выполняют системный подход и общая теория систем, имеющие общенаучный статус, иногда кибернетические представления и понятия. Универсальная онтологическая схема, зафиксированная в различных вариантах общей теории систем и в методах, понятиях и представлениях системного подхода, специфицируется под соответствующий класс решаемых научно-технических задач и начинает выполнять функцию обобщенной онтологической схемы. В системотехнике она несколько иная, чем в кибернетике, системном анализе или эргономике, но это все же системная обобщенная онтологическая схема (отсюда и разные варианты общей теории систем, ориентированные на различные классы проблем).

Одной из важных особенностей современных научно-технических дисциплин является их выраженная методологическая ориентация. В рамках этих дисциплин осуществляются конкретно-методологические исследования (часто с непосредственным выходом на практику через методологические разработки и проектирование). Это относится и к кибернетике, и к системотехнике, и к системному анализу, и к эргономике [18–20]. Более того, методологические знания вплетены в само «тело» технической теории, иногда они даже замещают теорию ввиду неразработанности общих теоретических средств.

Особенности современных научно-технических дисциплин определяют специфику проводимых в них теоретических исследований. Последние уже не могут строиться по образцу естественно-научной (главным образом физической) теории, как это зачастую предполагалось до сих пор. В настоящее время выдвигаются два основных методологических идеала организации такого рода теоретических исследований.

1. В качестве методологической нормы построения современной научно-технической дисциплины рассматривается «синкретизм» развиваемых в них теоретических представлений, связанный с необходимостью использования самых различных наук и знаний при решении комплексных по своей сути инженерно-проектных задач. Кроме того, эти представления фиксируются в концептуальных схемах данного вида научно-технической деятельности, построенных на основе систематизации и методической обработки единичного опыта-работы (прецедентов) [5]. Причем дальше построения общих концептуальных схем, специально приспособленных для фиксации соответствующих методических приемов и предписаний (как правило, системно ориентированных), дело в принципе не идет.

2. Организация теоретических исследований связывается с разработкой особых способов абстрактного изображения «синкретических» представлений, что стимулируется в первую очередь необходимостью применения в данной научно-технической дисциплине определенного математического аппарата и программных средств имитационного моделирования на ЭВМ. С этой целью строятся особые идеальные объекты второго уровня (по отношению к идеальным объектам теорий, используемых при решении данного класса комплексных научно-технических задач), в которых фиксируется однородное отображение «синкретического» представления, относящегося к первому уровню. Они включают в себя абстрактные структурные и абстрактные поточные (алгоритмические) схемы.

Структурные схемы необходимы для анализа конфигурации, степени связности элементов, выбора наиболее рационального строения системы, определения надежности его структуры и т.д. безотносительно к ее специфическому наполнению. Алгоритмические схемы отображают обобщенные процедуры функционирования любой системы. Фактически в данном случае речь идет о своеобразной объективизации процедур деятельности, но не в форме естественного (скажем, физического) процесса, а в виде соответствующих системных или кибернетических представлений. Поэтому такого типа теоретические исследования

будут системными, но «настроенными» на вполне определенный класс научно-технических проблем.

Поскольку современная техническая теория имеет дело с качественно новым «деятельностным» объектом исследования и проектирования, то возникает проблема его «системно-деятельностного» представления [21]. В рамках отдельно взятой теории это выражается в необходимости совмещения обобщенных структурной и алгоритмической схем одного и того же объекта в едином описании. Так возникает специфика идеальных объектов второго уровня – в них неразрывно переплетены объектные и деятельностные представления, объект как бы «сплавлен» с деятельностью его проектирования, совершенствования и использования. Он является, кроме того, индивидуальным, уникальным в отличие от объектов естественных и классических технических наук.

Наконец, в силу комплексного характера теоретического исследования в современных научно-технических дисциплинах и уникальности объекта такого исследования – сложной системы – их задача заключается не только в том, чтобы выявить различные аспекты и режимы работы, подлежащие обобщенному описанию и расчету, но и «собрать» все полученные результаты в единую многоаспектную и многоплановую имитационную модель. Такая задача в рамках классической технической теории в принципе не ставилась.

Заметим, что второй идеал не обязательно должен рассматриваться как более зрелый этап и цель развития первого. Скорее они являются рядоположенными, взаимодополняющими способами организации теоретических знаний в современных научно-технических дисциплинах. Развивая в данной книге концептуальную схему системных представлений, мы фактически ориентировались на первый идеал. Поэтому рассмотрим подробнее перспективы построения системотехнической теории в соответствии со вторым идеалом.

В практической системотехнической деятельности решение задачи создания новой системы заключается в сочетании представлений различных научных дисциплин с инженерными представлениями без сведения их к единому теоретическому изображению. Чтобы решить эту задачу в теоретической сфере, необходимо представить данную «синкретическую» схему в виде системы однородных описаний (для разных режимов функционирования). В системотехнике используются два типа таких однородных схем – обобщенные поточные (или алгоритмические) и структурные. Первые были обобщены в кибернетике и стали рассматриваться в плане преобразования вещества, энергии и информации. Они фактически являются идеализированным представлением функционирования любой системы и исходным пунктом программирования на ЭВМ (это обеспечивает связь с соответствующими функциональными схемами, зафиксированными в теории программирования). Вторые на основе обобщения различного рода структурных схем – теории автоматического регулирования, теории сетей связи, теории синтеза релейно-контактных схем и логических схем вычислительных машин, а также схем, применяемых в социально-экономических исследованиях, развиваются в так называемый структурный анализ сложных систем. Такие унифицированные



абстрактные структурные схемы позволяют изучать объект в наиболее общем и чистом виде. Так, при структурных исследованиях систем автоматического регулирования в них не остается иного содержания, кроме связей, их числа, дифференциального порядка, знака и конфигурации. Уделяя основное внимание выявлению взаимных связей между элементами системы и тем самым выдвигая на первое место структуру системы, а не состав ее отдельных компонентов, получаем возможность единообразно исследовать различные по своей природе системы.

Дальнейшая манипуляция с моделью может быть осуществлена с помощью адекватных решаемой задаче алгоритмических языков имитационного моделирования. В них на основе структурной схемы составляется поточная (алгоритмическая) схема функционирования модели (системы), которая автоматически преобразуется в соответствующую функциональную (математическую) схему.

Таким образом, чтобы разработать систему однородных описаний сложных систем, необходимо:

- 1) провести обобщение различного типа структурных и алгоритмических (поточных) схем, применяемых в различных областях науки и техники;

- 2) задать (выявить) четкие правила эквивалентного преобразования «синкретических» схем системотехники в однородные структурные и поточные схемы, т.е. правила их построения и операции тождественного преобразования (такие исследования уже проводятся в рамках структурного анализа и теории программирования);

- 3) поставить их в соответствие функциональным (математическим) схемам, наиболее часто употребляемым в системотехнике [22]. Для этого необходимо проанализировать и обобщить концептуальный аппарат и соответствующий ему «образ объекта», содержащийся имплицитно в различных алгоритмических языках имитационного моделирования, адекватных указанным выше математическим схемам.

Тогда «синкретическое» описание любой сложной системы, принадлежащей классу системотехнических, может быть представлено в зависимости от режима ее функционирования и решаемой инженерной задачи по установленным правилам в виде определенной однородной сначала структурной, а затем и поточной схемы. Для каждой системы может быть построено несколько взаимодополняющих схем, которые в свою очередь могут быть по специально разработанным правилам с помощью наиболее подходящего алгоритмического языка имитационного моделирования преобразованы в соответствующую математическую модель, с которой осуществляется (если, конечно, в этом есть необходимость) ряд манипуляций на ЭВМ. Синтезированные ЭВМ решения (или несколько альтернативных решений) с помощью однородных поточных и структурных схем системотехники (которые еще только требуется создать) транслируются на уровень «синкретических» структурных схем и лишь после этого становятся пригодными для использования в инженерной практике.

Таким образом, в настоящее время образовался определенный разрыв между слоями «синкретических» структурных схем системотехники, ориентированных на

конкретные инженерные задачи, и различных функциональных схем сложного инженерного объекта. Для преодоления этого разрыва необходимо развитие особого промежуточного слоя системных представлений, зафиксированных в специфическом графическом изображении, – однородных поточных и структурных схемах. Они в системотехнике обладают определенной спецификой по сравнению с классическими научно-техническими дисциплинами, поскольку не могут быть заимствованы из какой-либо естественно-научной теории, а транслируются из методологической сферы системного подхода и общей теории систем.

Независимо от того, будет ли построена в итоге универсальная математическая модель или сохранится многообразие математических моделей, зафиксированных в различных языках имитационного моделирования, слои поточных и структурных схем позволят синтезировать различные функциональные (математические) схемы сложной системы и транслировать полученные результаты на уровень «синкретических» схем (это относится и к проблеме описания и моделирования, и к самой системотехнической деятельности). Здесь весьма продуктивным является применение широко известного в методологической литературе понятия «конфигуратор».

Полученные в результате имитационного моделирования различные схемы сложного инженерного объекта (отражающие разные его аспекты и режимы функционирования) должны быть представлены в виде особого устройства – конфигулятора, синтезирующего эти схемы в единое системное изображение (конфигуроид). Такого рода синтез будет достаточно сложным, поэтому, вероятно, он также должен осуществляться с помощью ЭВМ.

Таким образом, задача построения математизированной системотехнической теории заключается сегодня главным образом в развитии обобщенных структурных и поточных теоретических схем (и соответствующих им способов графического изображения), поскольку самую большую трудность в настоящее время вызывает содержательное системное описание имитационной модели в некоторой стандартной форме. (Формализация этого описания не составляет большого труда, так как может производиться автоматически.) Причем конфигулятор, который строится из обобщенных структурных и поточных схем, должен синтезировать, с одной стороны, различные математические имитационные модели, а с другой – комплексные системные модели сложного инженерного объекта. Проблема заключается в том, чтобы нормировать и унифицировать процедуры построения такого конфигулятора.

Системотехника является продуктом развития традиционной инженерной деятельности и проектирования и первоначально мало отличалась от них. Однако с возрастанием сложности систем, появлением новых прикладных дисциплин, выработкой системных принципов и т.д. системотехника постепенно становится качественно новым этапом в развитии инженерной деятельности.

Такие виды и области инженерной деятельности, как проектирование, конструирование, разработка технологии, отладка и т.п., а также радиоэлектроника, химическая технология, инженерная экономика, разработка средств общения человека и машины и т.д., претерпевают в системотехнике существенные изменения. Они оказывают значительное влияние друг на друга. Необходимость ориентации

на системотехническую деятельность в целом предъявляет к ним специфические требования, видоизменяет их.

В то же время традиционные виды и области инженерной деятельности продолжают существовать и развиваться вне системотехники, независимо от нее. Естественно, что, скажем, проектирование радиоэлектронных устройств как самостоятельная сфера инженерной деятельности и проектирование в рамках системотехники существенно отличаются друг от друга. В последнем случае специалист по радиоэлектронике должен учитывать влияние и потребности других видов системотехнической деятельности и их общий конечный продукт. Поэтому особое значение приобретает деятельность, направленная на организацию, научно-тематическую координацию и руководство всеми видами системотехнической деятельности, а также на стыковку и интеграцию частей системы в единое целое. Именно эта деятельность является «ядром» системотехники и определяет в конечном счете ее специфику, комплексный и системный характер.

Таким образом, системотехника, развиваясь неклассическим, нестандартным путем, отличается от классических научно-технических дисциплин прежде всего тем, что в последних теория строилась под влиянием определенной базовой естественно-научной дисциплины и именно из нее заимствовались первоначально теоретические средства и образцы научной деятельности. Для системотехники такой базовой дисциплины нет, так как она обусловлена необходимостью решения комплексных инженерных задач, требующих участия представителей многих научных дисциплин (математических, технических, естественных и даже общественных). Инженерная деятельность по своему смыслу должна опираться на научные разработки, поэтому в системотехнике возникает задача проведения особого комплексного теоретического исследования сложных систем.

Использование и развитие системного подхода в системотехнике определяет ее специфику как комплексной научно-технической дисциплины. Системные представления являются конкретно-методологическим средством описания как сложного инженерного объекта, так и системотехнической деятельности.

В результате исследования проблемы синтеза в системотехнике выделены два уровня синтеза системотехнических знаний: первый соответствует одноаспектному, а второй – комплексному теоретическому исследованию. Одноаспектное исследование должно проводиться в системотехнике не только в плане представления сложного инженерного объекта в различных научных дисциплинах, но и в плане проектирования, изобретения, конструирования, изготовления и эксплуатации сложного инженерного объекта.

Специфика комплексного исследования заключается в более жесткой, чем у любых других исследований, ориентации на инженерную практику.

## Выводы

1. Системотехникам, возможно, потребуется скорректировать свое мышление и адаптироваться к новым проблемам, возникающим в обществе в результате глобальных системных изменений или разрушительных событий.

2. Изменения могут включать изменение потребностей пользователя, изменение назначения систем, конкуренцию и командные изменения, изменение характеристики угроз.

3. Проблемные области могут включать технологию, процессы, человеко-машинные интерфейсы.

4. Системотехнический подход может применяться и адаптироваться к новым вызовам для множества областей и сфер человеческой деятельности, включая здравоохранение, транспорт, окружающую среду, Интернет вещей, промышленность.

5. Системотехникам может потребоваться пересмотр традиционных форм обучения системной инженерии. Некоторые из обсуждаемых областей могут включать основные предметные области системотехники; системное мышление; междисциплинарность/трансдисциплинарность идей; модели ориентированную системную инженерию и цифровую инженерию; Интернет вещей и сложные адаптивные системы; образование за пределами традиционных норм; гибкую (agile) системную инженерию.

## Контрольные вопросы

1. Какие факторы развития технических систем вам известны?
2. Какие вы знаете сферы системотехнического инженерного подхода?
3. В чем заключается концепция «Индустрии 4.0»?
4. Что такое «цифровой двойник»?
5. Каковы основные предметные области системотехники?
6. Какую роль играет системное мышление в деятельности системотехника?
7. Какими компетенциями должен обладать современный системотехник?
8. Что такое гибкая системотехника?
9. Каковы перспективы развития теоретической системотехники?
10. Какая последовательность обобщенных операций фактически выполняется на каждом этапе системотехнической деятельности?
11. Как выглядит комплексная системная модель сложного инженерного объекта?
12. Зачем нужно строить системотехническую теорию?
13. В чем заключается проблема построения системотехнической теории?
14. Какие существуют возможные пути решения проблемы построения системотехнической теории?
15. Что необходимо для разработки системы однородных описаний сложных систем?

## Упражнения

1. Укажите два проекта в вашей организации, которые в настоящее время не используют методологии системного проектирования. Почему нет? Что вы могли бы предложить, чтобы помочь этим проектам в качестве системного инженера?

2. Проведите исследование появляющихся новых технологий ([https://en.wikipedia.org/wiki/Category:Emerging\\_technologies](https://en.wikipedia.org/wiki/Category:Emerging_technologies); [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_emerging\\_technologies](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_emerging_technologies)). Ориентируясь на эти сведения, предложите свою идею новой технологии.

3. Выберите техническую систему. Пользуясь таблицами соответствия стадий жизненного цикла ТС и креативных методов, проведите исследование потенциальных путей эволюции выбранной вами ТС. Сформулируйте критерии и показатели развития ТС.

4. Найдите в Википедии информацию о «цифровых двойниках» и «цифровых тенях» и ответьте на вопрос: как соотносится понятие CALS-технологий с данными понятиями?

5. Выберите техническую систему. Постройте причинно-следственные схемы ее развития в зависимости от развития смежных радиотехнике наук.

6. Опишите идеальные конечные результаты развития представителей бытовой электроники.

7. Проведите литературный поиск и найдите последние разработки в области электронной компонентной базы. Выясните, на каких физических принципах основана их работа и в чем они превосходят своих предшественников.

8. Проведите исследование и, ориентируясь на текущие технологические тренды, постройте прогноз эволюции общественных потребностей (отдельных групп потребителей) в области электроники, радиотехники и вычислительной техники. Результаты обсудите с одноклассниками.

## Рекомендуемая литература

1. Альтшуллер Г. Как стать гением: Жизненная стратегия творческой личности / Г. Альтшуллер, И. Верткин. – Минск : Беларусь, 1994. – 479 с.
2. Джонс Д. Методы проектирования / Д. Джонс. – М. : Мир, 1986.
3. Щедровицкий П.Г. Новая промышленная революция / П.Г. Щедровицкий. – URL: <https://www.youtube.com/watch?v=4odjKLXqE18>.
4. Щедровицкий П.Г. Инвестиции в человеческий капитал в условиях промышленной революции [Электронный ресурс] / П.Г. Щедровицкий. – URL: [https://www.youtube.com/watch?v=qcn9-Ri\\_E2Y](https://www.youtube.com/watch?v=qcn9-Ri_E2Y).
5. Dam S.H. The future of systems engineering / S.H. Dam. – You Tube, Spec Innovations. – 2019. – URL: <https://www.youtube.com/watch?v=sZbkWcqSpWY> (accessed: 12 July 2019).
6. Gershwin S.B. The future of manufacturing systems engineering / S.B. Gershwin // International Journal of Production Research 56: 224–237. INCOSE (2014). A world in motion: systems engineering vision 2025. International Council on Systems Engineering. – Las Vegas, NV. – July 2014.
7. Kalawsky R.S. The next generation of grand challenges for systems engineering research / R.S. Kalawsky // Procedia Computer Science. – 2013. – Vol. 16. – P. 834–843.
8. McClements D. Eight of the greatest challenges facing engineering / D. McClements. – URL: <https://newengineer.com/insight/8-of-the-greatest-challenges-facing-engineering-1087103> (accessed 12 July 2020).
9. McDonald N. 7 Systems engineering and operations trends to watch: how edge networks, Kubernetes, serverless and other trends will shape systems engineering and operations / N. McDonald. – Orielly, 2018.
10. McDonald N. 9 Trends to watch in systems engineering and operations: from artificial intelligence to serverless to Kubernetes, here’s what’s on our radar / N. McDonald, J. Devins. – Oreilly, 2019.
11. Microsoft Research Laboratory. A vision for the future of systems. – Asia, 2018. – URL: <https://www.microsoft.com/en-us/research/lab/microsoft-research-asia/articles/vision-future-systems> (accessed: 12 July 2020).
12. Miller B. The future of systems engineering / B. Miller // Presented at the INCOSE International Workshop 2019. – URL: <https://www.youtube.com/watch?v=8oymYuoxwJY> (accessed: 12 July 2020).
13. National Academy of Engineering. NAE Grand challenges for engineering. – 2019. – URL: <http://www.engineeringchallenges.org/challenges.aspx> (accessed 12 July 2020).
14. Ncube C. On the engineering of systems of systems: key challenges for the requirements engineering community / C. Ncube, S.L. Lim // 2011 Workshop on Requirements Engineering for Systems, Services and Systems-of-Systems. – Banff, Alberta. – August 2018. IEEE.

15. Online Engineering Programs. Tech 2020 what's coming in biomedical engineering? – URL: <https://www.onlineengineeringprograms.com/features/tech-2020-biomedical> (accessed: 12 July 2020).

16. Roedler G. SE of the future: shaping the future of systems engineering / G. Roedler // NDIA SE Division Meeting. – Washington, DC. – 28 February 2018.

17. Future systems engineering research directions / J. Wade, R. Adcock, T. McDermot, L. Strawser // *Disciplinary Convergence in Systems Engineering Research* / eds. A.M. Madni, B. Boehm, R. Ghanem [et al.]. – Cham: Springer. – 2018. – P. 1165–1179.

### Список литературы

1. Кривин Н.Н. Введение в методологию системо- и схмотехнического проектирования электронных и радиоэлектронных средств : учеб. пособие для бакалавриата, специалитета и магистратуры / Н.Н. Кривин. – Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2020. – 250 с.

2. *Systems Engineering Principles and Practice* / A. Kossiakoff, W.N. Sweet, S.J. Seymour [et al.]. – 2-d ed. – Hoboken, New Jersey: A John Wiley & Sons, 2011. – 560 p.

3. Баркер Дж. Опережающее мышление: Как увидеть новый тренд раньше других : пер. с англ / Дж. Баркер. – М. : Альпина Паблишер, 2014. – 188 с.

4. Инженерный кейс: от практических задач до инновационных решений : сб. инженерных кейсов по итогам науч.-образоват. конф. «Метод инженерных кейсов: достижения и вызовы будущего» с использованием материалов Международного инженерного чемпионата «CASE-IN» / под ред. Е.С. Воронцовой. – Томск : Томск. нац. исслед. политехн. ун-т, 2019. – 269 с.

5. Горохов В.Г. Методологический анализ системотехники / В.Г. Горохов. – М. : Радио и связь, 1982. – 160 с.

6. Синтез современного научного знания : сб. ст. – М. : Наука, 1973. – 640 с.

7. Блауберг И.В. Понятие целостности и его роль в научном познании / И.В. Блауберг, Б.Г. Юдин. – М. : Знание, 1972.

8. Щедровицкий Г.П. Об исходных принципах анализа проблемы обучения и развития в рамках теории деятельности / Г.П. Щедровицкий // *Обучение и развитие*. М. : Просвещение, 1966; Юдин Э.Г. Системный подход и принцип деятельности / Э.Г. Юдин. – М. : Наука, 1978.

9. Гуд Г.Х. Системотехника. Введение в проектирование больших систем / Г.Х. Гуд, Р.Э. Макол ; пер. с англ. К.Н. Трофимова, С.Е. Жорно, И.В. Соловьева ; под ред. Г.Н. Поварова. – М. : Сов. радио, 1962. – 390 с.

10. Степин В. С. Становление научной теории / В. С. Степин. – Минск : БГУ, 1976.

11. Иванов Б.И. Становление и развитие технических наук / Б.И. Иванов, В.В. Чешев. – Л. : Наука, 1977.

12. Чешев В.В. Техническое знание как объект методологического анализа / В.В. Чешев. – Томск : Томск. гос. ун-т, 1981.
13. Ахутин А.В. История принципов физического эксперимента (от античности до XVII в.) / А.В. Ахутин. – М. : Наука, 1976.
14. Горохов В.Г. Проблема формирования теории в технической науке / В.Г. Горохов // Методологические проблемы взаимодействия общественных, естественных и технических наук. – М. : Наука, 1981.
15. Системные исследования // Ежегодник 1976. – М. : Наука, 1977.
16. Наппельбаум Э.Л. Системный анализ как программа научных исследований – структура и ключевые понятия / Э.Л. Наппельбаум // Ежегодник 1979. – М. : Наука, 1980.
17. Горохов В.Г. Системотехника и управление / В.Г. Горохов. – М. : Знание, 1979.
18. Гаазе-Рапопорт М.Г. Кибернетика и теория систем / М.Г. Гаазе-Рапопорт // Системные исследования. Ежегодник 1973. – М. : Наука, 1973.
19. Никаноров С.П. Системный анализ и системный подход / С.П. Никаноров // Системные исследования. Ежегодник 1971. – М. : Наука, 1972.
20. Проблемы методологии в эргономике // Тр. ВНИИТЭ. Эргономика. – М., 1979. – Вып. 17.
21. Щедровицкий Г.П. Проблемы построения системной теории сложного популяционного объекта / Г.П. Щедровицкий // Системные исследования. Ежегодник 1975. – М. : Наука, 1976.
22. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем / Н.П. Бусленко. – М. : Наука, 1978.



## Список сокращений

АВМ	– аналоговая вычислительная машина
АМ	– амплитудная модуляция
АС	– акустическая система
АСУ	– автоматическая система управления
АЦП	– аналого-цифровой преобразователь
АЧХ	– амплитудно-частотная характеристика
БПЛА	– беспилотный летательный аппарат
ГОСТ	– государственный стандарт
ГПФ	– главная полезная функция
ДПЛ	– дискретное преобразование Лапласа
ДПФ	– дискретное преобразование Фурье
ЕСКД	– единая система конструкторской документации
ЕСПД	– единая система программной документации
ЖЦ	– жизненный цикл
ЗРТС	– законы развития технических систем
ИВК	– измерительно-вычислительный комплекс
ИВЭП	– источник вторичного электропитания
ИИ	– измерительная информация
ИКМ	– импульсно-кодовая модуляция
ИКР	– идеальный конечный результат
ИКС	– измерительно-контролирующая система
ИС	– измерительная система, интегральная схема
ИИС	– информационно-измерительная система
ИУС	– измерительно-управляющая система
ИШИМ	– интегральная широтно-импульсная модуляция
КД	– конструкторская документация
ЛЭ	– логический элемент
МФУ	– многофункциональное устройство
МЭМС	– микроэлектромеханическая система
НИР	– научно-исследовательская работа
ОКР	– опытно-конструкторская работа
ОП	– объект проектирования
ПВ	– проводное вещание
ПО	– программное обеспечение
ПРО	– противоракетная оборона
РЛС	– радиолокационная система

РО	– рабочий орган
РПрУ	– радиоприемное устройство
РТС	– радиотехнические системы, сигналы
РЭС	– радиоэлектронные средства
РЭУ	– радиоэлектронные устройства
САК	– система автоматического контроля
САПР	– система автоматизированного проектирования
СВЧ	– сверхвысокочастотный
СИ	– средства измерений
СМИ	– средства массовой информации
СТ	– список требований
СТД	– система технической диагностики
СЭС	– схема электрическая структурная
ТАУ	– теория автоматического управления
ТЗ	– техническое задание
ТО	– технический объект
ТР	– техническое решение
ТРИЗ	– теория решения изобретательских задач
ТС	– техническая система
ТТ	– технические требования
ТФ	– техническая функция
УГО	– условно-графическое обозначение
УЗЧ	– усилитель звуковых частот
УНЧ	– усилитель низких частот
УОИ	– устройство отображения информации
УПЧ	– усилитель промежуточной частоты
УФЭ	– устройство функциональной электроники
ФИМ	– фазоимпульсная модуляция
ФМ	– фазовая модуляция
ФПД	– физический принцип действия
ФС	– функциональная структура
ФТЭ	– физико-технический эффект
ФУ	– функциональный узел
ФЧХ	– фазочастотная характеристика
ФЭ	– физический эффект
ФЯ	– физическое явление
ЦАП	– цифроаналоговое преобразование
ЦВМ	– цифровая вычислительная машина

ЦФ	– целевая функция
ЧИМ	– частотно-импульсная модуляция
ЧМ	– частотная модуляция
ЧЯ	– «черный ящик»
ШИМ	– широтно-импульсная модуляция
ЭВМ	– электронно-вычислительная машина
ЭКБ	– электронная компонентная база
ЭМВ	– электромагнитная волна
ЭРЭС	– электронные и/или радиоэлектронные средства
ЭС	– электронные средства
ЭУ	– электронные устройства
CAD	– Computer Aided Design (автоматизированное конструкторское проектирование)
CAE	– Computer Aided Engineering (автоматизированные расчеты и анализ)
CALS	– Continuous Acquisition and Lifecycle Support (непрерывная поддержка производства и жизненного цикла)
CAM	– Computer Aided Manufacturing (автоматизированная технологическая подготовка производства)
CNC	– Computer Numerical Control (компьютерное числовое управление)
CPC	– Collaborative Product Commerce (совместный электронный бизнес)
CRM	– Customer Relationship Management (управление взаимоотношениями с заказчиками)
DoD	– Department of Defense
ERP	– Enterprise Resource Planning (планирование и управление предприятием)
GUI	– Graphic User Interface (графический интерфейс пользователя)
IEEE	– Institute of Electrical and Electronics Engineers (Институт инженеров электротехники и электроники)
INCOSE	– The International Council on Systems Engineering (Международный совет по системной инженерии)
KPI	– Key Performance Indicators (ключевые показатели эффективности)
KUR	– Key User Requirements (ключевые требования пользователя)
MES	– Manufacturing Execution System (производственная исполнительная система)
MRP-2	– Manufacturing Requirement Planning (планирование производства)
NASA	– National Aeronautics and Space Administration (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства)
PDM	– Product Data Management (управление проектными данными)
S&SM	– Sales and Service Management (управление продажами и обслуживанием)

- SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition (диспетчерское управление производственными процессами)
- SCM – Supply Channel Management (управление последовательностью поставок)
- SysML – Systems Modeling Language (системный язык моделирования)
- TRL – Technology readiness levels (уровни готовности технологии)
- UML – Unified Modeling Language (унифицированный язык моделирования)

Учебное издание

**Кривин Николай Николаевич**

**МЕТОДОЛОГИЯ СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ЭЛЕКТРОННЫХ И РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

Учебное пособие для бакалавриата, специалитета и магистратуры

В двух частях

Часть 2

Подписано в печать 26.07.2022.

Формат 70×100/16. Усл. печ. л. 16,45.

Тираж 150 экз. Заказ № 200.

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

Тел. (3822) 533018.