

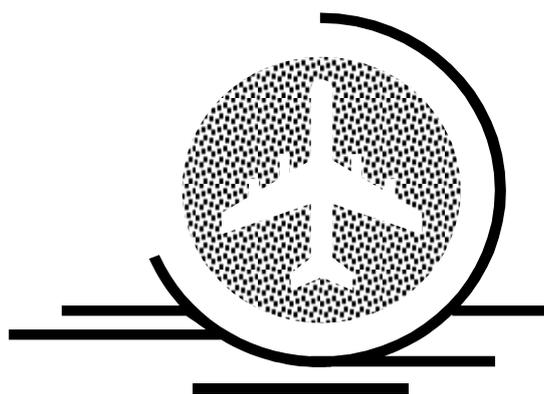


Томский государственный
университет систем управления и
радиоэлектроники

В.Г.Козлов

ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Учебное пособие для студентов специальности
160905 – “Техническая эксплуатация транспортного
радиооборудования”



ТОМСК 2012

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
ние

«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

В.Г.Козлов

ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Учебное пособие для студентов специальности
160905 – “Техническая эксплуатация транспортного
радиооборудования”**

2012

Рецензент: заведующий кафедрой «Конструирования и производства радиоаппаратуры», д.т.н. Татаринов В.Н.

Технический редактор: доцент кафедры КИПР ТУСУР, к.т.н. Озёркин Д.В.

Козлов В.Г.

Техническая эксплуатация радиоэлектронного оборудования. Учебное пособие для студентов для студентов специальности 160905 – «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования».

Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. - 133 с.

В разделе пособия

В разделе пособия «Решение задач по технической эксплуатации радиоэлектронного радиооборудования на практических занятиях» приведены основные расчетные формулы, примеры решения типовых задач и многовариантные задачи для самостоятельной работы. Рассмотрены вопросы расчета периодичности и продолжительности профилактических работ и расчета ремонтпригодности. Остальные вопросы, изучаемые на практических занятиях по дисциплине «Техническая эксплуатация радиоэлектронного оборудования (ТЭРЭО)» и не вошедшие в пособие из-за его ограниченного объема, планируется издать в дальнейшем.

Представлены описания четырех лабораторных работ и индивидуальные задания для их выполнения. Кроме того, отдельно даны описания и индивидуальные задания двух лабораторных работ по технической эксплуатации, в которых используется математический аппарат теории массового обслуживания. Это связано с тем, что «Теория массового обслуживания», являющаяся разделом ТЭРЭО, изучается на кафедре КИПР ТУСУР как отдельная дисциплина. При выполнении лабораторных работ предполагается широкое использование системы схемотехнического моделирования MicroCAP 8 и пакета прикладных программ MathCAD 13. Учебное пособие по практическим занятиям и лабораторным работам составлено для студентов очной, заочной и дистанционной форм обучения по специальности 160905 – «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования», но может быть использовано и студентами других специальностей радиотехнического профиля.

© Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники,
2012

© Козлов В.Г., 2012

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ. ЦЕЛЬ НАПИСАНИЯ И НАЗНАЧЕНИЕ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ.....	7
--	----------

1 МАТЕРИАЛЫ ЛЕКЦИЙ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ	8
--	----------

1.1 Основные термины и определения технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования и задачи, решаемые при эксплуатации.....	8
1.2 Стадии жизненного цикла РЭО.....	10
1.3 Стадия эксплуатации РЭО.....	12
1.4 Состояния радиоэлектронного оборудования.....	14
1.5 База эксплуатации радиотехнического борудования.....	17
1.6 Стратегии технического обслуживания РЭО.....	19
1.7 Моделирование процессов ТО.....	21
1.8 Хранение РЭО.....	25
1.9 Программы и методики проведения испытания при эксплуатации РЭО.....	27
1.10 Граничные испытания для оценки параметрической надежности.....	29
1.11 Испытания на климатические воздействия, возникающие при эксплуатации РЭО.....	31
1.12 Испытания на механические воздействия при эксплуатации РЭО.....	33

2 РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЯХ.....	36
---	-----------

2.1 Расчет периодичности и продолжительности профилактических работ	36
2.1.1 Основные соотношения между периодом профилактических работ и средней продолжительностью технического обслуживания	36
2.1.2 Примеры расчета периодичности и продолжительности профилактических работ	38
2.1.3 Задачи расчета периодичности и продолжительности профилактических работ	41
2.2 Расчёт ремонтпригодности.....	43

2.2.1	Основные формулы для расчёта ремонтпригодности.....	43
2.2.2	Примеры расчета ремонтпригодности.....	45
2.2.3	Задачи по расчёту ремонтпригодности.....	48

3 ОПИСАНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ ДЛЯ ИХ ВЫПОЛНЕНИЯ... 50

3.1	Составление алгоритма для определения места неисправности радиоэлектронного оборудования	50
3.1.1	Цели работы.....	50
3.1.2	Общие теоретические сведения.....	50
3.1.3	Задание на работу.....	56
3.1.4	Содержание отчета.....	56
3.1.5	Перечень контрольных вопросов, которые могут быть заданы во время защиты отчёта по работе	56
3.1.6	Варианты заданий	57
3.2	Граничные испытания для оценки запаса параметрической надёжности.....	58
3.2.1	Цель работы	58
3.2.2	Общие сведения о параметрической надёжности	58
3.2.3	Методика проведения граничных испытаний для оценки запаса параметрической надёжности	59
3.2.4	Задание на работу.....	64
3.2.5	Содержание отчета.....	65
3.2.6	Перечень контрольных вопросов, которые могут быть заданы во время защиты отчёта по работе	65
3.3	Функциональные испытания математической модели радиоэлектронного устройства в системе MicroCAP 8 с использованием метода планирования полного факторного эксперимента.....	66
3.3.1	Цели работы.....	66
3.3.2	Общие сведения о планировании факторного эксперимента и его применении при функциональных испытаниях.....	66
3.3.3	Пример получения полиномиальной модели с проверкой адекватности модели и значимости коэффициентов	73
3.3.4	Пример получения полиномиальной модели с помощью ПФЭ с вычислением коэффициентов взаимодействия 2-го порядка	81
3.3.5	Лабораторное задание.....	97

3.3.6	Содержание отчета.....	99
3.3.7	Перечень контрольных вопросов, которые могут быть заданы во время защиты отчёта по работе	99
3.4	Сравнительные функциональные испытания стабильности выходного параметра математических моделей усилительных каскадов при изменении температуры эксплуатации в широком диапазоне.....	100
3.4.1	Цель работы	100
3.4.2	Краткие сведения о стабильности выходного параметра усилительных каскадов при изменении температуры эксплуатации в широком диапазоне	100
3.4.3	Пример проведения сравнительных функциональных испытаний стабильности выходного параметра.....	103
3.4.4	Лабораторное задание.....	112
3.4.5	Содержание отчета.....	113
3.4.6	Перечень контрольных вопросов, которые могут быть заданы во время защиты отчёта по работе	113

4 ОПИСАНИЯ И ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ, В КОТОРЫХ ИСПОЛЬЗУЕТСЯ МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ТЕОРИИ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ..... 114

4.1	Определение статистических характеристик технического обслуживания замкнутой системы массового обслуживания с ожиданием	114
4.1.1	Цель работы	114
4.1.2	Общие сведения о применении теории массового обслуживания для определения статистических характеристик технического обслуживания	114
4.1.3	Пример использования ТМО для расчета характеристик технического обслуживания замкнутой многоканальной СМО с ожиданием.....	118
4.1.4	Индивидуальные задания для расчета в лабораторной работе характеристик технического обслуживания замкнутой многоканальной СМО с ожиданием	120
4.1.5	Этапы выполнения лабораторной работы	121
4.1.6	Содержание отчета.....	121
4.1.7	Перечень контрольных вопросов, которые могут быть заданы во время защиты отчёта по работе	122

4.2	Определение статистических характеристик технического обслуживания открытых систем массового обслуживания с ожиданием и с отказами	122
4.2.1	Цель работы	122
4.2.2	Общие сведения о СМО с ожиданием и с отказами	123
4.2.3	Общие сведения об открытой одноканальной СМО с ожиданием.....	123
4.2.4	Общие сведения об открытой многоканальной СМО смешанного типа с ограниченным временем ожидания...	126
4.2.5	Общие сведения об открытой многоканальной СМО смешанного типа с ограничением по длине очереди	127
4.2.6	Индивидуальные задания для расчета в лабораторной работе характеристик технического обслуживания открытых многоканальных СМО с ожиданием и с отказами.....	129
4.2.7	Этапы выполнения лабораторной работы	131
4.2.8	Содержание отчета.....	131
4.2.9	Перечень контрольных вопросов, которые могут быть заданы во время защиты отчёта по работе	131
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ		132

ВВЕДЕНИЕ. Цель написания и назначение учебного пособия

Необходимость написания книги связана с тем, что в настоящее время отсутствуют учебные пособия по лекционным и практическим занятиям и лабораторным работам по дисциплине «Техническая эксплуатация радиоэлектронного оборудования», а также учебные пособия по лабораторным работам по дисциплине «Теория массового обслуживания» для студентов специальности 160905 – «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования». В то же время эти материалы приведены во многих книгах по эксплуатации, по надёжности, по технической диагностике, по техническому обслуживанию (ТО) и ремонту, по контролю и испытаниям радиоэлектронного оборудования [1-31]. Предпринята попытка свести эти разрозненные материалы в одно учебное пособие.

В пособии приведены

В пособии приведены основные расчетные формулы, примеры решения типовых задач и многовариантные задачи для самостоятельной работы. Рекомендуется использовать решения типовых задач при изучении соответствующих разделов лекционного курса. Даны многовариантные задания для самостоятельных и контрольных работ. Рассмотрены вопросы расчета периодичности и продолжительности профилактических работ и расчета ремонтпригодности. Остальные вопросы, изучаемые на практических занятиях по дисциплине «Техническая эксплуатация радиоэлектронного оборудования (ТЭРЭО)» и не вошедшие в пособие из-за его ограниченного объёма, планируется издать в дальнейшем. Часть теоретических положений и примеров заимствована из книг, приведённых в списке литературы. Большая часть примеров и задач составлена автором.

Представлены описания четырех лабораторных работ и индивидуальные задания для их выполнения. Кроме того, отдельно даны описания и индивидуальные задания двух лабораторных работ по технической эксплуатации, в которых используется математический аппарат теории массового обслуживания. Это связано с тем, что «Теория массового обслуживания», являющаяся разделом ТЭРЭО, изучается на кафедре КИПР ТУСУР как отдельная дисциплина. При выполнении лабораторных работ предполагается широкое использование системы схемотехнического моделирования MicroCAP 8 и пакета прикладных программ MathCAD 13. Учебное пособие по практическим занятиям и лабораторным работам составлено для студентов очной, заочной и дистанционной форм обучения по специальности 160905 – «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования», но может быть использовано и студентами других специальностей радиотехнического профиля.

Темы практических занятий и лабораторных работ подобраны таким образом, чтобы их освоение позволяло улучшить качество работы по управ-

лению состоянием радиоэлектронного оборудования (РЭО) в процессе его эксплуатации. Автор будет благодарен за советы и замечания по пособию, которые следует отправлять по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 40, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, кафедра «Конструирования и производства радиоаппаратуры».

1 МАТЕРИАЛЫ ЛЕКЦИЙ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

1.1 Основные термины и определения технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования и задачи, решаемые при эксплуатации

Техническая эксплуатация РЭО это комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на обеспечение надёжности и бесперебойности работы РЭО [3].

Надёжность – это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования [14].

Техническое обслуживание – это комплекс работ (операций) для поддержания РЭО в исправном или работоспособном состоянии при подготовке и применении по назначению, хранении и транспортировании [2, 3].

Ремонт – это комплекс операций по восстановлению исправности или работоспособности и восстановлению ресурсов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) или её составных частей [2].

Техническое состояние – это совокупность подверженных изменению в процессе производства или эксплуатации свойств объекта, характеризуемая в определённый момент времени признаками, установленными технической документацией на объект [3].

Процесс определения технического состояния с определённой точностью называется **техническим диагностированием** [4].

Исправное состояние (исправность) – это состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Работоспособное состояние (работоспособность) – это состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Отказ – это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Неработоспособному состоянию может предшествовать **предельное состояние**, то есть состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуа-

тация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно [16].

При техническом диагностировании и техническом обслуживании во время эксплуатации и при ремонте часто проводят **поиск места отказа**, то есть определение части изделия, отказ которой привел к возникновению состояния неработоспособности. В главе 3 подробно описан пример составления алгоритма для определения места неисправности (поиска места отказа) радиоэлектронного оборудования при использовании информационной функциональной диагностической модели.

Диагностический признак (параметр) – это признак (параметр) объекта диагностирования, используемый для определения технического состояния объекта [4].

Предотказовое значение параметра – это значение диагностического параметра, находящееся в поле (зоне) упреждающего допуска.

Упреждающий допуск диагностического параметра – это диапазон изменения диагностического параметра, в котором в соответствии с эксплуатационной или ремонтной документацией нарушается исправность изделия при сохранении его работоспособности [3].

Восстановление – это процесс перевода объекта в работоспособное состояние из неработоспособного состояния.

Надёжность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств.

Безотказностью называют свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки.

Долговечностью называют свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Ремонтпригодностью называют свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

Сохраняемостью называют свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способности объекта выполнять требуемые функции, в течение и после хранения и (или) транспортирования [16].

Хранение – это содержание объекта в исправном состоянии в течение установленного срока.

Транспортирование – это перевозка РЭО в условиях, обеспечивающих сохранение работоспособности.

При технической эксплуатации должны решаться следующие задачи [4, 14]:

- парирование процессов деградации РЭО при старении и износе и поддержание изделия в работоспособном состоянии за счёт ТО и ремонта (ТОиР), а также за счёт обеспечения оптимальных условий хранения;
- принятие мер по уменьшению вероятности отказов;
- определение потребности изделия в ТО;
- минимизация затрат по ТОиР;
- восстановление изделия при возникновении отказа или предотказового состояния.

В процессах проектирования, производства, модернизации и эксплуатации РЭО проводятся испытания. **Испытания** – это экспериментальное определение количественных и качественных характеристик параметров изделия путём воздействия на него или его модель внешних возмущающих факторов (ВВФ). Под ВВФ понимают явления, процессы или среды внешние по отношению к изделию или его частям, которые могут вызвать ограничение или потерю работоспособности при эксплуатации [6, 17,18].

В главе 3 подробно описаны примеры испытаний с использованием компьютерных моделей системы схемотехнического моделирования Micro-CAP 8. Рассмотрены граничные и сравнительные испытания и функциональные испытания с использованием статистических методов планирования факторного эксперимента.

Системы массового обслуживания (СМО) – это совокупность однородных обслуживающих устройств (приборов, мастерских и т.д.), называемых каналами обслуживания. Примерами СМО могут служить сборочные цеха, ремонтные мастерские, инженерно-авиационная служба, восстанавливаемая резервированная аппаратура, телефонные станции, все виды транспорта (вместе с билетными кассами) и т.д. В главе 4 пособия описаны примеры определения **статистических характеристик систем массового обслуживания** широко используемых при эксплуатации радиоэлектронного оборудования.

Приведённые в пособии примеры решения задач могут быть полезны при выполнении заданий по практическим занятиям и лабораторным работам, при работе над курсовыми и дипломными проектами, а также при решении производственных задач технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования.

1.2 Стадии жизненного цикла РЭО

Изменения РЭО, начиная с момента её создания и кончая полным разрушением и утилизацией, образуют жизненный цикл (ЖЦ). Процессы ЖЦ, условно классифицированные П. С. Давыдовым [4] (рисунок 1.1), характеризуются рядом стадий и этапов. Из рисунка видно, что часть этапов и стадий ЖЦ перекрываются во времени, а в процессе ЖЦ идет доработка изделия и осуществляется управление его состоянием и качеством.



ТЗ- техническое задание; Хр- хранение; Ож- ожидание; ФИ- функциональное использование; Р- ремонт; ТО- техническое обслуживание

Рисунок 1.1 - Типовое распределение стадий и этапов жизненного цикла

Стадиями жизненного цикла РЭО являются стадии:

а) Исследования и проектирования. Разработка РЭО на этой стадии начинается с этапов научно-исследовательской (НИР), а затем опытно-конструкторской разработок (ОКР). НИР и ОКР могут быть совмещены в научно-исследовательскую опытно-конструкторскую разработку (НИОКР). На этапе НИР проводятся научно-исследовательские работы, которые должны подтвердить возможность создания РЭО. Результатом НИР является научно-технический отчет. В результате НИР вырабатываются требования к техническому заданию (ТЗ) на ОКР. Результатом ОКР является представление опытных образцов изделий, которые должны пройти заводские или государственные испытания. На основании испытаний делается заключение о начале производства данного РЭО. По ГОСТ 2.103-68 НИР и ОКР включают в себя стадии, приведённые в таблице 1.1.

б) Изготовления изделий, включающую конструкторскую (таблица 1.1, пункт 5) и технологическую подготовку производства, становление производства и подготовку изделий к транспортированию и хранению.

в) Обращения изделий, на которой организуется максимальное сохранение качества продукции в период транспортирования и хранения.

г) Эксплуатации, которая является основной в ЖЦ и включает целевое использование изделия, в соответствии с назначением, техническое обслуживание и профилактическое восстановление, ремонт и восстановление после отказа.

д) На последнем этапе эксплуатации после потери изделием потребительских качеств реализуется операция его утилизации при максимальном использовании утилизированных веществ.

Таблица 1.1- Стадии разработки НИР и ОКР

№ п.п.	Стадии разработки	Этапы работ
1	Техническое задание	Разработка технического задания
2	Техническое предложение	Подбор материалов. Разработка и утверждение технического предложения по результатам анализа ТЗ и литературы. Конструкторской документации (КД) присваивается литера "П"
3	Эскизный проект	Разработка эскизного проекта с присвоением КД литеры "Э". Изготовление и испытание макетов. Рассмотрение и утверждение эскизного проекта
4	Технический проект	Разработка технического проекта с присвоением КД литеры "Т". Изготовление и испытание макетов. Рассмотрение и утверждение технического проекта
5	Разработка рабочей документации (рабочий проект): а) опытный образец (партия) б) установочная серия в) серийное или массовое производство	Разработка КД для изготовления и испытания опытного образца (партии). Изготовление и заводские испытания опытного образца. Корректировка КД по результатам изготовления и испытаниям с присвоением КД литеры "О". Государственные, межведомственные, приемочные и др. испытания опытного образца. Корректировка КД по результатам этих испытаний с присвоением литеры "О". При проведении повторных испытаний и корректировке КД присваиваются литеры "О1", "О2" и т.д. Изготовление и испытание установочной серии. Корректировка КД по результатам этих работ и оснащение технологического процесса с присвоением КД литеры "А". Изготовление и испытание головной (контрольной) партии изделия. Корректировка КД по результатам этих работ с присвоением КД литеры "Б". КД должна быть окончательно отработана и проверена по зафиксированному и полностью оснащеному технологическому процессу.

1.3 Стадия эксплуатации РЭО

Термин эксплуатация происходит от французского слова exploitation, означающего получение пользы или выгоды из чего-либо. В широком смысле эксплуатация это систематическое использование человеком производительных сил. В техническом плане эксплуатацию можно рассматривать как процесс использования оператором объекта для достижения требуемых результатов.

Эксплуатация РЭО – это совокупность работ и организованных мероприятий для поддержания РЭО в постоянной технической исправности.

Стадия эксплуатации охватывает период существования объекта от его изготовления до утилизации (рисунок 1.1). Эта стадия характеризуется, в первую очередь, функционированием, то есть полезной работой, для которой РЭО создаётся. Стадия эксплуатации состоит из ряда этапов, то есть законченных по целевому назначению частей процесса эксплуатации. Обычно стадия эксплуатации РЭО состоит из следующих основных этапов: хранение, транспортирование, подготовка к применению, целевое функциональное использование изделия, в соответствии с назначением, техническое обслуживание (ТО) и профилактическое восстановление, ремонт и восстановление после отказа. На стадии эксплуатации на РЭО воздействуют внешние условия, расходуется заложенный технический ресурс. В результате этого в РЭО развиваются деградиционные процессы, которые могут привести к нарушению работоспособности, то есть к возникновению отказа. Для парирования результатов воздействия деградиционных процессов ведутся работы по ТО и профилактическому восстановлению, а в случае возникновения отказа - работы по восстановлению работоспособности. Таким образом, переход РЭО из одного состояния в другое является или следствием целенаправленного управления (ТО, ремонт) или случайным процессом. На стадии эксплуатации (как правило в процессе ремонта) может быть проведена модернизация РЭО.

Условия эксплуатации – это совокупность факторов, действующих на РЭО при эксплуатации: климатические условия, механические и электрические нагрузки, электромагнитные излучения, квалификация обслуживающего персонала, обеспеченность с запасными частями и т. д. Классификация мероприятий при эксплуатации приведена на рисунке 2.1.

Под **хранением** РЭО понимается содержание его в технически исправном состоянии в течение установленного срока до реализации. В процессе хранения должны быть созданы благоприятные условия содержания техники, при которых обеспечивается сохранение работоспособности.

Транспортирование – перевозка РЭО в условиях, обеспечивающих сохранение работоспособности.

Подготовка РЭО к применению – это совокупность работ по подготовке аппаратуры к нормальному функционированию в соответствии с ее назначением и техническими условиями.

Применение РЭО по назначению – это совокупность работ, обеспечивающих нормальное функционирование аппаратуры в соответствии с техническими условиями.

Техническое обслуживание – это комплекс работ (операций) для поддержания РЭО в исправном или работоспособном состоянии при подготовке и применению по назначению, хранении и транспортировании.

Ремонт – комплекс операций по восстановлению исправности или работоспособности и восстановлению ресурсов РЭО или его составных частей. **Плановым называют ремонт**, постановка на который осуществляется в соответствии с требованиями нормативно – технической документации. **Неплановый ремонт**, осуществляется без предварительного назначения. Ре-

монт, выполняемый для обеспечения или восстановления работоспособности объекта и состоящий в замене или восстановлении его отдельных частей, называется **текущим**. Он осуществляется после возникновения отказа РЭО. Ремонт, выполняемый для восстановления исправности и частичного восстановления ресурса объектов с заменой или восстановлением составных частей ограниченной номенклатуры и контролем технического состояния составных частей, выполняемом в объеме, установленном в нормативно – технической документации, называется **средним**. Ремонт, выполняемый для восстановления исправности и полного или близкого к полному восстановлению ресурса объекта с заменой или восстановлением любых его частей, включая базовые, называется **капитальным**.

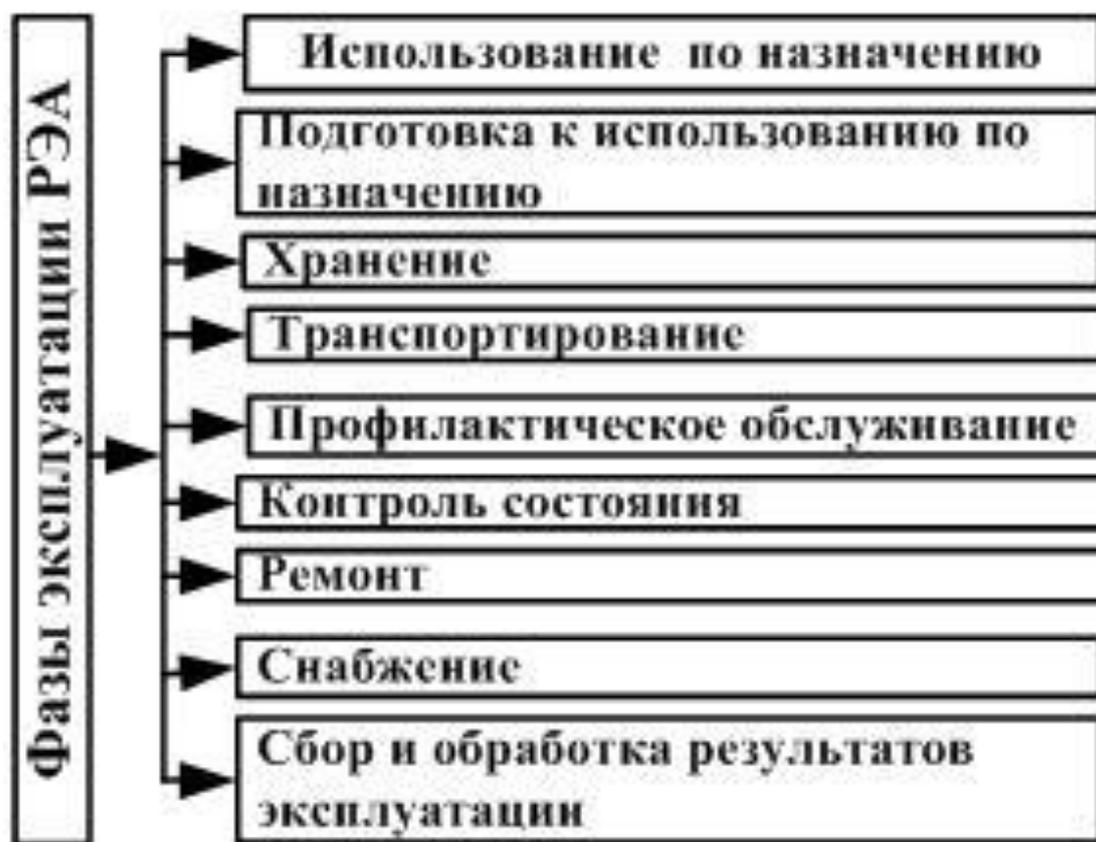


Рисунок 1.2 - Классификация мероприятий при эксплуатации

1.4 Состояния радиоэлектронного оборудования

Уровень надёжности радиоэлектронного оборудования (РЭО) зависит от того, в каком состоянии находится объект. Основные виды состояний объектов регламентированы в ГОСТ 27.002-89. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения.

Под **исправным состоянием** понимают такое состояние, при котором РЭО соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации. **Неисправное состояние** (неис-

правность) - это состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Работоспособное состояние (работоспособность) - это состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической документации (НТД). **Неработоспособное состояние** (неработоспособность) - это состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего работоспособность, не соответствует требованиям НТД. Для сложных объектов возможно деление их неработоспособных состояний. При этом из множества неработоспособных состояний выделяют частично неработоспособные состояния, при которых объект способен частично выполнять требуемые функции.

Неработоспособное состояние, при котором РЭО выполняет все функции, предусмотренные НТД, но показатели функционирования не соответствуют этой документации, называется **состоянием функционирования**. В **нефункционирующем состоянии** РЭО выполняет не все функции, предусмотренные в документации. Неработоспособному состоянию может предшествовать **предельное состояние**, при котором дальнейшая эксплуатация объекта недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно. Критерии предельного состояния - это признак или совокупность признаков предельного состояния объекта, установленные НТД. В зависимости от условий эксплуатации для одного и того же объекта могут быть установлены два и более критериев предельного состояния.

Изменение состояния РЭО происходит непрерывно под действием процессов старения, а также при появлении дефектов, повреждений и отказов. Процессы старения, а также виды дефектов, повреждений и отказов рассмотрены нами в разделе 1.4. Граф перехода РЭО из одного состояния в другое под действием процессов старения, из-за дефектов, повреждений и отказов, а также за счёт восстановления при техническом обслуживании и ремонтах приведён на рисунке 1.3. Процесс получения информации о техническом состоянии РЭО основан на **прогнозировании состояния**. **Прогноз** - это предвидение изменений в развитии каких-либо событий, явлений и процессов на основании полученных данных.

Следовательно, прежде чем воздействовать на РЭО надо знать, либо предполагать в результате **диагностирования**, в каком состоянии РЭО находится.

1.5 База эксплуатации радиотехнического оборудования

База эксплуатации радиотехнического оборудования и связи (ЭРТОС) гражданской авиации (ГА) является одним из подразделений, на которое возложено обеспечение безопасности, регулярности полетов воздушных судов (ВС), управления воздушным движением (УВД) и производственной деятельности авиакомпании и аэропорта. База организует производственную деятельность авиапредприятий и осуществляет обеспечение средствами навигации и УВД полетов ВС и техническую эксплуатацию этих средств. Типовая организационная структура базы ЭРТОС приведена на рисунке 1.4.

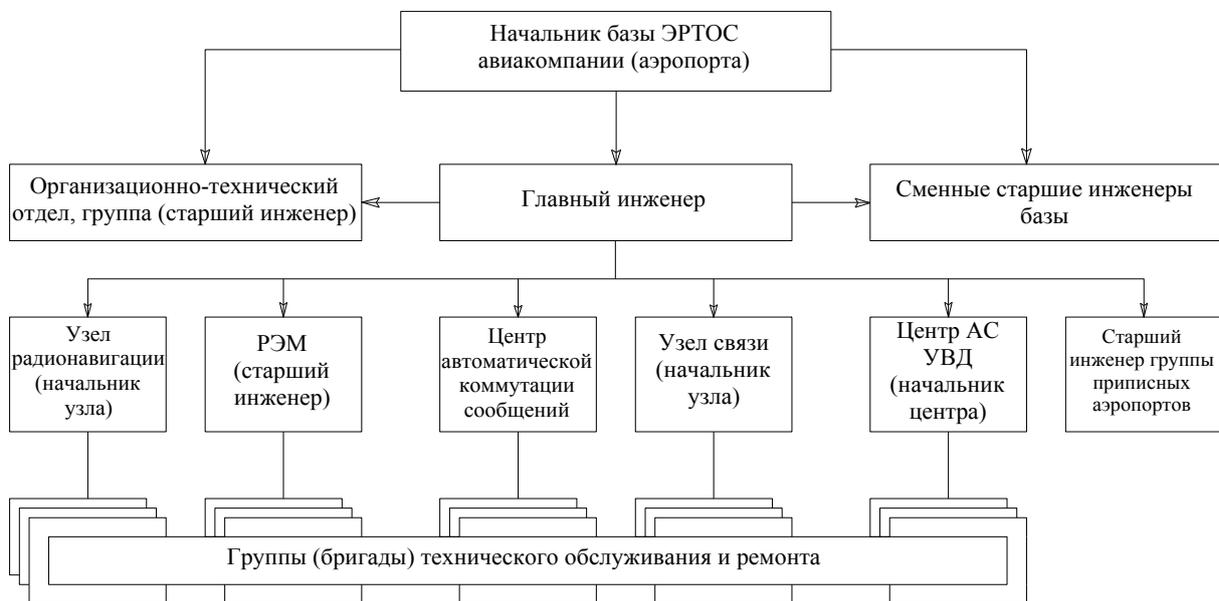


Рисунок 1.4 -Типовая организационная структура базы ЭРТОС крупных аэропортов

Основные задачи базы

-организация и осуществление технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) средств навигации и УВД, обеспечение высокой надежности и качества их работы, проведение доработок данных средств по бюллетеням заводов-изготовителей;

- обеспечение своевременного ввода в эксплуатацию нового и поступающего на замену оборудования;

- разработка временных регламентов и технологических карт ТО, на которые отсутствуют регламенты, обоснованных норм времени на ТО и Р этих средств и дополнительные работы, инструкции по резервированию средств навигации и УВД и др.

Многие базы ЭРТОС в настоящее время имеют сокращенные структуры. Однако в ряде аэропортов (авиакомпаний) в организационную структуру базы ЭРТОС могут входить:

- **узел радионавигации**, который имеет в своем составе командно-диспетчерский пункт, обзорно-трассовые радиолокаторы, системы посадки с ближними и дальними радиомаркерными маяками, радиотехническую систему ближней навигации, автоматические радиопеленгаторы, вспомогательные радиолокационные диспетчерские пункты, а также отдельные приводные радиостанции;

- **узел связи содержит передающий и приемный радиочастотные центры, радиобюро и узел телеграфной связи, автоматическую телефонную станцию, средства внутриаэропортовой громкоговорящей связи, внутриаэропортовой проводной и радиосвязи, аппаратуру досмотра ручной клади и др.;**

- **ремонтно-эксплуатационная мастерская (РЭМ)**, которая проводит децентрализованный ремонт оборудования и состоит из участков:

- монтажно-установочных работ и изготовления нестандартного оборудования;

- трудоемких видов ТОиР средств радионавигации, УВД, связи;

- подготовки производства и комплектования с расходной кладовой;

- капитального и среднего ремонта (КР и СР) автомобильных, носимых радиостанций, приемных устройств и антенно-фидерных устройств;

- трудоемких регламентных работ по резервным дизель-агрегатам, стойкам автоматики, силовым щитам, аккумуляторам и др.

Организационно-технический отдел решает вопросы, связанные с нормированием труда, учетом и отчетностью. Он подчиняется непосредственно начальнику (главному инженеру) базы. В организационно-технический отдел входят группа надежности ТО и эксплуатации и группа нормирования, планирования, учета и отчетности.

Группа надежности ТО и эксплуатации разрабатывает планы проведения ТО и Р и внедряет передовые методы ТО и Р.

Группа нормирования, планирования, учета и отчетности совершенствует системы указанных процессов.

Некоторые региональные базы ЭРТОС в настоящее время называют службами ЭРТОС, например, структурное подразделение «Служба ЭРТОС» Новокузнецкого филиала предприятия «Аэронавигация Западной Сибири» Федерального унитарного предприятия «Государственная корпорация по организации воздушного движения в Российской Федерации». Помимо вышеописанной деятельности баз ЭРТОС указанная служба ЭРТОС осуществляет и другие работы, например:

- регистрацию и учёт радиоданных излучающего РЭО;

- мероприятия по обеспечению электромагнитной совместимости РЭО;

- контроль исполнения запретов на работу излучающего РЭО;

принимает участие в расследовании авиационных происшествий и инцидентов, связанных с работой средств радиотехнического обеспечения полётов (РТОП) и связи;

ведёт учёт, расследование и анализ отказов объектов РТОП, нарушений связи и проводит мероприятия по их устранению и т. д.

Влияние на структуру баз ЭРТОС может оказывать наметившаяся активизация промышленности по развитию сервисного обслуживания.

1.6 Стратегии технического обслуживания РЭО

Согласно ГОСТ 24212-80 (Система технического обслуживания и ремонта авиационной техники. Термины и определения) имеются две основные стратегии технического обслуживания: **по наработке** с программным управлением по разомкнутому циклу (стратегия ТОН) и по состоянию с управлением по замкнутому циклу с обратной связью по информации о состоянии техники (стратегия ТОС). Структурные схемы алгоритмов процессов технического обслуживания (ТО) по этим стратегиям изображены на рисунке 1.5.

Стратегия ТОН – это система правил управления техническим состоянием, согласно которой перечень и периодичность выполнения операций зависит от значений наработки изделия с начала эксплуатации или после ремонта. Эту стратегию целесообразно применять для изделий, у которых после определенной наработки поток отказов резко возрастает, а диагностика сложна и дорога. Оперативное, сезонное и периодическое ТО по наработке входят в так называемый **регламентированный метод**.

По стратегии ТОН РЭО (рисунок 1.5,а) с заданной периодичностью ТО выводится из функционального использования и демонтируется. Затем следуют операции контроля и диагностирования, позволяющие определить техническое состояние РЭО, после чего производят необходимые управляющие воздействия (замены, регулировки и восстановления). Вслед за этим вновь следуют операции контроля и диагностирования технического состояния с целью проверки пригодности РЭО к функциональному использованию. После всех этих операций следуют монтаж и функциональное использование РЭО. В настоящее время стратегия ТОН наиболее распространена при эксплуатации транспортного РЭО. При этой стратегии на ТО может попасть исправное РЭО, работоспособное, но имеющее повреждения или неработоспособное, но функционирующее РЭО.

Перечень и периодичность операций при **стратегии ТОС** определяется фактическим техническим состоянием РЭО в момент начала ТО. Контроль может быть непрерывным или периодическим. Если в результате контроля оказывается, что состояние РЭО $S(t)$ лучше чем неработоспособное состояние или предшествующее ему предельное (предотказовое) состояние S_0 , то производится функциональное использование РЭО [$S(t) > S_0$]. Если состояние РЭО $S(t)$ равно предельному (предотказовому) состоянию S_0 [$S(t) = S_0$], то проводится регулировка, меняющая состояние так, что выполнится условие

$S(t) > S_0$, после этого осуществляют функциональное использование РЭО. Ес-

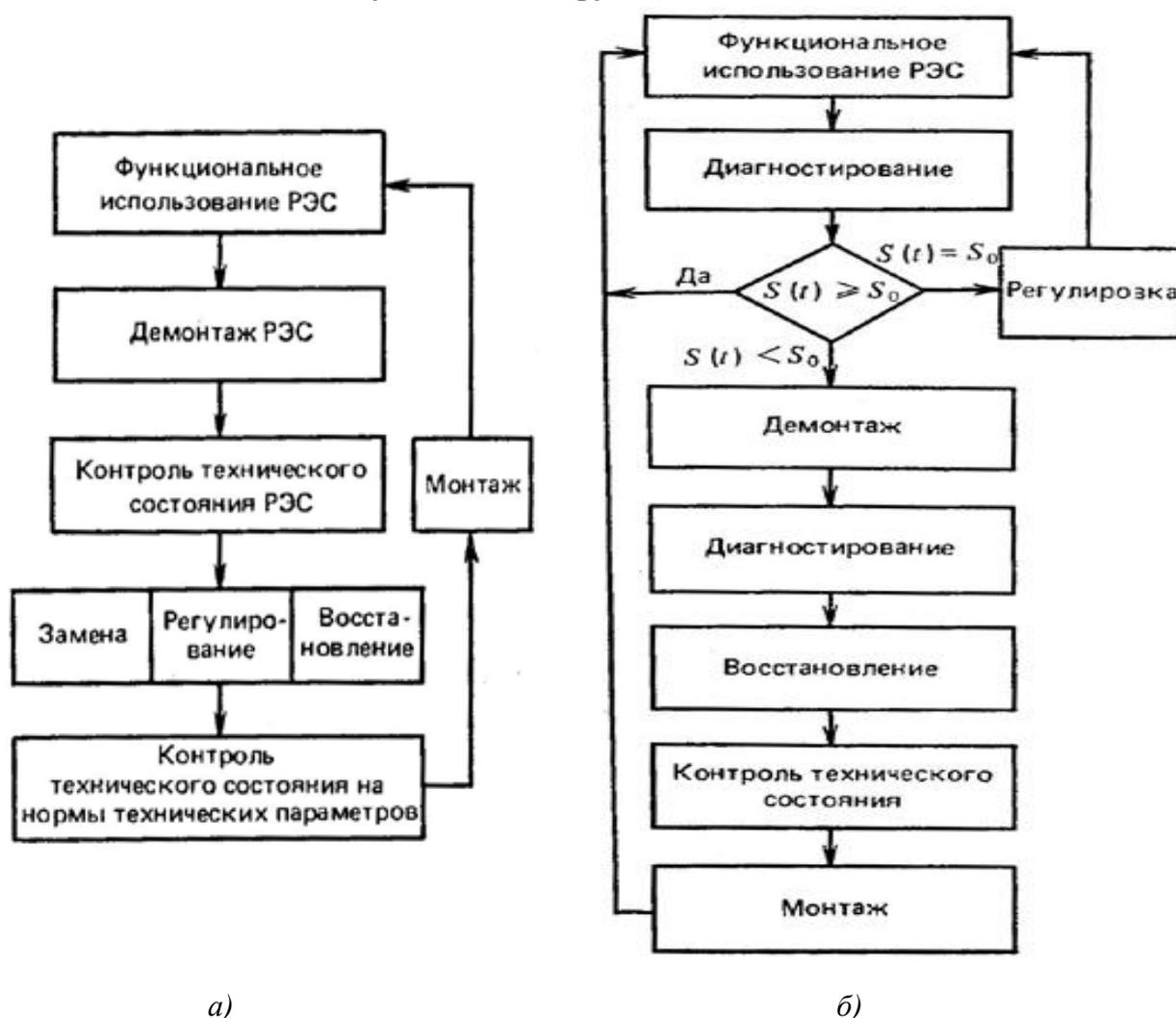


Рисунок 1.5 Стратегии технического обслуживания РЭО.

Алгоритмы процессов технического обслуживания:

a - по наработке; *б* - по состоянию

ли произошёл деградационный или эксплуатационный отказ и в результате контроля оказывается, что состояние РЭО $S(t)$ хуже чем предельное (предотказовое) состояние S_0 [$S(t) < S_0$], то последовательно производятся: демонтаж, диагностирование, восстановление, контроль технического состояния, монтаж и, наконец, функциональное использование РЭО (рисунок 1.5,б).

Стратегия ТОС имеет лучшее значение коэффициента технического использования, чем стратегия ТОН и является предпочтительной для повышения надёжности РЭО. Другие преимущества стратегии ТОС:

объём работ обратно пропорционален степени уменьшения запаса работоспособного состояния;

— уменьшается уровень конкомитантных отказов - отказов вносимых в РЭО при выполнении работ по ТО, регулировках, демонтаже и монтаже;

– экономится комплект запасного имущества и принадлежностей (ЗИП) за счёт уменьшения числа необоснованных замен.

Если отказ изделия не имеет экономических последствий, а стоимость восстановительных работ невелика, то экономически выгодно использовать модификацию стратегии ТОС - ТО с контролем уровня надёжности, когда каждое изделие РЭО используется по назначению до отказа. Главными препятствиями при внедрении стратегии ТОС, в ряде случаев, являются несовершенство и дороговизна диагностического оборудования.

1.7 Моделирование процессов ТО

Процесс ТЭ (технической эксплуатации)- это последовательная смена деградационных и управляющих воздействий, при этом на РЭО действует три процесса: деградационный (понижающий работоспособность РЭО), процесс поддержание работоспособности (ТО) и процесс восстановления работоспособности после отказа, называемый ремонтом.

Моделирование процессов ТО производят путём графического моделирования анализа и оптимизации этого процесса, путём составления алгоритмов процессов ТО (рисунок 1.6), а также алгоритмов диагностирования и поиска места неисправности в РЭО.

Определение последовательности проведения работ ТО, их продолжительности и взаимосвязей между ними решается, как правило, путем разработки **линейных (ленточных) или сетевых графиков** проведения того или иного вида ТО. Простейшей формой графического представления последовательности и продолжительности работ при проведении ТО являются линейные (ленточные) графики. На этих графиках по оси абсцисс откладывается последовательность и продолжительность работ, а на оси ординат указывается содержание работ или перечень операций. Взаимосвязь отдельных работ показывается пунктирными линиями. На линейном графике (рисунок 1.6, а) работы изображаются в виде лент, площади которых пропорциональны трудозатратам на выполнение этих работ (ширина ленты соответствует напряженности работы). Если просуммировать ординаты, то получим ступенчатый график (рисунок 1.6, б), характеризующий степень равномерности всех работ ТО. Если на диаграмме напряженности будут большие выбросы на отдельных участках, то это свидетельствует о неудачном планировании работ по ТО. В этом случае необходимо разработать новый ленточный график с более равномерным распределением трудозатрат за счет перераспределения сил и средств и рациональной организации работ. Для облегчения процесса контроля хода, полноты и качества выполняемых работ на ленточных графиках стрелками отмечаются события, соответствующие окончанию определенного этапа работ (контрольный осмотр закончен, автономные проверки произведены и т. д.). В основе сетевого планирования лежит сетевой график; его разработка базируется на теории гра-

фов, теории вероятностей и математической статистике. Графическая модель представляет собой сочетание событий и работы, события обозначают кружками, а работу прямыми линиями со стрелками.

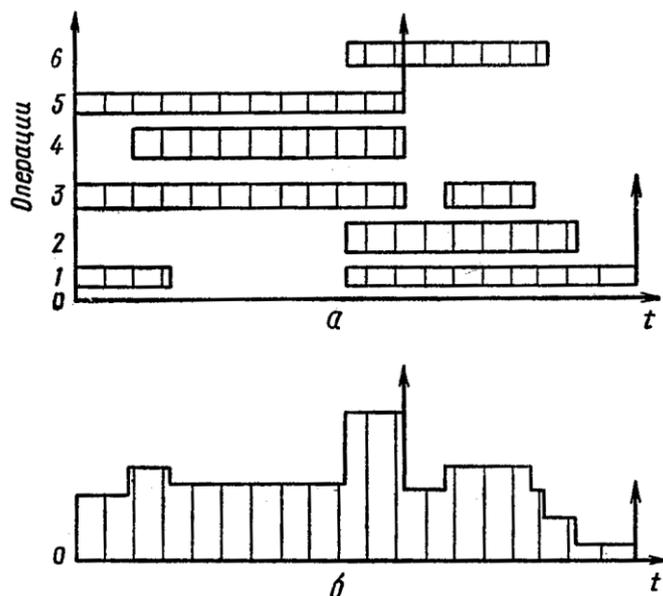


Рисунок 1.6 - Формы представления работ при ГО:
а —линейный график; б —диаграмма напряженности работ

Основные требования к сетевому графику (рисунок 1.7):

не должно быть тупиков (событие 7);

не должно быть хвостов (событие 8);

не должно быть замкнутых контуров, то есть возврата к наступившим событиям;

не должно быть двух последовательных событий связанных двумя работами (1 и 2);

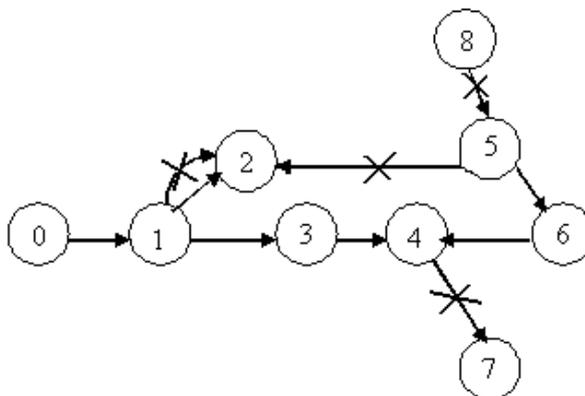


Рисунок 1.7 – Иллюстрация требований к сетевому графику

должна быть выполнена нумерация событий.

Составление алгоритма поиска места неисправности при ТО и ремонте осуществляется наиболее просто для линейных схем при использовании метода половинного деления. В схеме отказавшего РЭО (рисунок 1.8) ищется средняя точка (средний блок) с учётом или без учёта вероятности отказа, производится проверка выходного параметра в этой точке, после чего в зависимости от результата проверяют правую или левую часть схемы. На этом рисунке цифра «1» означают, что сигнал на выходе блока соответствует требованиям эксплуатационной документации, а цифра «0» означают, что сигнал на выходе блока не соответствует этой документации. Существуют и другие методы составления алгоритма поиска места неисправности при ТО и ремонте: метод ветвей и границ, информационный метод, использующий функциональные диагностические модели и т. д.

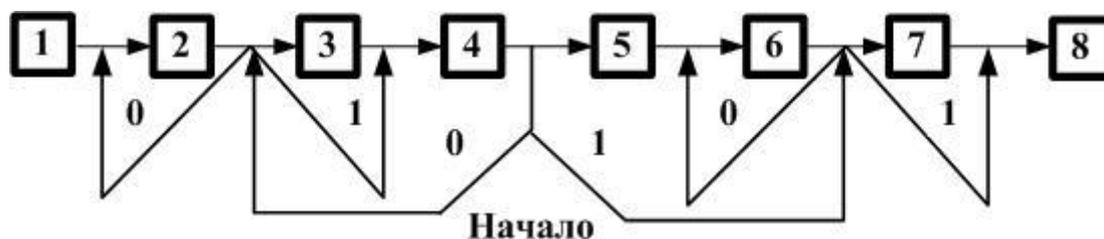


Рисунок 1.8 - Метод половинного деления

Для моделирования процессов ТО широко используют теорию массового обслуживания (ТМО), которая изучает статистические характеристики систем массового обслуживания (СМО). СМО – это совокупность однородных обслуживающих устройств (приборов, мастерских, линий связи, ремонтников, обслуживающего персонала и т. д.), называемых каналами обслуживания. Однородность каналов заключается в их способности обслужить (удовлетворить) заявку с одинаковыми среднестатистическими временными характеристиками. Термин «массовый» предполагает многократную повторяемость ситуаций (много заявок, длительное функционирование системы и т.п.). Заявки поступают в СМО в случайные моменты времени. Длительность обслуживания и промежутки между обслуживаниями являются также случайными величинами. По этой причине ТМО является разделом теории вероятностей и все расчёты по отношению к конкретным единичным событиям носят вероятностный характер. Преобразуя случайные величины с помощью формул ТМО, получают вполне определенные неслучайные значения параметров управления (например, необходимое число каналов обслуживания, обеспечивающих заданную вероятность исправного состояния). Примерами СМО могут служить сборочные цеха, ремонтные мастерские, станции технического обслуживания, инженерно-авиационная служба, восстанавливаемая резервированная аппаратура и т. д. Основные задачи ТМО заключаются в определении пропускной способности и статических характе-

ристик СМО. Пропускная способность СМО определяется числом обслуженных заявок в единицу времени.

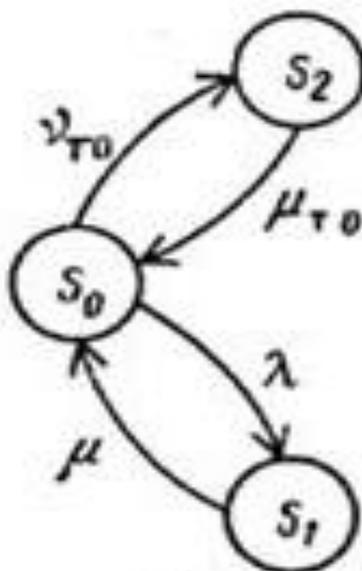


Рисунок 1.9 - Ориентированный граф изменения состояний восстанавливаемого РЭО с ТО

СМО подразделяются на три типа: с отказами, с ожиданием и смешанного типа. В СМО с отказами заявки обслуживаются немедленно, если каналы свободны, или получают отказ и теряются, если все каналы заняты. Пример такой СМО - телефонная сеть. В СМО с чистым ожиданием все заявки выстраиваются в очередь, если каналы заняты. В СМО смешанного типа имеются ограничения на время пребывания заявки в системе или на длину очереди. При невыполнении требуемого ограничения заявка покидает СМО необслуженной.

В качестве моделей СМО используют ориентированные графы изменения состояний (рисунок 1.9). На рисунке 1.9 введены обозначения: λ - интенсивность отказов; μ - интенсивность восстановления при ремонте; $\mu_{ТО}$ - интенсивность восстановления при ТО; $\nu_{ТО}$ - интенсивность проведения ТО; S_0 - состояние, в котором РЭО исправно, реализуемое с вероятностью P_0 ; $S_1(t)$ - состояние, в котором РЭО неисправно, реализуемое с вероятностью P_1 . S_2 - состояние, в котором РЭО проходит ТО, реализуемое с вероятностью P_2 .

По виду графа составляют дифференциальные уравнения для вероятностей состояний объекта, используя правило, А. Н. Колмогорова:

Производная по времени от вероятности $P_k(t)$ пребывания системы в любой момент времени t в состоянии k равна алгебраической сумме произведений интенсивностей переходов в k -ое состояние (или из k -го состояния) на вероятность того состояния, откуда совершается переход в k -е состояние. Причем, тем слагаемым, которым соответствуют уходящие стрелки из k -го

состояния приписывается знак “минус”, а входящим - “плюс”. Кроме того, используется нормировочное отношение $\sum_{k=0}^n P_k = 1$.

В итоге для нашего примера имеем дифференциальные уравнения для вероятностей состояний (**уравнения Эрланга**)

$$dP_0(t) / dt = - P_0(t) \cdot (\lambda + \nu_{\text{ТО}}) + P_1(t) \cdot \mu + P_2(t) \cdot \mu_{\text{ТО}}; \quad (1.3)$$

$$dP_1(t) / dt = \lambda \cdot P_0(t) - \mu \cdot P_1(t); \quad (1.4)$$

$$P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) = 1. \quad (1.5)$$

С учётом того, что в установившемся режиме P_k не зависит от времени t и $dP_k(t) / dt = 0$ последние выражения примут вид

$$0 = - P_0 \cdot (\lambda + \nu_{\text{ТО}}) + P_1 \cdot \mu + P_2 \cdot \mu_{\text{ТО}}; \quad (1.6)$$

$$0 = \lambda \cdot P_0 - \mu \cdot P_1; \quad (1.7)$$

$$P_0 + P_1 + P_2 = 1. \quad (1.8)$$

Из трёх последних уравнений получим выражение для коэффициента технического использования $K_{\text{ТИ}}$, равного вероятности исправного состояния P_0 при наличии ТО:

$$K_{\text{ТИ}} = P_0 = \mu / (\lambda + \mu + \lambda \cdot (\nu_{\text{ТО}} / \mu_{\text{ТО}})). \quad (1.9)$$

1.8 Хранение РЭО

РЭО не используемые по прямому назначению ставят на хранение. **Длительный срок хранения** характерен для РЭО однократного применения, а также для элементов и систем, находящихся в ЗИПе. **На кратковременное хранение** ставятся обычно РЭО многократного применения, использующиеся периодически.

Главной задачей хранения является поддержание работоспособности РЭО. Выполнение этой задачи зависит от условия хранения и от того, в каком состоянии РЭО было поставлено на хранение. РЭО, ставящееся на хранение должно быть исправно и полностью укомплектованным (кроме РЭО отправляемого в ремонт). Вся эксплуатационная документация должна быть соответствующим образом оформлена.

Кратковременное хранение РЭО как правило организуется на месте его размещения: в аппаратных помещениях, либо в кабинах с транспортируемым РЭО, а в полевых условиях в палатках или под навесами. При длительном хранении РЭО обычно находится в специально оборудованных складских помещениях и зачастую перед постановкой на хранение подвергается консервации. Консервацию применяют в случаях, когда условия хранения далеки от оптимальных (при хранении в полевых условиях, на открытых площадках или не в специально оборудованных местах). Консервацию РЭО производят двумя способами: нанесением защитных покрытий и герметизацией.

Защитные покрытия обеспечивают защиту металлических частей узлов и деталей РЭО от вредного воздействия влаги. В качестве покрытий используют консистентные и жидкие смазки, ингибиторы и органические пленки. **Консистентные смазки** (от латинского *consisto* – застываю, густею) – это высоковязкие мази, получаемые путём загущения минеральных или синтетических масел мылами, твёрдыми углеводородами, органическими пигментами и т. д. Консистентные смазки отличаются высокой температурой каплепадения, прилипаемостью к поверхности трения и высокой временной стабильностью свойств. Наиболее распространены солидол, консталин, графитная и другие консистентные смазки. **Ингибиторы** (от латинского *inhibeo* – задерживаю) – это вещества, тормозящие процессы (окисления, полимеризации или другие процессы). Они могут использоваться в качестве присадок к смазочным маслам. В качестве ингибиторов – антиокислителей (ингибиторов коррозии) применяют фенолы, ароматические амины, соли фосфорной кислоты (H_3PO_4) и др. **Амины** – это органические соединения, являющиеся продуктами замещения одного, двух или трёх атомов водорода в аммиаке (NH_3) органическими свободными радикалами R . **Свободные радикалы** – это частицы, образуемые при отщеплении атомов или атомных групп от молекул химических соединений, главным образом органических. Радикалы очень активны из-за наличия неспаренных электронов, то есть свободных валентностей. **Фенолы** – это класс органических соединений ароматического ряда, содержащих одну или несколько гидроксильных групп ($-OH$), связанных с атомами углерода ароматического кольца. Простейший представитель фенолов – карболовая кислота C_6H_5OH или оксибензол.

Консистентные смазки применяются для наружного покрытия металлов, при долговременном хранении РЭО на открытых площадках. Наиболее часто используются жидкие смазки с ингибиторами, которые, адсорбируясь на поверхности металла, защищают его от коррозии. Ингибиторы иногда вводят в состав упаковочных бумаг. При хранении РЭО в герметизированных объёмах применяют летучие ингибиторы, действующие на расстоянии 0,2-0,5 м. При этом в герметизированных объёмах используют бумагу или картон, пропитанные раствором ингибитора. Органические плёнки получают путем нанесения на изделие хлорвиниловой эмали с 10 % маршалита (молотого песка). Эти плёнки, защищают металла от коррозии, термо- и морозоустойчивы, не воспламеняются при коротких замыканиях, не растворяются в бензине, керосине, маслах и кислотах. Она легко снимается с изделий, но не отслаивается при вибрации. Применяют и двухслойные покрытия на основе синтетических смол.

Консервация основана на изоляции аппаратуры от внешней среды путем помещения ее в герметизированный объем или упаковку, в которых с помощью влагопоглотителя поддерживается низкая влажность. В качестве влагопоглотителя используют силикагель – микропористое тело, получаемое прокаливанием геля поликремниевой кислоты. Силикагель (SiO_2) с массой 100 г способен поглотить (абсорбировать) до 30 г водяных паров.

Для герметизации аппаратуры используют также метод зачехления (для консервации переносной аппаратуры) и метод заклейки (для консервации аппаратуры в кузовах прицепов или спецавтомобилей). Герметизирующие чехлы изготавливают из полиэтиленовой или из полихлорвиниловой плёнки. При использовании метода заклейки замазывают и заклеивают все щели и отверстия. Внутри герметизированного объема при зачехлении и при заклейке также используют силикагель.

Наилучшими условиями хранения РЭО являются:

постоянная положительная температура воздуха близкая к 0 °С, (от +2 до +5 °С);

низкая относительная влажность воздуха 10-30%;

отсутствие в воздухе вредных примесей в виде пыли, паров солей, кислот, щелочей, хлоридов, серы и ее соединений;

отсутствие циркуляции воздуха;

отсутствие прямых солнечных лучей;

защищенность аппаратуры от воздействия электромагнитного и радиационного излучения;

отсутствие насекомых и грызунов.

При хранении должен осуществляться контроль температуры и влажности воздуха и контроль состояния РЭО.

1.9 Программы и методики проведения испытания при эксплуатации РЭО

Основным организационно-методическим документом при испытании РЭО является **программа испытаний (ПИ)**.

ПИ - это обязательный для исполнения организационно-методический документ, который устанавливает объект и цели испытаний, виды, последовательность и объем проводимых экспериментов, порядок, условия, место и сроки проведения испытаний, обеспечение и отчетность по ним, а также ответственность за обеспечение и проведение испытаний (И).

ПИ содержит шесть разделов.

Раздел первый «Объект испытаний» является обязательным в ПИ. Этот раздел включает краткую информацию об объекте испытаний (ОИ), особенности конструкции и технологии изготовления ОИ, номер ТУ и паспорта для заводских изделий, дату выпуска. Указываются: тактико-технические характеристики ОИ, подлежащие измерению и определению по измеряемым значениям других параметров; критерии годности и надёжности ОИ, требования к внешнему виду, к электрическим и другим параметрам. Главным признаком ОИ по ГОСТ 16504-81 является то, что по результатам его И принимается то или иное решение: о годности ОИ или его браковке, о возможности серийного выпуска и т. д.

Во втором разделе **«Цель испытаний»** ставится конкретная цель или цели И. **Цель испытаний (ЦИ)** должна отражаться в наименовании И. Цели

контрольных, сравнительных и определительных И определены в стандартах: ГОСТ 16504-81, ГОСТ 24812-81 и ГОСТ 24813-81. Например, *контрольные предварительные И* имеют ЦИ – определение возможности предъявления на приёмочные И, а *контрольные приёмочные И* имеют ЦИ – решение вопроса о постановке продукции на производство, в систему или об использовании по назначению. Следует установить уровень проведения И (*государственные, межведомственные, ведомственные*), а затем установить отношение И либо к этапам разработки изделия (*доводочные, предварительные, приёмочные*), либо к видам И готовых изделий (*квалификационные, предъявительские, приёмосдаточные, периодические, инспекционные, типовые, аттестационные, сертификационные*). В наименовании И учитывают условия и место проведения И (*лабораторные, стендовые, полигонные, натурные, И. с использованием моделей, эксплуатационные*). В наименовании учитывают также другие признаки И: продолжительность И (*нормальные, ускоренные, сокращённые*); вид воздействия (*механические, климатические, тепловые, радиационные, химические, биологические*); результат воздействия (*неразрушающие, разрушающие, И на прочность, стойкость, устойчивость*); Направленность И (*функциональные И, И на надёжность, И на транспортабельность, граничные И, технологические И*). Наименование И может содержать и несколько из перечисленных признаков, например: *ведомственные эксплуатационные И на транспортабельность*.

В третьем разделе «**Обоснование необходимости проведения испытаний**» указываются плановые документы, в которых регламентирована необходимость проведения И.

Четвертый раздел «**Объем и место проведения испытаний**» указывает подразделение, в котором проводятся И, а также содержит план работ по подготовке проведения И с графами, указывающими исполнителей работ, объем работ по их видам и продолжительности, срок исполнения.

В пятом разделе «**Методика испытаний**» раскрывается содержание И. **Методика испытаний** (МИ) иногда может быть самостоятельным организационно-методическим документом обязательным для исполнения. В нем формулируют метод испытаний, средства и условия испытаний, отбор проб, алгоритмы выполнения операций по определению одной из нескольких взаимосвязанных характеристик свойств объекта, формы представления данных и оценивают точности, достоверности результатов, требования техники безопасности и охраны окружающей среды при проведении испытаний.

Основные требования, предъявляемые к МИ: требования по выбору метода И, по обеспечению максимальной эффективности процесса И и по обеспечению минимально возможной погрешность полученных результатов.

Метод испытания – это совокупность правил применения определенных принципов и средств для осуществления И. Он должен обеспечить выполнение задачи проверки изделий на соответствие требованиям документации. При выборе метода учитывают конструктивно –

технологические особенности изделия, нормы контролируемых параметров и требуемую точность их измерения, требования техники безопасности при проведении И.

МИ должна содержать описание следующих этапов: проверка испытательного оборудования; подготовка испытываемых изделий; совместная проверка испытательного оборудования и испытываемого изделия; регистрация результатов испытаний и данных об условиях их проведения.

В шестом разделе «Оценка и оформление результатов испытания» регламентируется форма представления результатов проведенных испытаний, протоколов, отчетов, техническая справка, сводная ведомость.

По результатам И составляется сводная ведомость неисправностей (отказов). По результатам анализа причин отказов и неисправностей, зафиксированных при испытаниях, разрабатываются, и осуществляются мероприятия по их устранению. При неудовлетворительных результатах И после проведенных мероприятий И повторяют на образцах, изготовленных с учетом разработанных мероприятий. По результатам И составляются отчет, протокол И или техническая справка. В отчете по испытаниям РЭО приводят сведения об объекте, цели, месте и времени испытаний, материально - техническом обеспечении, условиях и результатах И и даются выводы и рекомендации по результатам И.

Регистрация результатов И обеспечивается формой записи данных, подробным описанием регулировок, схемами расположения приборов. Форма записи данных должна быть достаточно подробной и гарантировать регистрацию всех входных и выходных данных с указанием единиц измерения, приведенных к единой системе.

1.10 Граничные испытания для оценки параметрической надежности

Метод граничных испытаний состоит в нахождении области таких значений параметров РЭО, при которых значения выходных (вторичных или эксплуатационных) параметров находятся в пределах допуска, т.е. области безотказной работы РЭО. Каждый выходной параметр Y_i (а их может быть счетное множество y) зависит от множества входных параметров $X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_n$, т.е. для каждого выходного параметра можно записать

$$Y_i = f_i(X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_n), \quad (1.10)$$

где $Y_i \in y, \quad i = 1, \dots, k, \quad j = 1, \dots, n$.

Для безотказной работы РЭО должно выполняться условие

$$y_{\min} \leq Y_i \leq y_{\max}, \quad (1.11)$$

что соответствует изменению значения каждого входного параметра в пределах $x_{j \min} \leq x_j \leq x_{j \max}$.

Область безотказной работы РЭО определяется путем изменения значений входных параметров и фиксации предельных значений выходных параметров, превышение которых приводит к отказам РЭО. Граничные испытания выполняют аналитическим, графическим или графоаналитическим способами. Аналитический способ применяют для испытания изделий, имеющих простую математическую модель. Границы области безотказной работы определяют расчетным путем с помощью уравнения (1.10), которое упрощают: $Y_i = f(X_j)$. Графический способ используют для сложных изделий. Границы области безотказной работы определяют экспериментально путем построения сечения функции (1.11) для каждого входного параметра X . Построение сечения функции выполняют следующим образом. Выбирают один или несколько критериев отказа. Один из параметров РЭО принимают за параметр граничных испытаний $X_{гр}$. Устанавливают номинальные значения входного параметра X_j , по которому производится сечение функции (1.10), и параметра $X_{гр}$. Значения остальных входных параметров сохраняют номинальными. Изменяют значение $X_{гр}$ в меньшую и большую сторону от номинального значения до момента отказа РЭО - ухода значения выходного параметра Y_i (за границы поля допуска, определяемые неравенством (1.11)). Аналогичные испытания осуществляют для других значений X_j . В результате получают несколько точек, соответствующих предельным значениям выходного параметра Y_i . Соединив эти точки, устанавливают область безотказной работы РЭО. Пример построения области безотказной работы (графика граничных испытаний) РЭО приведен на рисунке Рисунок 1.10, а.

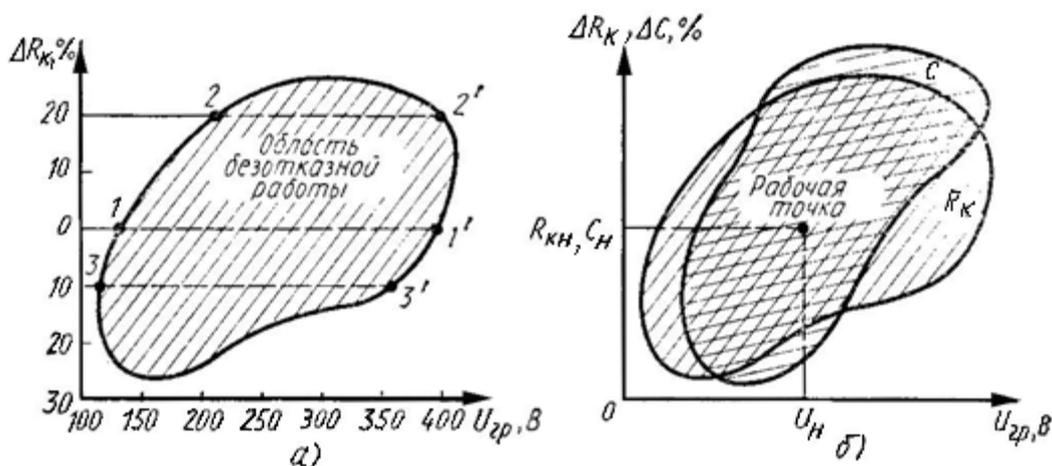


Рисунок 1.10 - Построение области безотказной работы при изменении значений одного (а) и двух (б) входных параметров: $R_{кн}$, $C_{н}$ и $U_{н}$ - номинальные значения параметров

В качестве параметра граничных испытаний выбрано напряжение питания $U_{гр}$, а в качестве изменяемого входного параметра - сопротивление $R_{к}$ в коллекторной цепи RC -усилителя. Точки 1 и 1', 2 и 2', 3 и 3', соответствующие

предельным значениям выходного параметра, получены при изменении напряжения $U_{ГР}$ в меньшую (1, 2, 3) и в большую (1', 2', 3') сторону от номинального значения при определенных значениях сопротивления R_k . Кривая линия, соединяющая подобные точки, является границей области безотказной работы РЭО. Аналогично проводят построение сечения функции (1.10) по другому параметру - X_i (например, ёмкости C RC- усилителя. Для всех входных параметров строят ряд графиков, наложив которые друг на друга, можно получить область безотказной работы. Изменение входных параметров производят в пределах, значительно превышающих заданные ТУ, с целью определения запаса параметрической надежности РЭО. На рисунке 1.10, б в качестве примера показано построение области безотказной работы для двух входных параметров (R_k и C).

Граничные испытания применяются для определения зависимости между предельно допустимыми значениями параметров РЭО и режимом эксплуатации с целью: правильного подбора параметров элементов и питающих напряжений; выбора оптимальных вариантов схем и режима работы РЭО; предсказания места и времени появления постепенного отказа; определения «запаса» надёжности РЭО - по площади областей безотказной работы и положению рабочей точки (чем больше площадь области и чем дальше отстоит от её границ рабочая точка, тем больше запас надёжности). К недостаткам метода граничных испытаний относятся невозможность количественной оценки надёжности и большая трудоемкость проведения экспериментов. Уменьшение трудоемкости граничных испытаний можно достичь благодаря использованию компьютерной системы схемотехнического моделирования MicroCap.

1.11 Испытания на климатические воздействия, возникающие при эксплуатации РЭО

Климатические испытания поводят для проверки работоспособности и (или) сохранения внешнего вида изделий, в пределах, установленных в НТД (нормативно-техническая документация), в условиях и (или) после воздействия климатических воздействий. Режимы этих испытаний зависят от вида аппаратуры (стационарной, возимой, морской, самолётной, космической), определяющего, в соответствии со стандартами, степень жёсткости испытаний. По степени жёсткости испытаний из стандарта ГОСТ 16962 -71* находят численные значения параметров, характеризующих климатические воздействия. Климатические испытания подразделяют на виды:

- на воздействие повышенной температуры;
- на воздействие пониженной температуры;
- на изменение температур;
- на влагоустойчивость;
- на воздействие инея и росы;

на воздействия солнечного излучения;
 на воздействие песка и пыли;
 на воздействие атмосферного давления;
 на воздействие повышенного гидростатического давления;
 на герметичность (водонепроницаемость) ;
 на воздействие атмосферы содержащей агрессивные среды (на воздействии соляного тумана);
 на ветроустойчивость;
 на коррозионно-активное воздействие;
 на биологические воздействия.

Особые виды климатических испытаний – это **специальные космические испытания**, которые обычно являются комбинированными и дорогостоящими. К этим испытаниям относятся:

испытания теплового режима в вакууме в условиях невесомости;
 испытания на воздействие микрометеоров с моделированием потоков твёрдых частиц с использованием ускорителей, работающих на сжатых газах, источников взрывных ускорителей, в которых используют кумулятивные заряды (заряды, обеспечивающие действие взрыва в одном направлении), плазменных, лазерных и электростатических ускорителей;

испытания на воздействие на поверхность материалов солнечного ветра и потоков плазмы электроносферы и протононосферы Земли с использованием плазменных ускорителей, ускорителей заряженных частиц и высокочастотного разряда;

испытания на воздействие корпускулярного излучения с одновременным облучением поверхностей материалов с площадью до 100 см^2 электронами и положительными ионами.

Принята следующая последовательность климатических испытаний:
 предварительная выдержка изделий (стабилизация их свойств) и первоначальные измерения параметров и внешний осмотр;
 установка изделий в камере и выдержка их в условиях режима испытаний;

извлечение изделий из камер и выдержка для восстановления свойств;
 внешний осмотр и заключительные измерения параметров изделия.

Предварительную выдержку (обычно не более двух часов) проводят с целью полного или частичного устранения воздействий на изделие предыдущих условий эксплуатации. Изделия выдерживают в нормальных климатических условиях: температуре $25 \pm 10^\circ\text{C}$, относительной влажности 45-75% и атмосферном давлении $86-106 \text{ кПа}$. Первоначальные и заключительные измерения параметров изделия проводятся в одинаковых условиях.

При установке изделий в камеру необходимо обеспечить свободную циркуляцию воздуха между изделиями и стенками камер. Если в процессе испытаний на изделие не подается электрическая нагрузка, то изделие можно располагать на сетках из капроновых нитей, натянутых на опоры. При испытаниях с электрической нагрузкой изделие устанавливается на приспособле-

ния с контактирующими устройствами; металлические части должны иметь антикоррозионные покрытия. Время выдержки отсчитывают с момента установки режимов камеры. За время выдержки изделие должно прогреться или охладиться по всему объему, но так, чтобы его температура отличалась не более чем на 3°C от температуры камеры. Контроль температуры по объему осуществляется с помощью: термопар, терморезисторов или полупроводниковых датчиков на *p-n* переходах. При испытаниях на температуру и влажность допускается погрешность $\pm 2^{\circ}\text{C}$, $\pm 3\%$ относительной влажности. Для различных видов климатических испытаний при невозможности измерения параметров изделия без извлечения изделия из испытательной камеры допускается кратковременное извлечение изделия из этой камеры, что должно быть указано в программе испытаний.

Для наибольшей информативности и эффективности испытаний целесообразно использовать климатические испытания последовательно, когда следующее испытание усиливает эффект предыдущего. Рекомендуется **нормализованная последовательность климатических испытаний**, последовательно включающая: испытание при повышенной температуре, испытание на влагоустойчивость, испытание на воздействие пониженной температуры, испытания на воздействия солнечного излучения, воздействие песка и пыли, испытание на воздействие атмосферы содержащей агрессивные среды, испытания на воздействие повышенного гидростатического давления, испытание на герметичность (водонепроницаемость), испытание на коррозионно-активное воздействие. Между любыми из испытаний допускается перерыв не более 3-х суток, за исключением интервала между испытанием на влагоустойчивость и воздействием пониженной температуры, который не должен превышать 2 часов.

1.12 Испытания на механические воздействия при эксплуатации РЭО

Испытания на механические воздействия позволяют выявить дефекты, определить динамические характеристики РЭО, проверить соответствие параметров РЭО при механических воздействиях требованиям ТУ. Эти испытания проводят в нормальных климатических условиях: температуре $25\pm 10^{\circ}\text{C}$, относительной влажности 45-75% и атмосферном давлении 86-106 *кПа*. Режимы этих испытаний зависят от вида аппаратуры (стационарной, возимой, морской, самолётной, космической), определяющего, в соответствии со стандартами, степень жёсткости испытаний. По степени жёсткости испытаний из стандарта ГОСТ 16962 -71* находят численные значения параметров, характеризующих механические воздействия (амплитуды, частоты и ускорения при вибрациях, длительности и ускорения при ударах и т.д.). Испытания обычно проводят в трёх взаимно перпендикулярных направлениях механического воздействия по отношению к изделию. В конце испытаний изделия осматривают и проверяют их параметры.

Применяются следующие шесть видов **испытаний на механические воздействия**:

1. Испытания на обнаружение резонансных частот конструкции и проверку их отсутствия в заданном диапазоне частот проводят на вибростендах с целью проверки механических свойств изделий и получения информации, необходимой для выбора методов других видов механических испытаний. Механические резонансы определяют по резкому увеличению амплитуды колебания конструкции или её отдельных элементов визуально при помощи микроскопа, при помощи телевизионных устройств и датчиков. Эти испытания проводят в диапазоне частот $0,2 \cdot f_p - 1,5 \cdot f_p$, но не выше 20 кГц, где f_p – резонансная частота, полученная на основании расчёта или испытания аналогичной конструкции. Поиск резонансных частот проводят путём плавного изменения частоты механических вибраций вибростенда при поддержании постоянной амплитуды вибраций. Амплитуду ускорений выбирают из диапазона $10 - 50 \text{ м/с}^2$, а амплитуду перемещений $1 - 1,5 \text{ мм}$. Если в программе испытаний задана степень жёсткости испытаний, то испытания проводят в диапазоне частот $10 \text{ Гц} - 1,1 \cdot f_s$, где $f_s = 25 \text{ Гц}$ для степени жёсткости I, 40 Гц для степени жёсткости II и 100 Гц для степени жёсткости III.

2. Испытания на виброустойчивость и на вибропрочность проводят на вибростендах. **Испытания на виброустойчивость** проводят с целью проверки способности изделия выполнять свои функции и сохранять свои параметры, в условиях вибрации, в заданном диапазоне частот и ускорений. Эти испытания проводят под электрической нагрузкой с контролем параметров изделий во время испытаний двумя методами: **при воздействии синусоидальной и при воздействии широкополосной случайной вибрации**. Последний из указанных методов применяют при наличии у изделия в заданном диапазоне частот не менее четырёх механических резонансов. **Испытания на вибропрочность** проводят с целью проверки способности изделия противостоять разрушающему действию вибрации и сохранять свои параметры после ее воздействия. Эти испытания проводят без электрической нагрузки одним из трёх методов: **метода качающейся частоты, метода широкополосной случайной вибрации или метода фиксированных частот** (по согласованию с заказчиком, если невозможно применить другие методы).

3. Испытания на ударную прочность и ударную устойчивость. При испытаниях на воздействия многократных ударов применяют механические ударные установки с ускорением $150 - 1000 \cdot g$ и с грузоподъёмностью $5 - 500 \text{ кг}$ и электродинамические ударные установки с ускорением $200 - 6000 \cdot g$ и с грузоподъёмностью $1 - 20 \text{ кг}$. Число ударов в этих установках изменяется в диапазоне $5 - 120 \text{ уд/мин}$, а их длительность $0,1 - 40 \text{ мс}$. **Испытания на ударную прочность** проводят без электрической нагрузки с целью проверки способности изделия противостоять разрушающему действию ударных нагрузок и сохранять свои параметры после их воздействия. **Испытания на ударную устойчивость** проводят под электрической нагрузкой с целью про-

верки способности изделия выполнять свои функции в условиях воздействия ударных нагрузок.

4. Испытания на воздействие одиночных ударов проводят с целью проверки способности изделия противостоять разрушающему действию одиночных ударов и сохранять свои параметры после их воздействия, а также (если это указано в ТУ) выполнять свои функции в условиях воздействия одиночных ударов. При испытаниях на воздействия однократных ударов применяют ударные установки с использованием падения с ускорением $1000 - 30000 \cdot g$ и грузоподъёмностью $0,1 - 20 \text{ кг}$ и пневматические ударные установки с ускорением $3000 \cdot g$ и грузоподъёмностью $2 - 5 \text{ кг}$.

5. Испытания на воздействие линейного ускорения проводят с целью проверки способности изделия противостоять разрушающему действию линейного ускорения. Испытания проводят в центрифугах. Степени жёсткости испытаний в процессе эксплуатации изделий задают от I до XI, что соответствует линейным ускорениям $10 - 20000 \cdot g$. Продолжительность испытаний более трёх минут в каждом направлении вращения стола центрифуги.

6. Испытания на воздействие акустических шумов. Проводят под электрической нагрузкой с целью проверки способности изделий противостоять разрушающему действию акустического шума и выполнять свои функции, сохраняя параметры в пределах норм. Испытания ведут при воздействии на изделие равномерного звукового давления в спектре частот $125 - 10000 \text{ Гц}$. Величина звукового давления меняется в зависимости от степени жесткости испытаний (130 дБ для степени жесткости I и 170 дБ для степени жесткости V). Способы крепления аппаратуры для проведения механических испытаний должны быть такие же, как и при ее эксплуатации. Наибольшее влияние на РЭО, как правило, оказывает сочетание вибрации и одиночных ударов, поэтому испытания на эти виды воздействий проводят в первую очередь.

2 РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЯХ

2.1 Расчет периодичности и продолжительности профилактических работ

2.1.1 Основные соотношения между периодом профилактических работ и средней продолжительностью технического обслуживания

При сокращении промежутка времени между очередными техническими обслуживаниями РЭО повышается его надёжность за счет своевременного проведения контрольно-регулирующих работ. При этом увеличивается общее время профилактики в течение года и соответственно уменьшается продолжительность работы оборудования за этот отрезок времени по прямому назначению. Оптимальным периодом проведения профилактических работ можно считать период $\tau_{ТО}$ между профилактиками, при котором величина коэффициента простоя $K_{П}$ принимает наименьшее значение. Величину коэффициента простоя находим из выражения:

$$K_{П} = \frac{T_{П}}{T_{П} + T_{ОП}}, \quad (2.1)$$

где $T_{ОП}$ – среднее время нахождения объекта в работоспособном состоянии между двумя соседними по времени профилактиками;

$$T_{П} = \tau_{ТО} + T_{ТО} - T_{ОП} \quad (2.2)$$

– среднее время нахождения объекта в неработоспособном состоянии; $T_{ТО}$ – средняя продолжительность профилактики (технического обслуживания).

Как показано в [2] при $T_{П} \approx T_{ТО}$ оптимальный период проведения профилактических работ можно рассчитывать по формуле:

$$\tau_{ТО} = \sqrt{\frac{2T_{ТО}}{\lambda_{П}}}, \quad (2.3)$$

где $\lambda_{П}$ – интенсивность отказов при проведении профилактик.

Для случая экспоненциального распределения отказов:

$$\tau_{ТО} = \sqrt{2T_{ТО}T_{ОП}}, \quad (2.4)$$

где $T_{ОП}$ – наработка объекта между двумя соседними по времени профилактиками.

Для аппаратуры, которая часть времени работает, имея при этом интенсивность отказов $\lambda_{Р}$, а другую часть времени хранится в выключенном состоянии, имея интенсивность отказов $\lambda_{ХР}$, величину $\lambda_{П}$ находят из выражения:

$$\lambda_{П} = K_{И}\lambda_{Р} + (1 - K_{И})\lambda_{ХР}, \quad (2.5)$$

где $K_{И}$ – коэффициент эффективности эксплуатации, равный вероятности нахождения аппаратуры во включенном состоянии в произвольный момент времени:

$$K_{И} = \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{t_k}, \quad (2.6)$$

где t_i – время работы аппаратуры при i -ом включении; n – число её включений за календарное время t_k .

Таким образом, при $K_{И} < 1$ выражение (2.3) для определения оптимального периода проведения профилактических работ примет с учетом (2.5) вид:

$$\tau_{ТО} = \sqrt{\frac{2T_{ТО}}{K_{И}\lambda_{Р} + (1 - K_{И})\lambda_{ХР}}}. \quad (2.7)$$

Обычно величиной $\lambda_{ХР} = (10^{-3} \dots 10^{-2})\lambda_{Р}$, пренебрегают по сравнению с $\lambda_{Р}$. В этом случае выражение (2.7) упрощается:

$$\tau_{ТО} = \sqrt{\frac{2T_{ТО}}{K_{И}\lambda_{Р}}}. \quad (2.8)$$

Использование в аппаратуре современных интегральных микросхем и цифровой обработки информации повышает её надёжность и стабильность. Для этой аппаратуры оптимальный период проведения профилактических работ $\tau_{ТОС}$ как показывает опыт, оказывается большим, чем такой же период $\tau_{ТО}$ аппаратуры в обычном исполнении:

$$\tau_{ТОС} = K_{СТ}\tau_{ТО}, \quad (2.9)$$

где $K_{СТ} \geq 1$ – поправочный коэффициент для учета стабильности параметров аппаратуры, определяемый по результатам эксплуатации или специальных испытаний для каждого типа аппаратуры.

Для аппаратуры одноразового действия профилактика проводится во время хранения, величина коэффициента эффективности эксплуатации $K_{И}$ близка к нулю и формула (2.7) для вычисления $\tau_{ТО}$ упрощается:

$$\tau_{ТО} = \sqrt{\frac{2T_{ТО}}{\lambda_{ХР}}}. \quad (2.10)$$

Средняя продолжительность ТО определяется из выражения:

$$T_{ТО} = \sum_{i=1}^m T_{ТОi}, \quad (2.11)$$

где $T_{ТОi}$ – среднее время i -ой операции; m – число операций при одной профилактике.

Отсутствие простоя характеризуют с помощью коэффициента готовности, равного вероятности того, что объект окажется работоспособным в произвольный момент времени, кроме периодов плановых ремонтов, плановых ТО и других плановых мероприятий, прерывающих эксплуатацию объекта по назначению.

Коэффициент готовности при проведении профилактики:

$$K_{\text{ГП}} = \frac{T_{\text{ОП}}}{T_{\text{ОП}} + T_{\text{П}}}. \quad (2.12)$$

Часто в задачах принимают, что среднее время нахождения объекта в неработоспособном состоянии $T_{\text{П}}$ равно среднему времени ТО ($T_{\text{П}} \approx T_{\text{ТО}}$) или что оно равно среднему времени ремонта ($T_{\text{П}} \approx T_{\text{Р}}$).

Коэффициент готовности при отсутствии профилактики:

$$K_{\text{Г}} = \frac{T_{\text{О}}}{T_{\text{О}} + T_{\text{Р}}}, \quad (2.13)$$

где $T_{\text{О}}$ – среднее время нахождения объекта в работоспособном состоянии при отсутствии профилактических работ.

Безотказность транспортного радиоэлектронного оборудования, относящегося к восстанавливаемым изделиям многократного циклического применения, характеризуют коэффициентом оперативной готовности $K_{\text{ОГ}}(t)$, равным вероятности того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени $t_{\text{р}}$. При экспоненциальном законе вероятности безотказной работы:

$$K_{\text{ОГ}} t = K_{\text{Г}} e^{-\lambda_{\text{р}} t}. \quad (2.14)$$

Коэффициент готовности характеризует готовность объекта к применению по назначению только в отношении его работоспособности в произвольный момент времени. Коэффициент же оперативной готовности характеризует надёжность объекта, необходимость применения которого возникает в произвольный момент времени, после которого требуется безотказная работа в течение заданного интервала времени.

Коэффициент оперативной готовности при проведении профилактики

$$K_{\text{ОГП}} = K_{\text{ГП}} e^{-\lambda_{\text{рп}} t}, \quad (2.15)$$

где $\lambda_{\text{рп}}$ – интенсивность отказов при наличии профилактических работ.

2.1.2 Примеры расчета периодичности и продолжительности профилактических работ

Пример 2.1. Передатчик работает в субботу и воскресенье по 4 ч в сутки, а в остальные дни – по 6 ч в сутки. Длительность профилактических работ по отдельным узлам передатчика в среднем составляют: по антенно-фидерному тракту – 1.5 ч, по остальным высокочастотным узлам – 2.5 ч, по блоку питания – 1 ч. Интенсивность отказов передатчика при проведении профилактических работ $\lambda_{\text{р}} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$. Определить оптимальный период профилактических работ. Отказами в выключенном состоянии пренебречь.

Решение:

а) с помощью выражения (2.6) вычислим коэффициент эффективности эксплуатации:

$$K_{И} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{\sum_{k=1}^N t_k} = \frac{4+4+6+6+6+6+6}{7 \cdot 24} = 0.226;$$

б) с помощью выражения (2.11) находим среднюю продолжительность ТО:

$$T_{ТО} = \sum_{i=1}^m T_{ТОi} = 1.5 + 2.5 + 1 = 5 \text{ ч};$$

в) по формуле (2.8) определим оптимальный период профилактических работ:

$$\tau_{ТО} = \sqrt{\frac{2T_{ТО}}{K_{И}\lambda_{р}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 5}{0.226 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}} = 148.7 \text{ ч}.$$

Ответ: оптимальный период профилактических работ $\tau_{ТО} = 148.7$ ч.

Пример 2.2. Нарботка на отказ бортового радиолокатора при экспоненциальном законе надежности и без проведения профилактических работ составила $T_0 = 300$ ч. При проведении профилактических работ длительностью $T_{ТО} = 5$ ч наработка на отказ составила 900 ч. Среднее время ремонта $T_{р} = 6$ ч. Коэффициент интенсивности эксплуатации $K_{И} = 0.25$. Интенсивность отказов в выключенном состоянии $\lambda_{ХР} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$. Определить оптимальный период проведения профилактических работ, а также коэффициент готовности и коэффициент оперативной готовности для $t = 2$ ч без профилактики и при проведении профилактики.

Решение:

а) экспоненциальное распределение применяется не только к неремонтируемым объектам, но и к ремонтируемым объектам с простейшими потоками отказов; с учетом этого находим интенсивность отказов радиолокатора без проведения профилактических работ:

$$\lambda_{р} = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{300} = 3.33 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$$

и при проведении профилактических работ:

$$\lambda_{рп} = \frac{1}{T_{оп}} = \frac{1}{900} = 1.11 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1};$$

б) находим оптимальный период проведения профилактических работ по формуле (2.7):

$$\tau_{ТО} = \sqrt{\frac{2T_{ТО}}{K_{И}\lambda_{рп} + (1 - K_{И})\lambda_{ХР}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 5}{0.25 \cdot 1.11 \cdot 10^{-3} + 0.75 \cdot 2 \cdot 10^{-6}}} = 189.3 \text{ ч};$$

в) находим коэффициенты готовности, равные вероятности того, что объект окажется работоспособным в произвольный момент времени, кроме периодов плановых ремонтов, плановых ТО и других плановых мероприятий, прерывающих эксплуатацию объекта по назначению:

1) коэффициент готовности без проведения профилактики:

$$K_{\Gamma} = \frac{T_o}{T_o + T_p} = \frac{300}{300 + 6} = 0.98;$$

2) коэффициент готовности при проведении профилактики:

$$K_{\Gamma\Pi} = \frac{T_{\text{оп}}}{T_{\text{оп}} + T_p} = \frac{900}{900 + 6} = 0.993;$$

г) находим коэффициенты оперативной готовности, равные вероятности того, что объект окажется работоспособным в произвольный момент времени, и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени:

1) коэффициент оперативной готовности без проведения профилактики:

$$K_{\text{ог}} = K_{\Gamma} e^{-\lambda_p t} = 0.98 e^{-3.33 \cdot 10^{-3} \cdot 2} = 0.973;$$

2) коэффициент оперативной готовности при проведении профилактики:

$$K_{\text{ог}\Pi} = K_{\Gamma\Pi} e^{-\lambda_{\text{рп}} t} = 0.993 e^{-1.1 \cdot 10^{-3} \cdot 2} = 0.991.$$

Ответ: оптимальный период проведения профилактических работ $\tau_{\text{ТО}} = 189.3$ ч; коэффициенты готовности без проведения профилактики $K_{\Gamma} = 0.98$, а при проведении профилактики $K_{\Gamma\Pi} = 0.993$; коэффициенты оперативной готовности без проведения профилактики $K_{\text{ог}} = 0.973$, а при проведении профилактики $K_{\text{ог}\Pi} = 0.991$.

Пример 2.3. Для посадки на планеты с высокой температурой поверхности (больше 500°C) разработана специальная приёмно-передающая телевизионная система, которая незадолго до посадки охлаждается, затем работает на поверхности планеты менее получаса, после чего из-за сильного разогрева переходит в неработоспособное состояние. В системе используются современные высокостабильные интегральные схемы и цифровая обработка информации. Интенсивность отказов системы при охлаждении $\lambda_{\text{хр}} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$. Длительность профилактических работ по отдельным узлам системы в среднем составляют: по антенно-фидерному тракту – 2 ч, по приёмному тракту – 1.5 ч и по передающему тракту – 3 ч. По результатам испытаний получено численное значение поправочного коэффициента, учитывающего высокую стабильность параметров станции, $K_{\text{СТ}} = 1.5$. Определить оптимальный период проведения профилактических работ.

Решение:

а) находим среднюю продолжительность ТО:

$$T_{\text{ТО}} = \sum_{i=1}^m T_{\text{ТО}i} = 2 + 1.5 + 3 = 6.5 \text{ ч};$$

б) определяем оптимальный период проведения профилактических работ для аппаратуры одноразового действия:

$$\tau_{\text{ТО}} = \sqrt{\frac{2T_{\text{ТО}}}{\lambda_{\text{хр}}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 6.5}{3 \cdot 10^{-6}}} = 2082 \text{ ч};$$

в) определяем оптимальный период проведения профилактических работ с учётом поправочного коэффициента $K_{СТ}$:

$$\tau_{ТОС} = K_{СТ}\tau_{ТО} = 1.5 \cdot 2082 = 3123 \text{ ч.}$$

Ответ: оптимальный период проведения профилактических работ $\tau_{ТОС} = 3123 \text{ ч.}$

2.1.3 Задачи расчета периодичности и продолжительности профилактических работ

Задача 2.1. Передатчик, установленный на патрульной машине, для обеспечения скрытности передвижения машины работает в среднем t_1 мин за t_2 ч календарного времени. Длительности работ по отдельным узлам передатчика в среднем составляют: по антенно-фидерному тракту – T_{01} ч, по высокочастотным цепям передатчика – T_{02} ч, по низкочастотным цепям – T_{03} часов. Интенсивность отказов в выключенном состоянии $\lambda_{ХР}$. Нарботка на отказ без проведения профилактических работ составила T_0 часов при экспоненциальном законе распределения. При проведении профилактических работ наработка на отказ составила $T_{ОП}$. Среднее время ремонта T_R . Определить оптимальный период проведения профилактических работ, а также коэффициент готовности и коэффициент оперативной готовности для времени t без профилактики и с профилактикой. Численные значения исходных величин для расчета даны в таблице 2.1 и зависят от номера варианта.

Задача 2.2. На шар-зонд, запускаемый в атмосферу, помещают специальное радиопередающее устройство одноразового действия. Длительности профилактических работ по отдельным узлам этого устройства в среднем составляют: по антенно-фидерному тракту – T_{01} ч, по передающему тракту – T_{02} ч, по модулю преобразования параметров в электрические сигналы – T_{03} ч. Интенсивность отказов устройства при хранении $\lambda_{ХР}$. Определить оптимальный период проведения профилактических работ. Численные значения исходных величин для расчета даны в таблице 2.2 и зависят от номера варианта.

Задача 2.3. Специализированное вычислительное устройство, входящее в состав самолетной РЛС, выполнено на современных стабильных и высоконадежных интегральных схемах. Коэффициент интенсивности эксплуатации этого устройства равен $K_{И}$, средняя продолжительность ТО равна $T_{ТО}$, а интенсивность отказов при проведении профилактики $\lambda_{П}$. По результатам испытаний получено численное значение коэффициента, учитывающего высокую стабильность параметров устройства $K_{СТ}$. Определить оптимальный период проведения профилактических работ. Численные значения исходных величин для расчета даны в таблице 2.3 и зависят от номера варианта. Интенсивностью отказов при хранении пренебречь.

Таблица 2.1 – Исходные данные для задачи 2.1

Первая цифра № варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
t_1 , мин	1	2	3	4	4	3	5	7	7
t_2 , ч	1	3	2	5	3	5	2	3	5
Вторая цифра № варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T_{01} , час	0.5	1	1.5	0.5	1	1.5	1	0.5	1.5
T_{02} , час	2	3	4	3	4	2	2	3	3
T_{03} , час	1	1.5	2	1	2	1.5	0.5	2	1
$\lambda_{ХР}$, ч ⁻¹	$1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$4.5 \cdot 10^{-5}$	$3.5 \cdot 10^{-5}$	$2.5 \cdot 10^{-5}$	$1.5 \cdot 10^{-5}$
Третья цифра № варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T_0	200	260	320	350	250	280	300	380	220
$T_{ОП}$	380	450	490	640	380	550	480	600	415
T_P	5	6	7	8	9	6	5	4	8
t	2	3	4	5	3.5	8	6	3.5	4.5

Таблица 2.2 – Исходные данные для задачи 2.2

Первая цифра № варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T_{01} , ч	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2
$\lambda_{ХР}$, ч ⁻¹	$5 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$5.5 \cdot 10^{-5}$	$4.5 \cdot 10^{-5}$	$3.5 \cdot 10^{-5}$	$2.5 \cdot 10^{-5}$
Вторая цифра № варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T_{02} , ч	4	3	2	1	5	6	7	8	9
Третья цифра № варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T_{03} , ч	5	4	3	3.5	4.5	2.5	3	4	5

Таблица 2.3 – Исходные данные для задачи 2.3

Первая цифра № варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$K_{И}$	0.1	0.15	0.2	0.25	0.17	0.22	0.12	0.28	0.3
$K_{СТ}$	1.5	1.7	1.9	2.1	1.45	1.55	1.65	1.75	1.85
Вторая цифра № варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$T_{ТО}$, час	5	6	7	8	9	8.5	7.5	6.5	5.5
Третья цифра № варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\lambda_{ХР}$, ч ⁻¹	$5 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1.5 \cdot 10^{-5}$	$2.5 \cdot 10^{-5}$	$3.5 \cdot 10^{-5}$	$4.5 \cdot 10^{-5}$

2.2 Расчёт ремонтпригодности

2.2.1 Основные формулы для расчёта ремонтпригодности

В начале расчёта ремонтпригодности определяют условную вероятность отказа элементов i -ой группы при простейшем потоке отказов:

$$q_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^m \lambda_j}, \quad (2.16)$$

где λ_i – интенсивность отказов элементов i -ой группы; m – число групп элементов в аппаратуре.

Затем находят среднее время ремонта:

$$T_P = \sum_{i=1}^m q_i \cdot T_{Pi}, \quad (2.17)$$

где T_{Pi} – активное время ремонта при отказе элемента i -ой группы.

Это время складывается из среднего времени поиска неисправного элемента t_{0i} , среднего времени замены элемента t_{3i} и среднего времени проверки исправности аппаратуры после замены отказавшего элемента $t_{ПPi}$:

$$T_{Pi} = t_{0i} + t_{3i} + t_{ПPi}. \quad (2.18)$$

По точности и достоверности метод расчета оценок времени ремонта зависит от закона распределения времени ремонта. Как правило, это распре-

деление экспоненциальное или Эрланга. Средняя продолжительность ремонта определяется по формуле:

$$T_{Pi} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{Pi}}{n}, \quad (2.19)$$

где T_{Pi} – среднее время ремонта при i -ом отказе; n – число отказов.

Эта формула менее точна, чем формула (2.17), так как в ней все отказы считают равновероятными. Если аппаратура модульного типа и ремонт производят заменой модуля, то закон распределения времени ремонта – экспоненциальный:

$$f(t_p) = \frac{1}{T_p} \exp\left(-\frac{t_p}{T_p}\right). \quad (2.20)$$

При экспоненциальном распределении верхнюю T_{PB} и нижнюю T_{PH} границы времени ремонта находят из выражений:

$$T_{PH} = T_p \cdot r_2, \quad (2.21)$$

$$T_{PB} = T_p \cdot r_1. \quad (2.22)$$

Коэффициенты r_1 и r_2 , связанные с квантилями распределения χ^2 Пирсона, можно определить из таблицы 2.4 в зависимости от значений n и доверительной вероятности $P(\epsilon)$.

Таблица 2.4 – Значения коэффициентов r_1 и r_2

№	Вероятность $P(\epsilon)$							
	r_1				r_2			
	0.99	0.95	0.9	0.8	0.99	0.95	0.9	0.8
2	13.5	5.63	3.77	2.42	0.3	0.42	0.51	0.67
4	4.35	2.93	2.29	1.74	0.4	0.52	0.6	0.73
6	3.36	2.29	1.9	1.54	0.46	0.57	0.65	0.76
8	2.75	2.01	1.72	1.43	0.5	0.61	0.6	0.78
10	2.42	1.83	1.61	1.37	0.53	0.64	0.7	0.8
15	2.01	1.62	1.46	1.28	0.59	0.68	0.74	0.83
20	1.81	1.51	1.37	1.24	0.63	0.72	0.77	0.85
50	1.43	1.28	1.21	1.14	0.74	0.8	0.84	0.89
100	1.28	1.19	1.14	1.09	0.8	0.86	0.88	0.92
250	1.17	1.11	1.09	1.0	0.87	0.9	0.92	0.95
500	1.11	1.08	1.06	1.04	0.89	0.92	0.94	0.96

При поиске отказов вручную время текущего ремонта, как правило, распределено по закону Эрланга:

$$f(t_P) = \left(\frac{4t_P}{T_P^2} \right) \exp\left(\frac{-2t_P}{T_P} \right). \quad (2.23)$$

При распределении Эрланга:

$$T_{PH} = T_P/\delta_2, \quad (2.24)$$

$$T_{PB} = T_P/\delta_1. \quad (2.25)$$

Значение коэффициентов δ_1 и δ_2 можно определить из таблицы 2.5 в зависимости от значений n и доверительной вероятности $P(\epsilon)$.

Таблица 2.5– Значение коэффициентов δ_1 и δ_2

N	Вероятность $P(\epsilon)$							
	δ_1				δ_2			
	0.99	0.95	0.9	0.8	0.99	0.95	0.9	0.8
4	0.362	0.500	0.581	0.700	2.00	1.64	1.47	1.28
8	0.464	0.620	0.688	0.785	1.66	1.43	1.34	1.20
10	0.473	0.650	0.713	0.813	1.53	1.35	1.29	1.19
15	0.570	0.700	0.766	0.850	1.43	1.30	1.23	1.15
20	0.629	0.740	0.800	0.870	1.37	1.26	1.20	1.13
30	0.697	0.788	0.835	0.892	1.30	1.22	1.16	1.11
50	0.765	0.830	0.870	0.916	1.23	1.17	1.13	1.08
100	0.835	0.880	0.910	0.940	1.16	1.12	1.09	1.06
250	0.895	0.923	0.944	0.962	1.10	1.07	1.06	1.04
500	0.928	0.950	0.960	0.974	1.07	1.05	1.04	1.03

2.2.2 Примеры расчета ремонтпригодности

Пример 2.4. Из-за возникших в системе $n = 10$ отказов на восстановление работоспособности было затрачено 20 ч. Определить доверительный интервал параметра T_P с доверительной вероятностью $P(\epsilon) = 0.95$ при экспоненциальном распределении времени ремонта.

Решение:

а) определяем среднюю продолжительность ремонта:

$$T_{Pi} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{Pi}}{n} = \frac{20}{10} = 2 \text{ ч};$$

б) по таблице 2.4 определяем при $n = 10$ и $P(\epsilon) = 0.95$ $r_1 = 1.83$ и $r_2 = 0.64$, а затем по формулам (2.21) и (2.22) определяем доверительные границы и интервал $I \in$ изменения:

$$T_{PH} = T_P \cdot r_2 = 2 \cdot 0.64 = 1.28 \text{ ч};$$

$$T_{PB} = T_P \cdot r_1 = 2 \cdot 1.83 = 3.66 \text{ ч};$$

$$I\epsilon = 1.28 \dots 3.66 \text{ ч}.$$

Ответ: доверительный интервал $I\epsilon = 1.28 \dots 3.66 \text{ ч}$.

Пример 2.5. Имеется непрерывно работающая двухканальная линия связи. Интенсивность отказа λ и время ремонта канала имеют экспоненциальное распределение с параметром $\lambda = 10^{-2} \text{ ч}^{-1}$ и интенсивностью ремонта $\mu = 1 \text{ ч}^{-1}$. Определить среднее значение суммарного времени ремонта линии и доверительный интервал $I\epsilon$ с вероятностью $P(\epsilon) = 0.99$ за время эксплуатации 2000 ч. Для восстановления имеется одна бригада. Вероятность отказа двух каналов одновременно $P_{1,2} = 0.25$. Ремонт отказавшего канала требует включения всей линии.

Решение:

а) находим наработку на отказ одного канала:

$$T_0 = 1/\lambda = 1/10^{-2} = 100 \text{ ч};$$

б) находим количество отказов в одном из каналов (n_1 или n_2), суммарное количество отказов в каналах (n_Σ) и количество отказов одновременно в двух каналах ($n_{1,2}$):

$$n_1 = n_2 = t/T_0 = 2000/100 = 20;$$

$$n_\Sigma = n_2 + n_1 = 20 + 20 = 40;$$

$$n_{1,2} = n_\Sigma \cdot P_{12} = 40 \cdot 0.25 = 10;$$

в) находим среднее время ремонта:

25% всех отказавших изделий ($n_{1,2}$) восстанавливаются поочередно за время:

$$T_{P12} = \frac{1}{\mu} + \frac{1}{\mu} = \frac{2}{\mu} = \frac{2}{1} = 2 \text{ ч}.$$

Остальные 75% отказавших изделий ($N_1 = n_\Sigma - n_{1,2} = 40 - 10 = 30$) восстанавливаются за время:

$$T_{P1} = 1/\mu = 1/1 = 1 \text{ ч}.$$

Среднее время ремонта линии:

$$T_P = \frac{T_{P1}N_1 + T_{P12}n_{12}}{n_\Sigma} = \frac{1 \cdot 30 + 2 \cdot 10}{40} = \frac{50}{40} = 1.25 \text{ ч};$$

г) по таблице 2.4 определяем для $n = 40$ и $P(\epsilon) = 0.99$, что $r_1 = 1.5$ и $r_2 = 0.71$, а затем по формулам (2.21) и (2.22) определяем доверительные границы и интервал $I\epsilon$ изменения времени ремонта T_P :

$$T_{PH} = T_P \cdot r_2 = 1.25 \cdot 0.71 = 0.89 \text{ ч};$$

$$T_{PB} = T_P \cdot r_1 = 1.25 \cdot 1.5 = 1.88 \text{ ч};$$

$$I\epsilon = 0.89 \dots 1.88 \text{ ч}.$$

Ответ: среднее значение суммарного времени ремонта линии $T_P = 1.25 \text{ ч}$; доверительный интервал $I\epsilon = 0.89 \dots 1.88 \text{ ч}$.

Пример 2.6. При эксплуатации устройства было зарегистрировано $n = 30$ отказов. Данные по распределению отказов по группам элементов и времени, затраченному на ремонт, приведены в таблице 2.6. Найти среднее

время ремонта устройства и доверительный интервал при $P(\epsilon) = 0.9$, если распределение времени ремонта подчиняется закону Эрланга.

Таблица 2.6 – Исходные данные для примера 2.6

Группы элементов	Количество отказов по группе n_i	Вес отказов по группе $P_i = n_i/n$	Время ремонта T_{Pi} , мин	Суммарное время ремонта по группе $T_{\Sigma i}$, мин
Полупроводниковые приборы	6	0.2	80; 59; 108; 45; 73; 91	456
Электривакуумные приборы	10	0.333	56; 36; 44; 42; 33; 32; 23; 75; 61; 28	430
Микромодули	4	0.14	26; 34; 19; 23	102
Резисторы и конденсаторы	7	0.23	60; 73; 91; 58; 44; 82; 54	462
Прочие элементы	3	0.1	125; 133; 108	366

Решение:

а) определяем среднее время ремонта:

- для полупроводниковых приборов:

$$T_{P1} = 456/6 = 76 \text{ мин};$$

- для электривакуумных приборов (ЭВП):

$$T_{P2} = 430/10 = 43 \text{ мин};$$

- для микромодулей:

$$T_{P3} = 102/4 = 25.5 \text{ мин};$$

- для резисторов и конденсаторов:

$$T_{P4} = 462/7 = 66 \text{ мин};$$

- для прочих элементов:

$$T_{P5} = 366/3 = 122 \text{ мин};$$

б) рассчитаем среднее время ремонта устройства:

$$T_P = \sum_{i=1}^5 T_{Pi} P_i,$$

где T_{P_i} – среднее время ремонта элементов i -ой группы; P_i – вес (вероятность) отказов по группам элементов.

Подставляя числовые данные, получим:

$$T_P = (76 \cdot 0.2 + 43 \cdot 0.33 + 25.5 \cdot 0.14 + 66 \cdot 0.23 + 122 \cdot 0.1) \approx 60 \text{ мин};$$

в) по таблице 2.5 при $n = 30$ и $P(\epsilon) = 0.9$ находим $\delta_1 = 0.835$ и $\delta_2 = 1.22$ и с учётом формул (2.24) и (2.25) находим нижнюю и верхнюю доверительные границы времени ремонта T_P и доверительный интервал $I \in$ времени ремонта:

$$T_{PH} = T_P / \delta_2 = 60 / 1.22 = 49.18 \text{ мин};$$

$$T_{PB} = T_P / \delta_1 = 60 / 0.835 = 71.86 \text{ мин};$$

$$I \in = 49.18 \dots 71.86 \text{ мин.}$$

Ответ: среднее время ремонта устройства $T_P = 60$ мин; доверительный интервал $I \in = 49.18 \dots 71.86$ мин.

2.2.3 Задачи по расчёту ремонтпригодности

Задача 2.4. На испытание было поставлено $N = 50$ ремонтируемых устройств. За время испытаний отказало n устройств. Время ремонта T_{P_i} в часах составило: $T_{P_1} = 4$; $T_{P_2} = 3.7$; $T_{P_3} = 3.9$; $T_{P_4} = 5.2$; $T_{P_5} = 3.4$; $T_{P_6} = 3.2$; $T_{P_7} = 4.7$; $T_{P_8} = 4.2$; $T_{P_9} = 4.5$; $T_{P_{10}} = 5.3$; $T_{P_{11}} = 3.1$; $T_{P_{12}} = 4.4$; $T_{P_{13}} = 4.8$; $T_{P_{14}} = 3.8$; $T_{P_{15}} = 4.6$. Определить доверительный интервал времени ремонта T_P с доверительной вероятностью $P(\epsilon)$ при заданном законе распределения времени ремонта. Численные значения исходных величин для расчёта даны в таблице 2.7 и зависят от номера варианта. При расчёте использовать первые n цифр T_{P_i} .

Таблица 2.7 – Исходные данные для задачи 2.4

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Время ремонта распределено по:	закону Эрланга				экспоненциальному закону				
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P(\epsilon)$	0.8	0.9	0.95	0.99	0.8	0.9	0.95	0.99	0.8
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n	4	5	6	7	8	9	10	12	15

Задача 2.5. Определить объём испытаний n при условии, что оценка среднего времени ремонта с вероятностью $P(\epsilon)$ не отличалась бы от верхней доверительной границы более чем в k раз при заданном законе распределения

времени ремонта. Вид закона и численные значения исходных величин для расчёта даны в таблице 2.8 и зависят от номера варианта.

Таблица 2.8 – Исходные данные для задачи 2.5

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Время ремонта распределено по:	экспоненциально- му закону				закону Эрланга				
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P(\epsilon)$	0.8	0.9	0.95	0.99	0.8	0.9	0.95	0.99	0.8
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
k	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.65	1.75

3 ОПИСАНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ ДЛЯ ИХ ВЫПОЛНЕНИЯ

3.1 Составление алгоритма для определения места неисправности радиоэлектронного оборудования

3.1.1 Цели работы

- обучить студентов разработке информационной функциональной диагностической модели (ФДМ), графоаналитической модели и матрицы состояний, описывающих функционирование радиоэлектронного оборудования;
- обучить студентов практически использовать методику составления алгоритма для поиска места неисправности радиоэлектронного оборудования, используя матрицы состояний и функции предпочтения;
- обучить студентов практически использовать методику составления алгоритма для поиска места неисправности радиоэлектронного оборудования, используя метод половинного деления.

3.1.2 Общие теоретические сведения

Определение части изделия, отказ которой привел к возникновению состояния неработоспособности, называется поиском места отказа. Физически отказ радиоэлектронного средства (РЭС) сопровождается или прекращением функционирования (внезапный отказ) или выходом параметра за пределы допусков (постепенный отказ).

Фиксация отказа является следующим за проверкой работоспособности этапом диагностирования. В сложных РЭС поиск места отказа (ПМО) является трудоемкой процедурой. Для ПМО необходима, как правило, более высокая квалификация инженерно-технического состава, чем для контроля работоспособности.

ПМО и восстановление РЭО проводятся в течение нескольких этапов:

- а) определяется неработоспособное состояние РЭО;
- б) определяется отказавший блок или иное радиоэлектронное устройство (РЭУ) с точностью до сменной сборочной единицы;
- в) находится место отказа с точностью до отказавшего восстанавливаемого или заменяемого электрорадиоэлемента;
- г) восстанавливается отказавший блок или иное РЭУ;
- д) восстанавливается отказавшее РЭО [4].

Существуют различные диагностические модели (ДМ) – разновидность аналитических диагностических моделей, метод ветвей и границ, а также информационные графоаналитические модели.

Основные достоинства аналитических диагностических моделей – глубина и полнота отношений. Недостатков тоже два – сложность и отсутствие инженерной наглядности. Информационные ДМ лишены этих недостатков.

Ориентированные графы дают одно из наиболее наглядных представлений объектов диагностирования. Если объект диагностики (ОД) может быть описан системой линейных алгебраических уравнений, то эту систему можно представить функцией – диаграммой прохождения сигналов. Диаграмма прохождения сигналов строится на основе принципиальной или функциональной схемы РЭУ или РЭС и представляет собой схему, состоящую из узлов, которые соединены направленными ветвями. Такое построение диаграммы прохождения позволяет выявить ряд дополнительных связей и оптимизировать число параметров [4, 7, 8].

Ориентированные графы строятся не только на основе диаграммы прохождения сигнала, но и по функциональной схеме РЭУ. Любая функциональная (принципиальная) схема РЭУ может быть представлена логическими структурами формирования и прохождения сигнала, в которых заложена потребительская информация о состоянии РЭС. Таким образом, первичным видом диагностической модели является структурная схема, она же логическая модель.

В виде ориентированного графа, дуги (ребра) которого снабжены стрелками, может быть представлена радиоэлектронная схема любой сложности. Ориентированный граф обозначают символом $G(X, V)$, где $X(x_1...x_n)$ и $V(v_1...v_m)$ – соответственно множества вершин и дуг. С понятием ориентированный граф связан термин «отображение». Отображение показывает, каким образом вершина x_i отображается в других вершинах.

Возвращаясь к графическому представлению сложных схем, отметим, что отображение ориентированного графа $G(X, V)$ позволяет наглядно проследить взаимное влияние предыдущих выходов на последующие выходы и определить взаимное влияние параметров.

Представление изображения функциональных схем в вид ориентированных графов позволяет так же представить схему, как и любой граф, в виде матрицы, так называемой «матрицы смежности».

Матрица смежности графа G , состоящего из n вершин, – это квадратичная матрица $A = ||a_{ij}||$ с n строками и n столбцам; ее общий элемент $a_{ij} = 1$, тогда между вершинами x_i и x_j есть связь, а $a_{ij} = 0$, когда вершины x_i и x_j – не соединены дугами.

Строка смежности, состоящая только из нулей, свидетельствует о том, что в эту вершину отображаются все остальные.

Рассматриваемый нами вид графоаналитической модели является матрицей состояний, имеющей так же наименования: таблица состояний, таблица

неисправностей и др. Матрица состояний строится на базе функциональной диагностической модели. Номер столбца соответствует номеру вида технического состояния ОД, номер строки – элементарной проверке U_i на выходе блока i .

При составлении таблицы по ФДМ или по ориентированному графу, соответствующему ФДМ устройства, логическим путем оцениваются результаты проверки U_i для состояния вида S_j . Состояние вида S_j – это состояние, при котором неисправно РЭУ (или электрорадиоэлемент) под номером j . Если результат проверки – положительный, в элемент таблицы (i, j) записывается (1), в противном случае – (0).

Из сопоставления функциональной схемы и ФДМ следует, что модель отличается от функциональной схемы тем, что все ее элементы имеют по одному выходу, а тракты обратной связи разомкнуты, если они охватывают множество блоков.

Функциональная схема типового автоматического радиокompаса, работа которого подробно описана в [9], изображена на рисунке 3.1. При построении функциональной диагностической модели (рисунок 3.2) разомкнут тракт цепи обратной связи управлением вращением антенны 2.1, выполненной в виде рамки. Эта цепь обратной связи между электрическим выходом антенны – рамки 2.1 – и механическим приводом вращения рамки включает несколько последовательно соединённых блоков: входную цепь 2.2, усилитель высокой частоты (УВЧ) 2.3, коммутатор фазы 3, приёмник 4, систему управления рамкой 7 и двигатель 1. В результате размыкания тракта цепи обратной связи на рисунке функциональной диагностической модели отсутствует стрелка, соответствующая механической связи между двигателем 1 и рамкой, имеющаяся на функциональной схеме. Кроме того, на ФДМ последовательно соединённые блоки объединены между собой: рамка 2.1, входная цепь 2.2 и УВЧ 2.3 объединены в блок 2, а компенсатор девиации 8.1, сельсин-датчик 8.2 и указатель курсового угла радиостанции 8.3 объединены в блок 8. Блок приёмника 4, имеющий согласно функциональной схеме два различных выходных сигнала, разделён на ФДМ на два блока 4 и 9. Благодаря этому каждый блок на ФДМ имеет по одному выходу.

После того, как функционально-диагностическая модель построена, строим ориентированный граф ФДМ, который изображен на рисунке 3.3.

На базе ФДМ строится ориентированный граф, а на базе этого графа строится матрица состояний. Пример построения матрицы состояний приведён на рисунке 3.4. Алгоритм поиска места отказа на основе информационного подхода составляется следующим образом. По ориентированному графу устройства, для которого формируется алгоритм, строится матрица состояний (проверки U_i изображают в виде строк, состояния S_j изображают в виде столбцов). Под каждым значением S_j указываются его численные нормированные величины (1 или 0), соответствующие проверкам U_i .

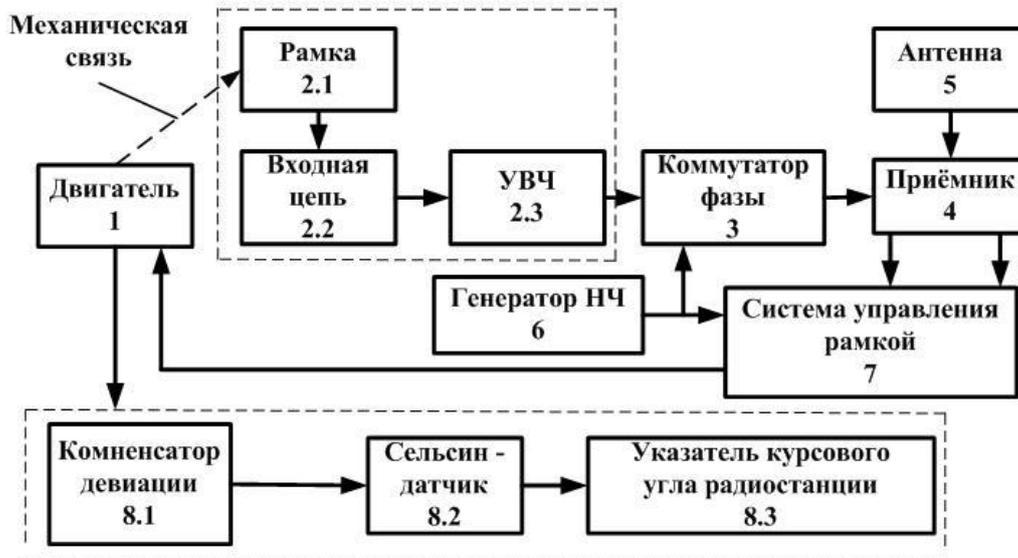


Рисунок 3.1 – Функциональная схема типового автоматического радиоконпаса

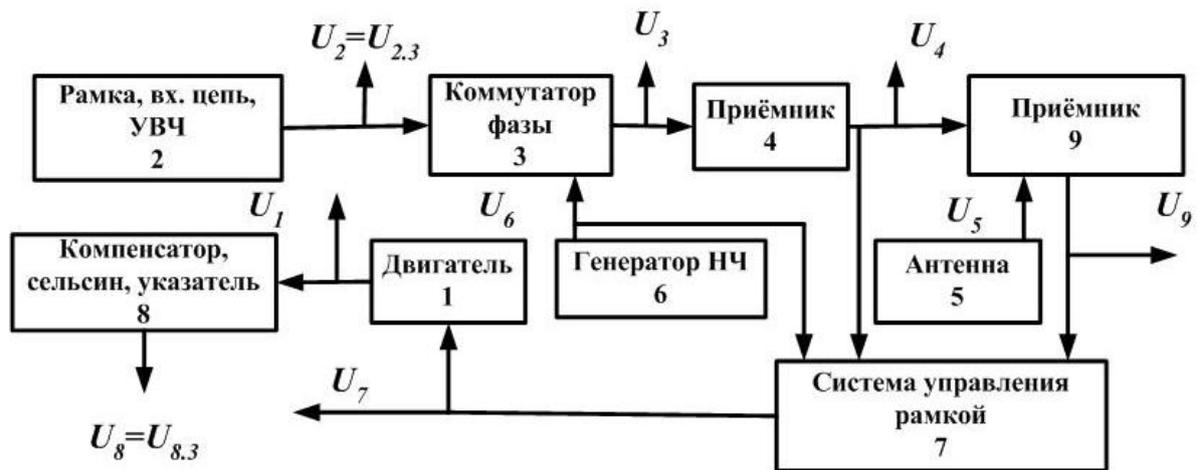


Рисунок 3.2 – Функциональная диагностическая модель типового автоматического радиоконпаса

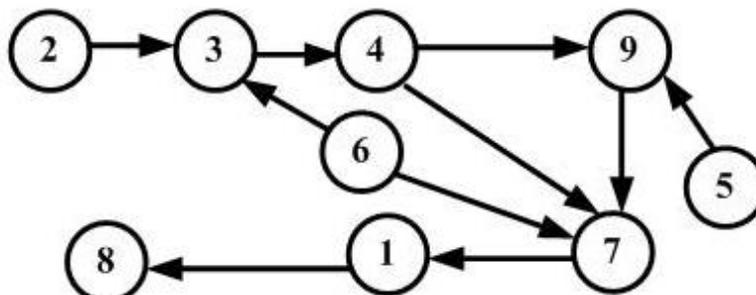


Рисунок 3.3 – Ориентированный граф функциональной диагностической модели типового автоматического радиоконпаса

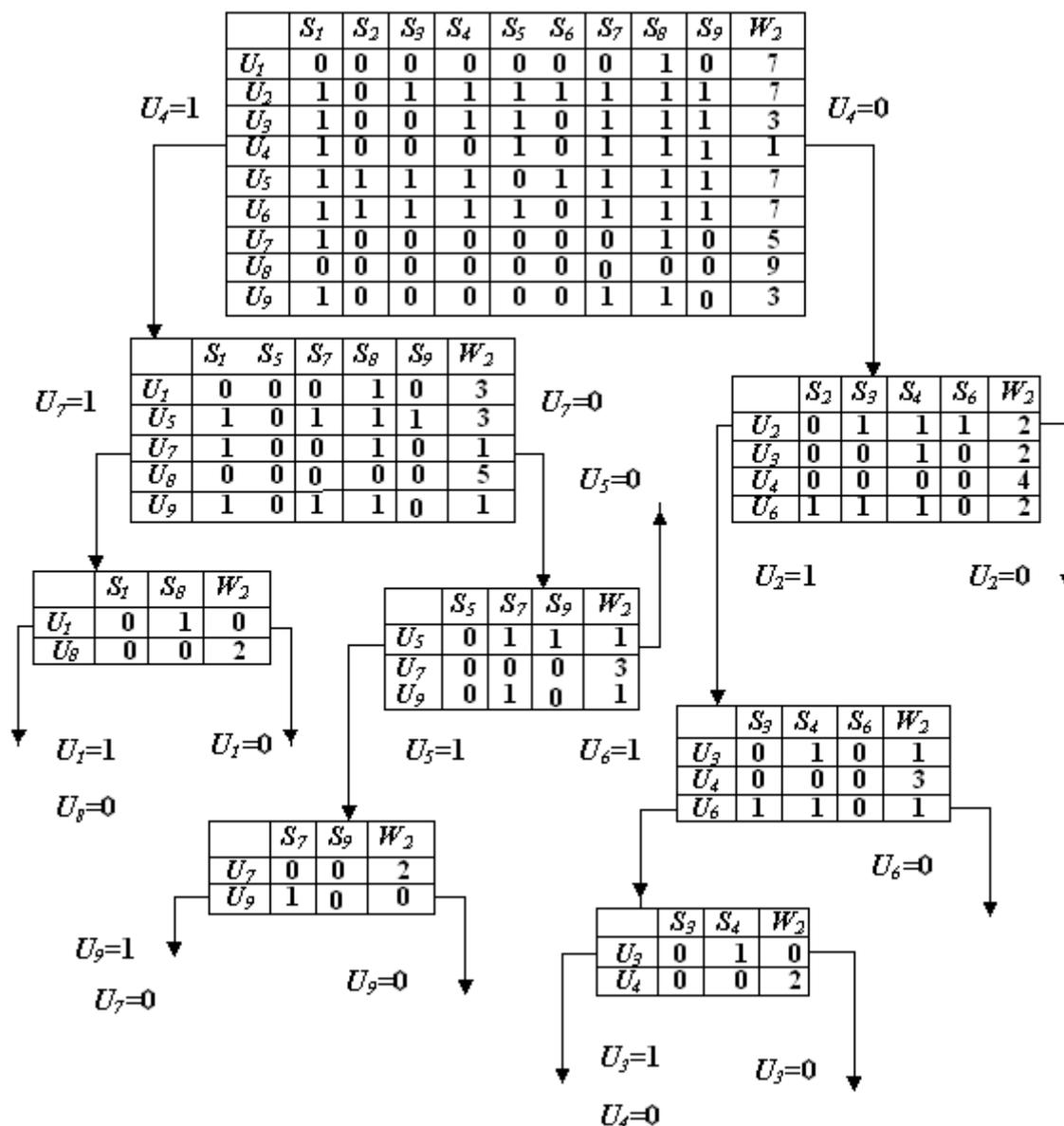


Рисунок 3.4 – Матрица состояний, построенная по ориентированному графу функциональной диагностической модели для типового автоматического радиоконпаса

Для каждой строки U_i вычисляется функция предпочтения:

$$W_{2i} = |a - b|, \quad (3.1)$$

где a – число единиц в строке; b – число нулей в строке.

В качестве первой проверки выбирается та, для которой функция предпочтения $W_{2i} \rightarrow 0$, т.е. имеет наименьшую величину.

Далее проверки идут по двум почти равноинформативным ветвям. Для результата $U_i(W_{2i \min}) = 1$ строим новую матрицу, в которую попадают состояния S_{ij} , соответствующие единице; для этой матрицы также следует вычисление функции предпочтения. Процедура повторяется до получения однозначного ответа по каждому узлу.

Для результата проверки $U_i(W_{2i \min}) = 0$ также строится соответствующая матрица, в которой принимают участие состояния S_{ij} с результатом проверки, равным 0. Для всех строк этой матрицы также вычисляются функции предпочтения, по вышеприведенной формуле и следующая проверка выбирается по $W_{2i \min}$, т.е. процедура повторяется вновь. Для получения более детальной информации необходимо все перечисленные операции проделать с каждым блоком. При построении алгоритма поиска места отказа, это позволит локализовать место отказа с точностью до функционального узла или даже элемента. По окончании построения алгоритма ПМО составляется структурная схема этого алгоритма.

Структурная схема алгоритма поиска места отказа для типового автоматического радиокompаса изображена на рисунке 3.5.

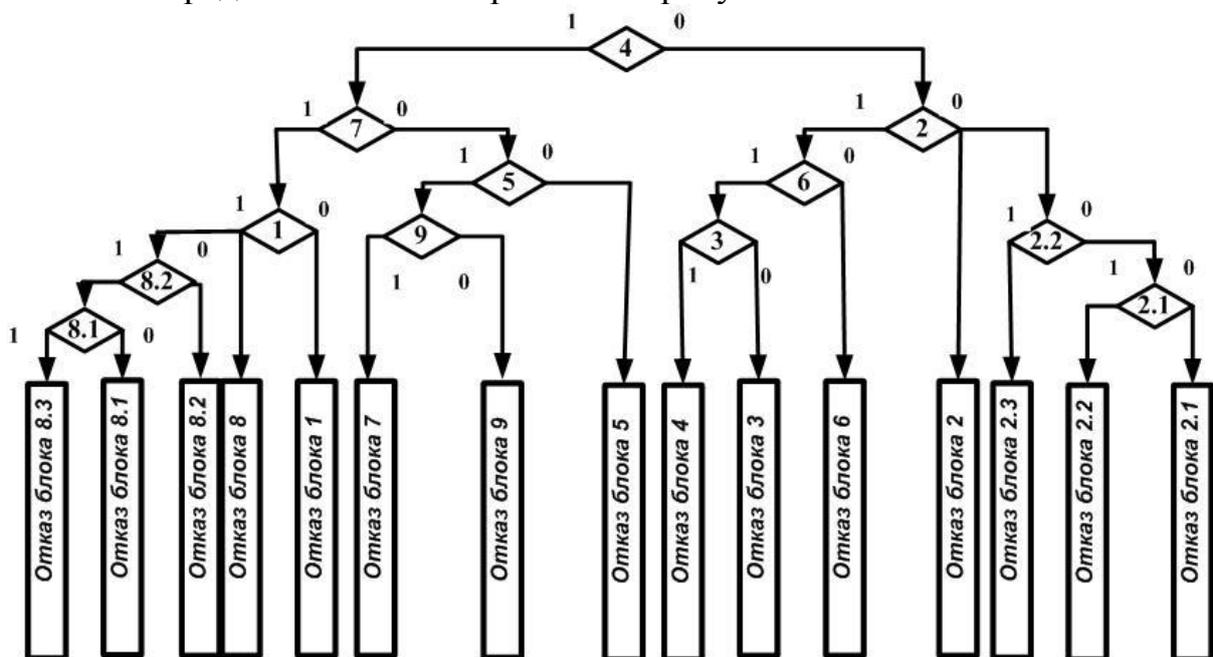


Рисунок 3.5 – Структурная схема алгоритма поиска места отказа для типового автоматического радиокompаса

При её составлении учитываем, что с помощью рассчитанной нами матрицы состояний (рисунок 3.4) определяется место отказа с точностью до блоков 2 и 8. Иногда, например после проверки блока 4, в матрице состояний встречаются ситуации, когда функция предпочтения W_{2i} имеет одинаковые наименьшие значения $W_{2i \min}$ для нескольких блоков i . В этом случае очередную проверку можно начинать с любого из блоков, для которого соблюдается условие $W_{2i} = W_{2i \min}$. Место отказа с точностью до отказавших более мелких блоков (субблоков), соединённых внутри блоков 2 и 8 последовательно, можно находить с помощью матрицы состояний, но в этом случае более просто использовать метод половинного деления, что мы и сделали. При использовании метода половинного деления, называемого иногда методом половинных разбиений, в схеме отказавшего РЭУ (рисунок 3.6) ищется средняя точка (средний блок) с учётом или без учёта вероятности отказа, производится про-

верка выходного параметра в этой точке, после чего в зависимости от результата проверяют правую или левую часть схемы.

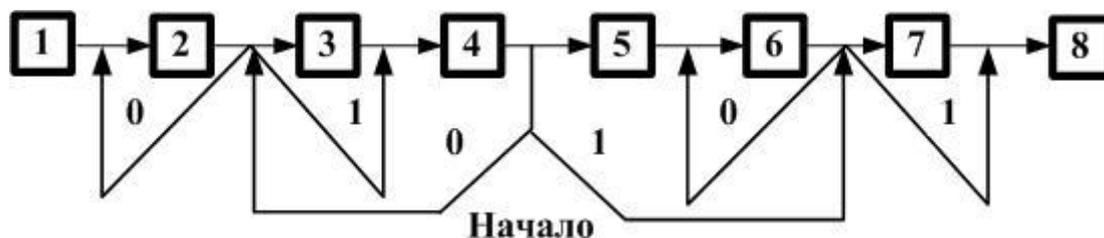


Рисунок 3.6 – Метод половинного деления [4]

3.1.3 Задание на работу

Используя вариант функциональной схемы устройства, выданный преподавателем:

а) разработать информационную функциональную диагностическую модель, графоаналитическую модель и матрицу состояний, описывающие функционирование устройства;

б) составить алгоритм поиска места неисправности устройства, используя матрицы состояний, функции предпочтения и метод половинного деления.

3.1.4 Содержание отчета

1. Цель работы.

2. Описание и изображение информационной функциональной диагностической модели, графоаналитической модели и матрицы состояний, описывающих функционирование устройства, а также структурной схемы алгоритма поиска места неисправности.

3. Заключение – выводы по результатам работы.

3.1.5 Перечень контрольных вопросов, которые могут быть заданы во время защиты отчёта по работе

1. Какова последовательность этапов поиска места неисправности и восстановления РЭО?

2. Что такое диаграмма прохождения сигналов?

3. Что такое ориентированные графы?

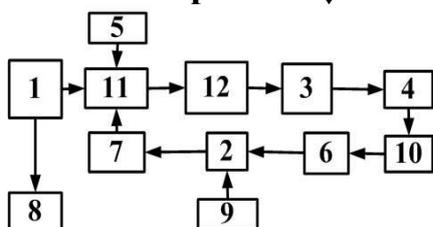
4. Что такое матрица смежности графа?

5. Что такое функциональная диагностическая модель и каковы правила её составления?

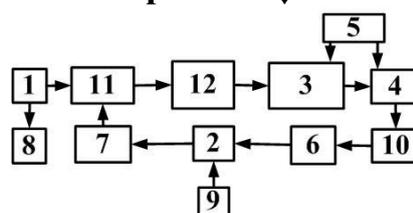
6. Что такое матрица состояний, и каковы правила её составления?
7. Что такое функция предпочтения, и каковы правила её вычисления?
8. Как определить порядок проверок по численным значениям функции предпочтения в матрице состояний?
9. Как определить порядок проверок при использовании метода половинного деления?

3.1.6 Варианты заданий

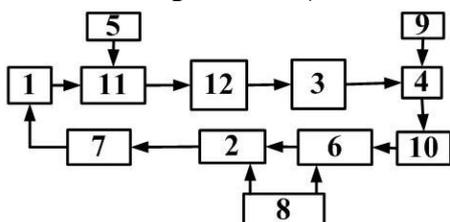
Вариант 1↓



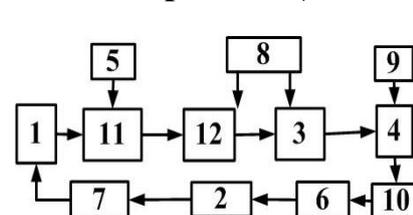
Вариант 2↓



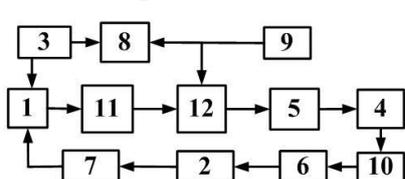
Вариант 3↓



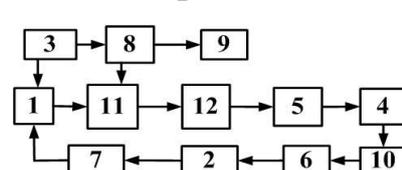
Вариант 4↓



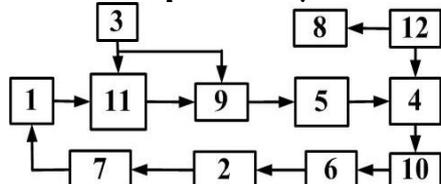
Вариант 5↓



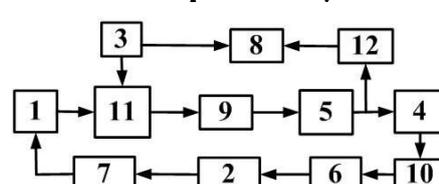
Вариант 6↓

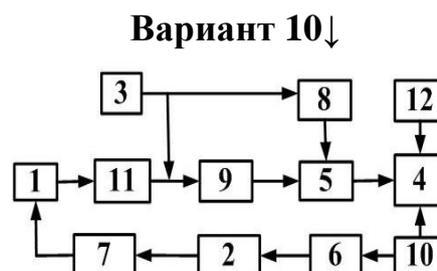
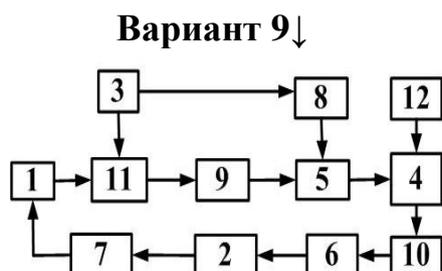


Вариант 7↓



Вариант 8↓





3.2 Граничные испытания для оценки запаса параметрической надежности

3.2.1 Цель работы

Ознакомить студентов с методикой проведения граничных испытаний математической модели применительно к стабилизатору напряжения бортовой радиостанции для оценки запаса параметрической надежности при изменении температуры эксплуатации в широком диапазоне с использованием системы MicroCAP 8.

3.2.2 Общие сведения о параметрической надёжности

Для того чтобы разъяснить понятие параметрической надёжности необходимо дать соответствующие действующим стандартам определения вероятности безотказной работы, внезапного и постепенного отказов и полной вероятности безотказной работы.

Вероятность безотказной работы – это вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет.

Наработка – это продолжительность или объём работы объекта. Наравотка может быть как непрерывной величиной (продолжительность работы в часах, километраж пробега и т.п.), так и целочисленной величиной (число рабочих циклов, запусков и т.п.).

Отказ – это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Работоспособное состояние (работоспособность) – это состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Внезапный отказ – это отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров объекта. Внезапные отказы являются результатом скрытых недостатков технологии производства или скрытых изменений параметров, накапливающихся во время эксплуата-

ции. Они могут происходить и из-за неправильных действий обслуживающего персонала.

Постепенный отказ – это отказ, возникающий в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта. Постепенные отказы характеризуют зависимостью сравнительно медленного изменения этих параметров, в результате старения или изнашивания элементов. Такие изменения часто можно зарегистрировать с помощью измерительных приборов.

Обратимый постепенный отказ – это отказ, возникающий в результате возрастания по величине дестабилизирующего фактора и исчезающий при уменьшении по величине этого фактора. Дестабилизирующими факторами могут быть температура, влажность, радиация и т.д.

Полная вероятность безотказной работы $P_{\Pi}(\tau)$ (по внезапным и постепенным отказам) в момент времени τ определяется по формуле:

$$P_{\Pi}(\tau) = P_{\tau} \prod_{i=1}^N P_{\text{ПОСТ } i}(\tau), \quad (3.2)$$

где P_{τ} – вероятность безотказной работы системы по внезапным отказам; N – число учитываемых выходных параметров системы, изменение которых во времени может привести к её отказу; $P_{\text{ПОСТ } i}(\tau)$ – вероятность безотказной работы системы по постепенным отказам, связанным с выходом i -го выходного параметра за пределы допустимых значений и возникающим из-за деградиационных процессов старения и износа и из-за воздействия дестабилизирующих факторов.

Так как выход параметра изделия за границы поля допуска считается параметрическим отказом, то вероятность $P_{\text{ПОСТ } i}(\tau)$ называют **параметрической надёжностью**.

3.2.3 Методика проведения граничных испытаний для оценки запаса параметрической надёжности

Метод граничных испытаний состоит в нахождении области таких значений параметров РЭС, при которых значения выходных (вторичных или эксплуатационных) параметров находятся в пределах допуска, т.е. области безотказной работы РЭС. Каждый выходной параметр Y_i (а их может быть счетное множество y) зависит от множества входных параметров $X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_n$, т.е. для каждого выходного параметра можно записать [15]:

$$Y_i = f_i(X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_n), \quad (3.3)$$

где $Y_i \in y; i = 1, \dots, k; j = 1, \dots, n$.

Для безотказной работы РЭС должно выполняться условие:

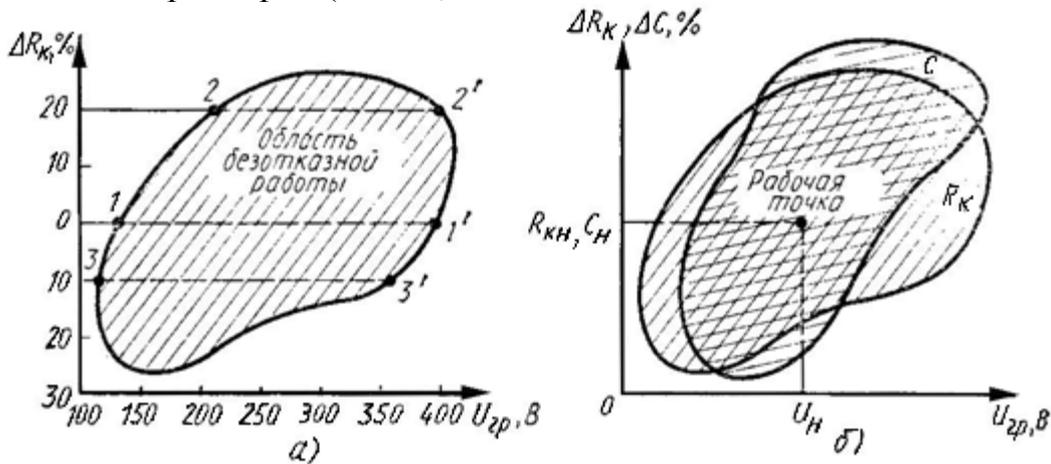
$$y_{\min} \leq Y_i \leq y_{\max}, \quad (3.4)$$

что соответствует изменению значения каждого входного параметра в пределах $x_{j \min} \leq x_j \leq x_{j \max}$.

Область безотказной работы РЭС определяется путем изменения значений входных параметров и фиксации предельных значений выходных параметров, превышение которых приводит к отказам РЭС. Граничные испытания выполняют в процессе проектирования и в процессе эксплуатации аналитическим, графическим или графоаналитическим способами. Аналитический способ применяют для испытания изделий, имеющих простую математическую модель, характеризующуюся, как правило, функциональной зависимостью одного выходного и одного входного параметра. Границы области безотказной работы определяют расчетным путем с помощью уравнения (3.3), которое упрощают: $Y_i = f(X_j)$. Графический способ используют для сложных изделий, когда выходной параметр зависит от нескольких входных. Границы области безотказной работы определяют экспериментально путем построения сечения функции (3.3) для каждого входного параметра X , т.е. находят допустимые пределы изменения значений этих параметров в зависимости от значения выбранного параметра граничных испытаний. Построение сечения функции выполняют следующим образом. Выбирают один или несколько критериев отказа. Один из параметров РЭС принимают за так называемый параметр граничных испытаний $X_{гр}$. Устанавливают номинальные значения входного параметра X_j , по которому производится сечение функции (3.3), и параметра $X_{гр}$. Значения остальных входных параметров сохраняют номинальными. Изменяют значение параметра $X_{гр}$ в меньшую и большую сторону от номинального значения до момента отказа РЭС – ухода значения выходного параметра Y_i за границы поля допуска, определяемые неравенством (3.4). Аналогичные испытания осуществляют для других значений X_j , отличных от номинального значения. В результате получают несколько точек, соответствующих предельным значениям выходного параметра Y_i . Соединив эти точки, устанавливают область безотказной работы РЭС. Пример построения области безотказной работы (графика граничных испытаний) РЭС приведен на рисунке 3.7, а.

В качестве параметра граничных испытаний выбрано напряжение питания $U_{гр}$, а в качестве изменяемого входного параметра – сопротивление R_K в коллекторной цепи RC -усилителя. Точки 1 и 1', 2 и 2', 3 и 3', соответствующие предельным значениям выходного параметра, получены при изменении напряжения $U_{гр}$ в меньшую (1, 2, 3) и в большую (1', 2', 3') сторону от номинального значения при определенных значениях сопротивления R_K . Кривая линия, соединяющая достаточное число подобных точек, является границей, разделяющей область безотказной работы и область отказов РЭС. Аналогично проводят построение сечения функции (3.3) по входному параметру X_i (например, разделительной ёмкости C RC -усилителя). Изменяя значение параметра граничных испытаний, получают другую область безотказной работы, соответствующую различным значениям X_i . Для всех входных параметров строят ряд графиков, наложив которые друг на друга, можно получить об-

ласть безотказной работы. Изменение входных параметров производят в пределах, значительно превышающих заданные техническими условиями (ТУ), с целью определения потенциального запаса надежности РЭС. На рисунке 3.7, б в качестве примера показано построение области безотказной работы для двух входных параметров (R_K и C).

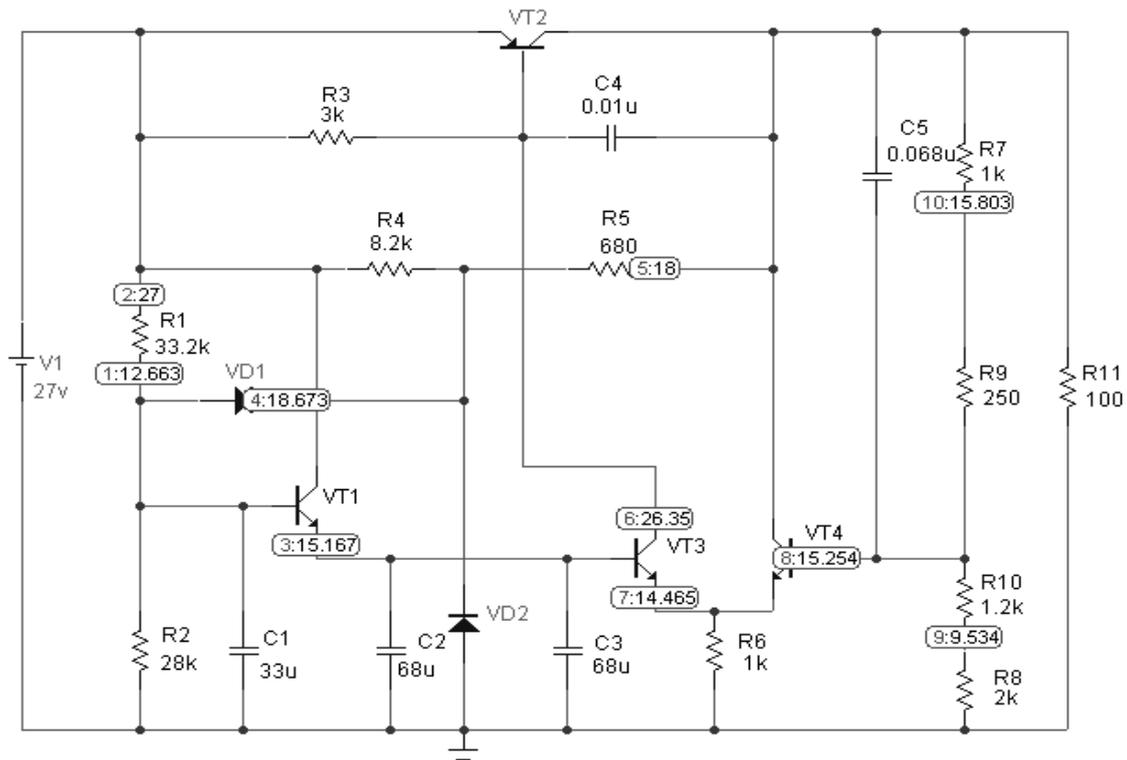


R_{KH}, C_H, U_H – номинальные значения параметров

Рисунок 3.7 – Построение области безотказной работы РЭС при изменении значений одного (а) и двух (б) входных параметров [15]

Графики граничных испытаний позволяют: прогнозировать отказы РЭС; определять правильность выбора номинальных значений параметров элементов того или иного изделия, питающих напряжений; сравнивать «запас» надёжности РЭС – по площади областей безотказной работы и положению рабочей точки. Чем больше площадь области безотказной работы и чем дальше отстоит от её границ рабочая точка, тем больше запас надёжности. К недостаткам метода граничных испытаний относятся невозможность количественной оценки надёжности и большая трудоемкость проведения экспериментов, что не позволяет получать данные об изменении выходных параметров РЭС при изменении комплекса внешних воздействий и взаимодействии элементов [15]. Значительная трудоемкость экспериментальных исследований, технические сложности реализации физических моделей ограничивают использование физического и математического моделирования в практике испытаний РЭС. Уменьшение трудоемкости граничных испытаний можно достичь благодаря использованию компьютерных систем схемотехнического моделирования, в частности программы MicroCAP 8.

Для примера таких испытаний рассмотрим часть из проведённых нами граничных испытаний стабилизатора напряжения на 18 В бортовой (самолётной) радиостанции. Отображение режима работы математической модели стабилизатора на 18 В на экране монитора компьютера показано на рисунке 3.8. Нагрузка подключается между коллектором транзистора VT2 и общей шиной. Сопротивление нагрузки R_{11} равно 100 Ом. Выходное напряжение не должно превышать граничных значений $18 \text{ В} \pm 5\%$ ($\pm 0.9 \text{ В}$).



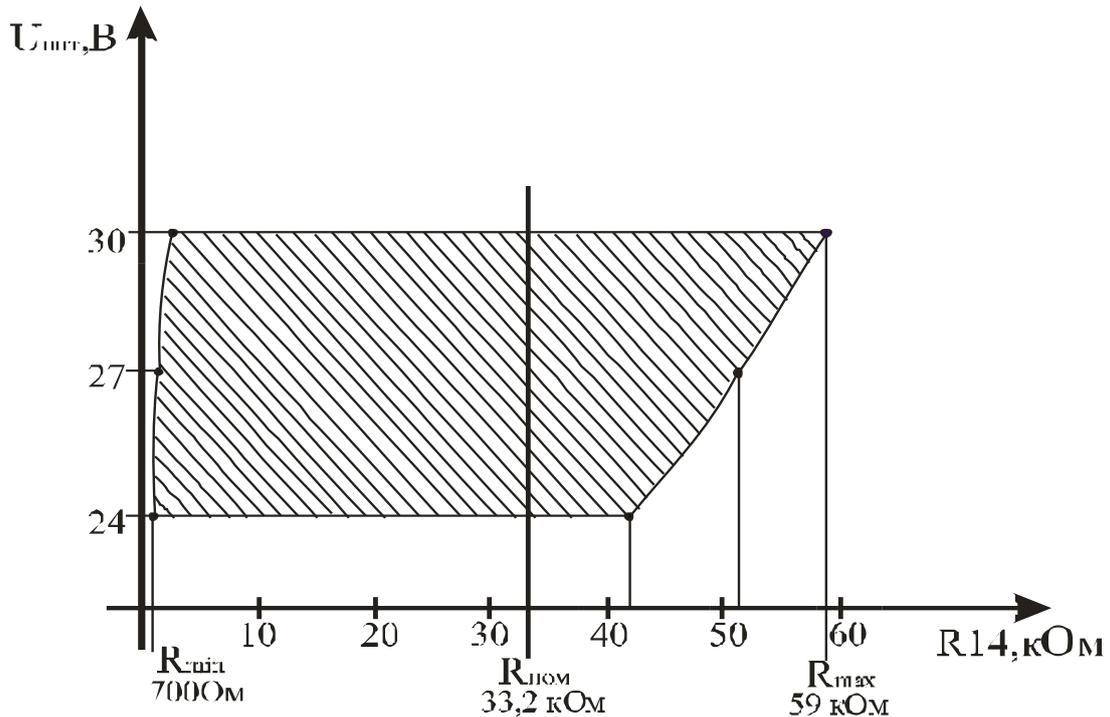
Диод $VD1$ 2Д103А; стабилитрон $VD2$ Д818Е;
транзисторы $VT1$, $VT3$, $VT4$ КТ315Д; $VT2$ 2Т825А

Рисунок 3.8 – Отображение режима работы математической модели стабилизатора на 18 В на экране монитора

На рисунке 3.9 по результатам граничных испытаний произведено построение области безотказной работы стабилизатора на 18 В при изменении величины сопротивления $R1$. В качестве параметра граничных испытаний $X_{ГР}$ взято напряжение бортовой сети $U_{ПИТ}$, которое по техническим условиям может изменяться в пределах 24...30 В. Температура окружающей среды 27°C . На рисунке 3.10 по результатам таких же испытаний произведено построение области безотказной работы этого же стабилизатора при изменении величины сопротивления $R6$ и при напряжении бортовой сети $U_{ПИТ} = 27$ В. В качестве параметра граничных испытаний $X_{ГР}$ для этого случая взята температура окружающей среды, меняющаяся от -60°C до $+60^{\circ}\text{C}$.

Результаты испытаний показали, что выбранное номинальное значение сопротивления резистора $R1$ находится не в центре рабочей области. Поэтому для увеличения параметрической надёжности можно рекомендовать выбрать номинал данного элемента $30\text{ кОм} \pm 20\%$, находящийся в рабочей области граничных испытаний при изменении параметров резистора $R1$ в пределах $\pm 20\%$ и при температурах от -60°C до $+60^{\circ}\text{C}$. Коэффициент влияния A_{R1} изменения сопротивления резистора $R1$ на изменение выходного напряжения $U_{ВЫХ}$ находится по формуле:

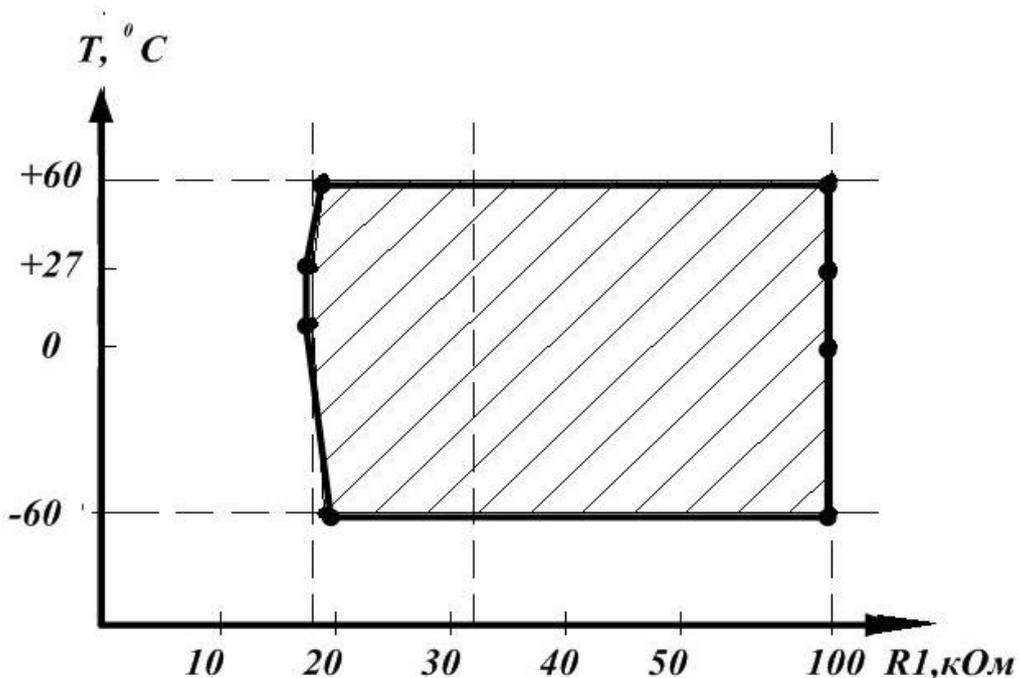
$$A_{R1} = \frac{U_{\text{ВЫХmax}} - U_{\text{ВЫХmin}}}{R1_{\text{max}} - R1_{\text{min}}} \cdot \frac{\Delta R1}{R1} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta R1 / R1}. \quad (3.5)$$



Параметр граничных испытаний – напряжение питания V_1 .

Температура окружающей среды $+27^{\circ}\text{C}$.

Рисунок 3.9 – График, отображающий результаты граничных испытаний стабилизатора напряжения при изменении параметров резистора R_1 (область безотказной работы заштрихована)



Параметр граничных испытаний – температура окружающей среды, изменяемая от -60°C до $+60^{\circ}\text{C}$

Рисунок 3.10 – График, отображающий результаты граничных испытаний стабилизатора напряжения при номинальном напряжении питающей сети 27В (область безотказной работы заштрихована)

Таким образом, проведение граничных испытаний дополнительно позволяет определить коэффициенты влияния A_{X_i} элементов X_i изделия на его выходной параметр N и составить уравнение погрешностей:

$$\frac{\Delta N}{N} = \sum_{i=1}^n A_{X_i} \frac{\Delta X_i}{X_i}, \quad (3.6)$$

где ΔX_i – отклонение от номинального значения величины параметра элемента X_i ; n – количество элементов в изделии; ΔN – отклонение от номинального значения величины выходного параметра N .

Переход от погрешностей $\Delta N/N$ и $\Delta X_i/X_i$ к допускам на параметры δ_N и δ_{X_i} даётся уравнением:

$$\delta_N^2 = \sum_{i=1}^n A_{X_i}^2 \delta_{X_i}^2. \quad (3.7)$$

Трудоемкость и затраты времени при проведении граничных испытаний с использованием компьютерной системы схемотехнического моделирования MicroCAP 8 значительно меньше, чем при обычных испытаниях. Намного легче производить изменение параметров элементов. Выдача напряжений и токов для всех элементов, а также построение графиков их частотных и временных зависимостей производится на экране монитора практически мгновенно. Кроме того, при использовании компьютерного моделирования модели являются виртуальными. Поэтому исключаются затраты на изготовление образца для испытаний, а также не требуется производить замену элементов при их отказе.

Справедливости ради, следует отметить и трудности использования компьютерного моделирования, связанные с ограниченностью количества математических моделей элементов в библиотеке MicroCAP 8, а также с ограничением максимального количества элементов в исследуемых моделях. Однако в перспективе во многих случаях испытания на компьютерных моделях вытеснят обычные испытания.

3.2.4 Задание на работу

а) отобразить режим работы математической модели стабилизатора напряжения на 18В на экране монитора компьютера и добиться нормального функционирования этой модели в системе MicroCAP 8;

б) в системе MicroCAP 8 провести граничные испытания для оценки запаса параметрической надежности применительно к математической модели стабилизатора напряжения на 18В бортовой (самолётной) радиостанции. В качестве параметров граничных испытаний выбрать напряжение питания V_1 , изменяемое от 24В до 30В и температуру окружающей среды, изменяемую от -60°C до $+60^{\circ}\text{C}$. В качестве изменяемых входных параметров выбрать сопротивления резисторов R_i , указанных преподавателем. В области безотказной

работы выходное напряжение на резисторе R_{11} не должно превышать граничных значений $18\text{В} \pm 5\%$ ($\pm 0.9\text{В}$). Для резисторов R_i построить графики, отображающие результаты граничных испытаний стабилизатора напряжения при номинальном напряжении питающей сети $U_1 = 27\text{В}$ и изменении температуры окружающей среды, и графики, отображающие результаты граничных испытаний при изменении напряжения питания U_1 от 24В до 30В при температуре окружающей среды $+27^\circ\text{С}$;

в) по результатам граничных испытаний вычислить коэффициенты A_{Ri} влияния изменения сопротивлений R_i на выходное напряжение $U_{R_{11}}$ на резисторе R_{11} , заменив в формуле (3.5) R_1 на R_i ;

г) составить уравнение погрешностей для $\delta_{U_{R_{11}}}$ и рассчитать величину $\delta_{U_{R_{11}}}$, задавшись допусками δ_{Ri} (5%, 10% или 20%). Величины δ_{Rj} при $i \neq j$ принять равными нулю.

3.2.5 Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Описание методики и проведение граничных испытаний.
3. Графики, отображающие результаты граничных испытаний, вычисление коэффициентов A_{Ri} . Составленное уравнение погрешностей для $\delta_{U_{R_{11}}}$.
4. Выводы по работе.

3.2.6 Перечень контрольных вопросов, которые могут быть заданы во время защиты отчёта по работе

1. Что такое вероятность безотказной работы?
2. Какие виды отказов учитывают при расчёте полной вероятности безотказной работы?
3. Что такое полная вероятность безотказной работы?
4. Что такое параметрическая надёжность?
5. В чём суть метода граничных испытаний?
6. Каковы возможности использования результатов граничных испытаний?
7. Как определяют коэффициенты влияния по результатам граничных испытаний?
8. Как составить уравнение погрешностей?

3.3 Функциональные испытания математической модели радиоэлектронного устройства в системе MicroCAP 8 с использованием метода планирования полного факторного эксперимента

3.3.1 Цели работы

- обучение студентов составлению планов полного факторного эксперимента (ПФЭ);
- обучение студентов проведению функциональных испытаний математической модели РЭУ в системе MicroCAP 8 с использованием метода планирования полного факторного эксперимента при изменении температуры, напряжения питания и параметров элементов в процессе эксплуатации;
- обучение студентов обработке результатов ПФЭ с целью получения математического описания функционирования РЭУ в виде полинома, дающего зависимость выходного параметра РЭУ от первичных параметров.

3.3.2 Общие сведения о планировании факторного эксперимента и его применении при функциональных испытаниях

При эксплуатации радиоэлектронного устройства непрерывно меняется его состояние, характеризуемое совокупностью выходных параметров и первичных параметров. При этом важно поддерживать **работоспособное состояние** (работоспособность), то есть состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации [15]. Обычно параметры, численные значения которых определяют, в конечном счёте, работоспособность объекта, называют **выходными параметрами**. Параметры, численные значения которых влияют на значения выходных параметров, называют **первичными параметрами**. Для усилителя электрических сигналов, например, одним из выходных параметров может быть величина амплитуды выходного напряжения, а первичными параметрами – амплитуда входного напряжения, величина напряжения питания, температура окружающей среды, численные значения параметров элементов (резисторов, конденсаторов, транзисторов и т.д.).

Изменение состояния РЭУ при эксплуатации из-за изменения параметров элементов происходит непрерывно под действием процессов старения, а также при появлении дефектов, повреждений и отказов. Изменение состояния РЭУ из-за условий эксплуатации происходит при изменении температуры, напряжения питания и величин напряжения входных сигналов и т.д.

В инженерной практике часто встречаются случаи, когда трудно получить математическую модель в виде аналитической зависимости выходного

параметра от значений первичных параметров (значений параметров элементов, температуры, напряжений и т.д.). Особенно нелегко получить математическую модель для сложных устройств; устройств, содержащих нелинейные элементы; устройств, принцип работы которых недостаточно изучен.

В этом случае устройство удобно представить как «чёрный ящик» (рисунок 3.11), преобразующий входные параметры ($x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$) в выходной параметр y . Зависимости выходного параметра от значений первичных параметров определяют экспериментально.

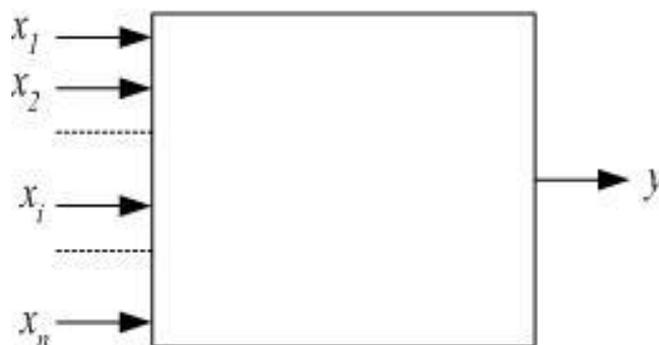


Рисунок 3.11 – Представление РЭУ в виде «чёрного ящика»

К экспериментам, предназначенным для получения математической регрессионной (полиномиальной) модели, дающей зависимость выходного параметра РЭУ от первичных параметров, относятся: полный факторный активный эксперимент, дробный факторный эксперимент (ДФЭ) и т.п. Смысл этих экспериментов состоит в том, чтобы получить разложение неизвестной функции в ряд Тейлора экспериментальным методом. При этом получают зависимость выходного параметра в среднем от изменения конечного числа переменных при наличии не учитываемых или не контролируемых факторов (переменных). Модель, полученная в результате таких экспериментов, дает обычно хорошие результаты по точности расчета в ограниченной области значений и значительно лучшие, чем получающиеся при использовании универсальных эмпирических формул.

В результате эксперимента должны быть найдены коэффициенты аппроксимирующего полинома $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ в соответствии с выражением [12-14, 20, 22- 24]:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2. \quad (3.8)$$

Коэффициенты полинома находят по измеренным значениям y точек, лежащих на поверхности, называемой **поверхностью отклика** и описываемой **уравнением регрессии** (3.8). В связи с ограниченным объемом эксперимента находят не точные значения коэффициентов, а их оценки. Простейшим, часто используемым полиномом, является полином первого порядка, когда учитываются только коэффициенты β_0 и β_j . Для такой модели, называемой линейной моделью, имеем:

$$\beta_i = \frac{\partial y}{\partial x_i}. \quad (3.9)$$

По величине коэффициентов аппроксимирующего полинома β_i можно оценить степень влияния факторов (первичных параметров x_i) на выходной параметр y . При $\beta_i > 0$ с увеличением первичного параметра x_i величина y возрастает. При $\beta_i < 0$ с увеличением первичного параметра x_i величина y уменьшается. Чем больше абсолютная величина β_i , тем сильнее влияние фактора x_i на величину y .

Коэффициенты регрессии для линейной модели являются составляющими градиента, который указывает направление кратчайшего пути в область оптимума.

Используется также неполный полином второго порядка, когда отбрасываются квадратичные члены β_{ii} , но учитываются коэффициенты взаимодействия β_{ij} , представляющие смешанную производную:

$$\beta_{ij} = \frac{\partial^2 y}{\partial x_i \partial x_j}. \quad (3.10)$$

В более сложных случаях используется полный квадратичный полином, содержащий квадратичные члены:

$$\beta_{ii} = 0.5 \frac{\partial^2 y}{\partial x_i^2}. \quad (3.11)$$

Полином может быть использован для аппроксимации функции в ограниченной области. Поэтому необходимо выбрать начальные значения x_{i0} и отклонения Δx_{it} , в пределах которых будет применяться полином, и которые могут быть реализованы при проведении опыта.

Задача планирования эксперимента состоит в том, чтобы с помощью специальных экспериментов получить представление о поверхности отклика и затем осуществить движение сразу по всем факторам в область оптимума.

Критерием или параметром оптимизации служит реакция (отклик) выходного параметра y , определяющего поведение изучаемой системы, на изменение первичных параметров x_i .

В РЭА оптимум часто соответствует номинальным значениям дестабилизирующих факторов x_{i0} , при которых степень влияния этих факторов на величину выходного параметра y наименьшая. Когда условия эксплуатации практически не меняются во времени, оптимальными значениями факторов x_{i0} часто выбирают такие значения, при которых величина выходного параметра y (например, коэффициента усиления усилителя) наибольшая.

Если исходная область эксперимента далека от области оптимума, то описание поверхности отклика с помощью линейных членов ряда (3.8), как правило, оказывается достаточно, так как в такой ситуации важно знать направление движения в область оптимума, а не точное описание поверхности отклика.

После постановки эксперимента осуществляется движение в эту область по направлению градиента (или в противоположном направлении) до тех пор, пока не наступит ухудшение критерия качества. Затем ставится новый эксперимент, опять осуществляется движение по направлению градиента и т.д. Поскольку в каждом эксперименте надо оценивать минимально возможное число неизвестных параметров, то эксперименты строят так, чтобы число их также было минимальным. Когда эксперименты ставят вблизи области оптимума, линейная модель оказывается существенно неадекватной. Задача планирования эксперимента также меняется. В этом случае необходимо оценивать параметры квадратичной модели для того, чтобы уточнить положение точки оптимума. Соответственно к экспериментам, по которым строится линейная модель, добавляются новые опыты для более подробного описания поверхности отклика. Таким образом, планирование эксперимента включает как процедуру поиска, так и сам процесс построения эксперимента. При этом большая часть экспериментов концентрируется в области оптимума, где и требуется более подробное описание поверхности отклика [13].

Обычно при планировании эксперимента от полинома в натуральном масштабе (3.8) переходят к нормированным безразмерным переменным x_i^* , что позволяет упростить запись плана эксперимента, обработку наблюдений и оценку результатов. Тогда полином имеет вид [13, 20]:

$$y = B_0 + \sum_{i=1}^n B_i x_i^* + \sum_{i < j} B_{ij} x_i^* x_j^* + \sum_{i=1}^n B_{ii} x_i^{*2}, \quad (3.12)$$

где $B_0, B_i, B_{ij}, B_{ii}, \dots$ – коэффициенты полинома при нормированных переменных, имеющие размерность величины y .

Нормированная переменная x_i^* получается из выражений:

$$x_i = x_{i0} \pm \Delta x_i, \quad (3.13)$$

$$x_i^* = \frac{\Delta x_i}{|\Delta x_i|}, \quad (3.14)$$

где x_{i0} – среднее значение переменной, относительно которого при эксперименте осуществляется отклонение параметра.

Как видно, переменные x_i^* могут принимать только два значения: +1 или -1. Для радиоэлектронных устройств, описываемых зависимостью (3.8), практически важно знать, как ведет себя схема в окрестностях номинальных (расчетных) значений параметров радиоэлементов x_{i0} . Поэтому наиболее разумным способом расположения экспериментальных точек в факторном пространстве является их равномерное рассредоточение около номинальной (исходной, нулевой). Последнее особенно очевидно, когда у исследователя отсутствуют априорные сведения о поведении функции (3.8) в обозреваемой факторной области.

Рассмотрим устройство, характеризуемое двумя первичными факторами x_1, x_2 с номинальными значениями факторами x_{10}, x_{20} . Варьируя в процессе

эксперимента нормированные переменные (нормированные факторы) x_i^* на двух уровнях, факторное пространство для $k = 2$ можно представить в виде квадрата (рисунок 3.12, а).

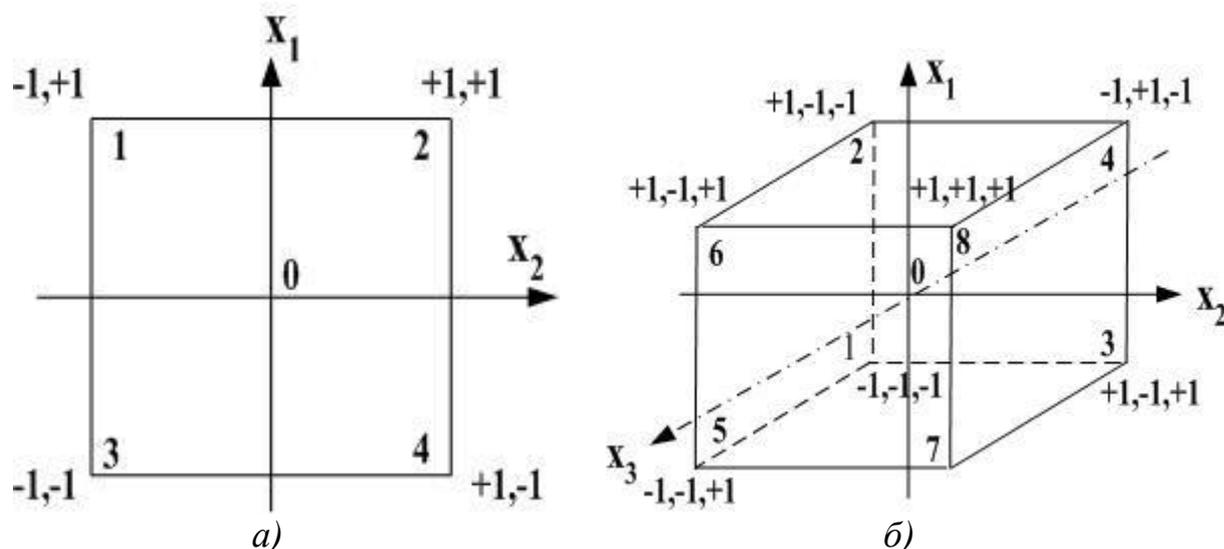


Рисунок 3.12 – Пространственные изображения планирования эксперимента для устройств, характеризуемых двумя (а) и тремя (б) первичными факторами

Для устройства, характеризуемого тремя первичными факторами x_1, x_2, x_3 с номинальными значениями факторами x_{10}, x_{20}, x_{30} , факторное пространство для $k = 3$ можно представить в виде куба (рисунок 3.12, б) [12-14].

Восемь экспериментальных точек в вершинах куба соответствуют всевозможным сочетаниям нормированных уровней факторов. Тем самым обеспечивается рациональный «обзор» факторного пространства в окрестности номинальной точки, соответствующей началу координат.

Правило перехода от коэффициентов B , которые получаются из опыта, к коэффициентам β в натуральном масштабе при использовании полиномов первого порядка эти правила достаточно простые [13, 20]:

$$\beta_i = \frac{B_i}{|\Delta x_i|}; \quad \beta_0 = B_0 + \sum_i -\frac{B_i}{\Delta x_i} x_{i0}. \quad (3.15)$$

Иногда используют **насыщенный план** факторного эксперимента, в котором количество переменных точно соответствует количеству опытов. Насыщенный план обладает рядом ограничений, обусловленных тем, что в нем нет избыточности. Поэтому в эксперимент обычно целесообразно вводить избыточность, то есть увеличение количества опытов по отношению к количеству переменных, для того чтобы кроме вычисления коэффициентов линейного приближения иметь возможность также оценить ошибку эксперимента, проверить адекватность принятой модели (полинома) результатам эксперимента, оценить значимость коэффициентов полинома. При этом происходит переход к ПФЭ или к ДФЭ.

При оценке значимости коэффициента решается вопрос о необходимости использования при расчете не только коэффициентов B_i при каждой из переменных, но и коэффициентов, показывающих взаимодействие переменных, т.е. существенность влияния тех коэффициентов β_{ij} или B_{ij} , которые стоят при произведениях переменных.

Наибольшую избыточность в опыт можно внести, осуществляя его 2^n раз ($N = 2^n$), поскольку при этом комбинации изменений переменных не будут повторяться. Матрица планирования такого эксперимента для трех переменных приведена в таблице 3.1. Такие планы называют планами типа 2^n или планами ПФЭ. Для вычисления коэффициентов используются выражения [20]:

$$B_i = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N y_m x_{im}^* ; \quad B_0 = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N x_0^* y_m = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N y_m \quad (3.16)$$

Таблица 3.1 – Матрица планирования ПФЭ 2^n для $n = 3$ (ПФЭ 2^3)

m	x_1^*	x_2^*	x_3^*	x_0^*	$m_{\text{оп}}$	$x_1^* x_2^*$	$x_1^* x_3^*$	$x_2^* x_3^*$	$x_1^* x_2^* x_3^*$	x_i^{*2}	y_m
1	-1	-1	-1	+1	7	+1	+1	+1	-1	+1	y_1
2	+1	-1	-1	+1	2	-1	-1	+1	+1	+1	y_2
3	-1	+1	-1	+1	5	-1	+1	-1	+1	+1	y_3
4	+1	+1	-1	+1	3	+1	-1	-1	-1	+1	y_4
5	-1	-1	+1	+1	4	+1	-1	-1	+1	+1	y_5
6	+1	-1	+1	+1	6	-1	+1	-1	-1	+1	y_6
7	-1	+1	+1	+1	8	-1	-1	+1	-1	+1	y_7
8	+1	+1	+1	+1	1	+1	+1	+1	+1	+1	y_8

Дисперсия коэффициентов B_i :

$$D B_i = \frac{D y}{N} ; \quad N = 2^n \quad (3.17)$$

обратно пропорциональна числу опытов N . При избыточности число опытов N увеличивается, что в соответствии с формулой (3.17), приводит к улучшению точности определения коэффициентов B_i .

Рассматриваемый план в соответствии с теорией эксперимента рандомизирован, поскольку в нем переменные изменяются в разных сочетаниях, и опыты производятся не в последовательности строк, а в случайной последовательности, отображенной в столбце $m_{\text{оп}}$. Под рандомизацией здесь понимается уравнивание влияния внешних факторов на результаты эксперимента.

Избыточность можно использовать для увеличения количества вычисляемых коэффициентов, т.е. для увеличения количества членов полинома, и для статистического анализа полинома и качества эксперимента.

В связи с тем, что имеется 2^n опытов, можно вычислить 2^n коэффициентов полиномиальной модели, то есть значительно больше, чем число переменных n . Помимо членов линейного приближения в полином могут быть введены члены, которые описывают взаимодействие, то есть коэффициенты при произведениях переменных в разных сочетаниях. Из таблицы 3.1 следует, что сочетания символов «+» и «-» в столбцах при произведениях не повторяют сочетания в столбцах для переменных. Следовательно, имеется возможность вычисления коэффициентов взаимодействия в рассматриваемом примере при четырех произведениях. Для этого используется соответствующее правило, например, для взаимодействия 2-го порядка [20]:

$$B_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N x_{im}^* x_{jm}^* y_m. \quad (3.18)$$

Таким образом, по результатам ПФЭ можно получить неполный полином 2-го порядка. Очевидно, что получение коэффициентов при x_i^{*2} из результатов ПФЭ невозможно, так как сочетание символов в столбце x_i^{*2} будет таким же, как в столбце фиктивной переменной x_0^* , которая отображает необходимость вычисления постоянного члена полинома.

Для рассматриваемого примера при постановке ПФЭ необходимо провести восемь вариантов опытов, последовательность проведения которых рандомизируется в соответствии со столбцом $m_{оп}$. В столбце y_m записываются замеренные значения выходного параметра математической модели радиоэлектронного устройства. По полученным значениям y_m могут быть вычислены $B_0, B_1, B_2, B_3, B_{12}, B_{13}, B_{23}, B_{123}$. При этом избыточность использована полностью.

В другом варианте по этим же результатам эксперимента могут быть вычислены только B_0, B_1, B_2, B_3 . Тогда будет избыточность, которая может быть использована для статистического анализа полинома и качества эксперимента.

Использование избыточности, содержащейся в ПФЭ, для увеличения количества вычисляемых коэффициентов, особенно при большом числе переменных, обычно нецелесообразно. В связи с этим, важное место занимают методы сокращения количества опытов по сравнению с ПФЭ, которые должны предусматривать единообразие и объективную оценку последствий такого сокращения, например методика планирования ДФЭ.

Если количество экспериментов сделать меньше чем 2^n , то целый ряд коэффициентов, описывающих взаимодействие в полиноме, не может быть вычислен. Когда эти взаимодействия значимы, они отображаются в других коэффициентах, и происходит так называемое смешивание. Поэтому основ-

ная задача планирования ДФЭ состоит в составлении такого варианта плана, который бы предусматривал значительное уменьшение количества опытов по сравнению с ПФЭ, но приводил бы к смешиванию коэффициентов, которые заведомо не должны быть значимыми.

3.3.3 Пример получения полиномиальной модели с проверкой адекватности модели и значимости коэффициентов

Требуется получить полиномиальную модель для индуктивности L многослойной катушки с числом витков равным 100, которая зависит в основном от трех параметров, определяемых конструкцией: диаметром каркаса катушки D , толщиной намотки b и высотой намотки l . Требуется также провести статистический анализ полинома и качества эксперимента с проверкой значимости членов полинома и адекватности полинома результатам опыта [20].

Для решения задачи вначале с помощью формулы (3.8) необходимо найти коэффициенты β_0 , β_D , β_b и β_l и получить полином:

$$L = \beta_0 + \beta_D D + \beta_b b + \beta_l l. \quad (3.8a)$$

Требуется выбрать номинальные или начальные значения D_0 , b_0 и l_0 и отклонения ΔD , Δb и Δl , которые будут использованы при эксперименте для нахождения влияния каждого из параметров. Обычно при эксперименте берутся такие отклонения, которые определяются максимально допустимыми значениями. Пусть:

$$\begin{aligned} D_0 &= 0.5 \text{ см}; b_0 = 0.5 \text{ см}; l_0 = 1 \text{ см}; \\ \Delta D &= \pm 0.1 \text{ см}, \Delta b = \pm 0.1 \text{ см}; \Delta l = \pm 0.1 \text{ см}. \end{aligned} \quad (3.19)$$

Для эксперимента можно изготовить восемь катушек, у которых в разных сочетаниях в соответствии с таблицей 3.1 диаметр D составляет 0.4 см (что соответствует -1) или 0.6 см (что соответствует $+1$); высота намотки l равна 0.4 или 0.6 см; толщина намотки b равна 0.9 или 1.1 см.

Затем производится измерение индуктивности, что позволяет заполнить столбец y_m . Этих замеров достаточно для вычисления восьми коэффициентов полинома. Предполагая слабое влияние взаимодействий, ограничимся вычислением коэффициентов линейного приближения. Опуская результаты замеров и вычисления по формулам (3.16), приведем в окончательном виде полином, соответствующий (3.12), с нормированными переменными для $W = 100$:

$$L = 68 + 7b^* + 12D^* - 5l^*, \quad (3.12a)$$

где b^* , D^* и l^* – нормированные переменные, которые могут принимать значения $+1$ или -1 . Избыточность будет использована для статистического анализа полинома и качества эксперимента.

Воспользовавшись (3.15) и учтя (3.19), перейдем от полинома с нормированными переменными (3.12a) к полиному в натуральном масштабе:

$$\beta_0 = B_0 + \sum_i -\frac{B_i}{\Delta x_i} x_{i0} = 68 - \frac{7}{0.1} \cdot 0.5 - \frac{12}{0.1} \cdot 0.5 + \frac{5}{0.1} \cdot 1 = 23;$$

$$\beta_i = \frac{B_i}{|\Delta x_i|}; \beta_b = \frac{b_0}{|\Delta b|} = \frac{7}{|0.1|} = 70; \beta_D = \frac{D_0}{|\Delta D|} = \frac{12}{|0.1|} = 120; \beta_l = \frac{l_0}{|\Delta l|} = \frac{-5}{|0.1|} = -50;$$

$$L = 23 + 70b + 120D - 50l \text{ [мкГн]}. \quad (3.8б)$$

Пользуясь (3.8б), можно производить расчет катушек с разным числом витков и разными размерами, но вблизи от указанных выше номинальных значений с возможными отклонениями от них примерно на $\pm(24...30)\%$. Получающиеся при этом результаты будут гораздо более точными, чем при использовании универсальной формулы.

Для анализа точности и стабильности таких катушек удобнее применять уравнение отклонений:

$$\frac{\Delta y}{y_0} = \sum_{i=1}^n k_{i \text{ ОТН}} \frac{\Delta x_i}{x_{i0}}, \quad (3.20)$$

где Δy – отклонение значения выходного параметра от номинальной величины y_0 ; Δx_i – отклонение значения i -ого исходного параметра от номинальной величины x_{i0} ; $k_{i \text{ ОТН}}$ – коэффициенты в уравнении отклонений, вычисляемые по формуле:

$$k_{i \text{ ОТН}} = \frac{B_i}{|\Delta x_i|} \cdot \frac{x_{i0}}{y_0} = \beta_i \frac{x_{i0}}{y_0}; \quad (3.21)$$

$$k_{b \text{ ОТН}} = \beta_b \frac{b_0}{y_0} = 70 \cdot \frac{0.5}{68} = 0.52; \quad k_{D \text{ ОТН}} = \beta_D \frac{D_0}{y_0} = 120 \cdot \frac{0.5}{68} = 0.88;$$

$$k_{l \text{ ОТН}} = \beta_l \frac{l_0}{y_0} = -50 \cdot \frac{1}{68} = -0.74.$$

Воспользовавшись выражением (3.20), получим:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \sum_{i=1}^n k_{i \text{ ОТН}} \frac{\Delta x_i}{x_{i0}} = 0.52 \cdot \frac{\Delta b}{b_0} + 0.88 \cdot \frac{\Delta D}{D_0} - 0.74 \cdot \frac{\Delta l}{l_0}. \quad (3.20a)$$

Эксперимент всегда сопровождается ошибками. Эта ошибка может характеризоваться дисперсией $D_B(y)$, которую можно назвать дисперсией воспроизводимости. Наиболее эффективна методика определения дисперсии воспроизводимости, предполагающая γ -кратное повторение опыта каждой из строк факторного эксперимента по матрице планирования (таблица 3.1). Обычно γ равно 2 или 3. Причем повторные опыты в каждой из строк располагаются в случайной последовательности с другими, то есть план остается рандомизированным. Матрица планирования ПФЭ 2^n для $n = 3$ (ПФЭ 2^3) в отличие от таблицы 3.1 будет иметь $\gamma + 1$ дополнительных столбцов (в таблице 3.2 $\gamma = 2$), причём численные значения $y_m \text{ РАСЧ}$ в правом крайнем столбце получают для выходного параметра после расчета по полиному (3.12a).

Таблица 3.2 – Матрица планирования ПФЭ 2^n для $n = 3$ и $\gamma = 2$ (ПФЭ 2^3)

m	x_1^*	x_2^*	x_3^*	x_0^*	.....	y_{m1}	y_{m2}	$m(y_{m\gamma})$ для $\gamma = 2$	y_m РАСЧ
1	-1	-1	-1	+1	.....	y_{11}	y_{12}	$m(y_{1\gamma}) = (y_{11} + y_{12})/2$	y_1 РАСЧ
2	+1	-1	-1	+1	.....	y_{21}	y_{22}	$m(y_{2\gamma}) = (y_{21} + y_{22})/2$	y_2 РАСЧ
3	-1	+1	-1	+1	.....	y_{31}	y_{32}	$m(y_{3\gamma}) = (y_{31} + y_{32})/2$	y_3 РАСЧ
4	+1	+1	-1	+1	.....	y_{41}	y_{42}	$m(y_{4\gamma}) = (y_{41} + y_{42})/2$	y_4 РАСЧ
5	-1	-1	+1	+1	.....	y_{51}	y_{52}	$m(y_{5\gamma}) = (y_{51} + y_{52})/2$	y_5 РАСЧ
6	+1	-1	+1	+1	.....	y_{61}	y_{62}	$m(y_{6\gamma}) = (y_{61} + y_{62})/2$	y_6 РАСЧ
7	-1	+1	+1	+1	.....	y_{71}	y_{72}	$m(y_{7\gamma}) = (y_{71} + y_{72})/2$	y_7 РАСЧ
8	+1	+1	+1	+1	.....	y_{81}	y_{82}	$m(y_{8\gamma}) = (y_{81} + y_{82})/2$	y_8 РАСЧ

Среднее значение $m(y_{m\gamma})$ в каждой m -ой строке:

$$m \ y_{m\gamma} = \frac{1}{\gamma} \sum_{p=1}^{\gamma} y_{mp}, \quad (3.22)$$

где m – номер строки; p – номер опыта в строке.

Строчная дисперсия:

$$D \ y_{m\gamma} = \frac{1}{\gamma - 1} \sum_{p=1}^{\gamma} \left[y_{mp} - m \ y_{m\gamma} \right]^2. \quad (3.23)$$

Исходя из строчной дисперсии, находим дисперсию воспроизводимости:

$$D_B \ y = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N D \ y_{m\gamma}. \quad (3.24)$$

Зная дисперсию воспроизводимости, можно найти дисперсию полиномиальных коэффициентов:

$$D(B_i) = D_B(y)/N. \quad (3.25)$$

Исходя из значений дисперсии воспроизводимости, можно дать статистическую оценку **значимости коэффициентов** с помощью критерия Стьюдента. Следует отбрасывать те коэффициенты, значение которых соизмеримо с ошибками эксперимента. При этом как бы высказывается гипотеза о незначимости коэффициента, т.е. гипотеза о том, что его действительное значение близко к нулю или равно ему, а его конкретное значение, полученное из результатов опыта, определяется статистическими закономерностями влияния погрешности измерения при малом их количестве. Как известно, по критерию Стьюдента случайная величина t вычисляется по формуле:

$$t = \frac{B_i}{\sqrt{D_B \ y / N}}, \quad (3.26)$$

где N – число опытов (строк); $D_B(y)$ – дисперсия разового определения y , т.е. дисперсия воспроизведения, которая точно неизвестна и для которой получена только оценка.

Если $m(B_i) = 0$, т.е. коэффициент незначим, то величина t распределена по закону Стьюдента и имеет $M = (N \cdot \gamma - N)$ степеней свободы. Используя таблицу 3.3 распределения Стьюдента и задавшись уровнем значимости α (УЗ), т.е. вероятностью того, что коэффициент будет принят значимым, хотя в действительности он незначим, можно найти соответствующее значение величины t , которое назовем $t_{\text{ТАБЛ}}(\text{УЗ})$ и которое является функцией уровня значимости. Тогда из выражения (3.26) следует, что если:

$$B_i < t_{\text{ТАБЛ}} \text{ УЗ} \sqrt{\frac{D_B y}{N}}, \quad (3.27)$$

то коэффициент следует признать незначимым. Причем с вероятностью, равной уровню значимости, незначимый коэффициент будет признан значимым. Соответственно, если:

$$B_i > t_{\text{ТАБЛ}} \text{ УЗ} \sqrt{\frac{D_B y}{N}}, \quad (3.28)$$

то коэффициент следует признать значимым. Очевидно, что имеется конечная вероятность того, что значимый коэффициент благодаря случайному сочетанию результатов будет признан незначимым (рисунок 3.13). Однако чем больше значимость коэффициента, тем меньше вероятность такого ошибочного решения. После проверки значимости в полиноме оставляют только те коэффициенты, которые признаны значимыми.

В таблице приведены значения квантилей $|t(M)|_{1-\alpha} = t_{\text{ТАБЛ}}(\text{УЗ})$ в зависимости от числа степеней свободы M и уровня значимости (УЗ), то есть вероятности α .

Обработав результаты опытов, приведённые в таблице 3.2, найдем:

- по формуле (3.22) среднее значение $m(y_{m\gamma})$ в каждой m -ой строке;
- по формуле (3.23) строчную дисперсию $D(y_{m\gamma})$;
- по формуле (3.24) находим дисперсию воспроизводимости $D_B(y)$;

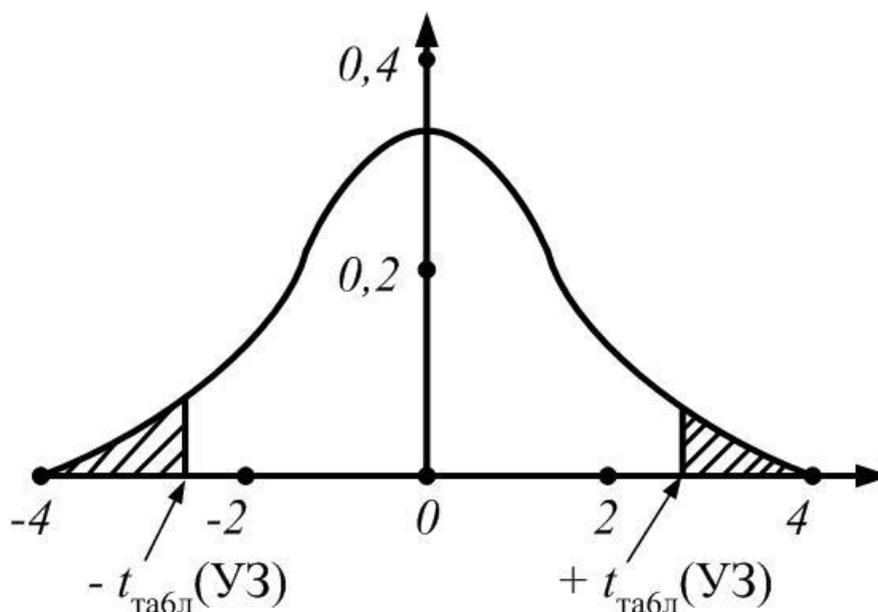
опуская вычисления, приведём значение этой дисперсии:

$$D_B(y) = D_B(L)_{W=100} = 8.1.$$

В редких случаях дисперсия воспроизводимости может быть известна априорно, например, если она определяется точностью измерительного прибора, с помощью которого измеряется y . При этом предполагается, что отклонения переменных имеют очень высокую точность. В реальных условиях точность, характеризующая опыт, неизвестна, и должна быть выработана методика вычисления дисперсии воспроизводимости из самого опыта;

Таблица 3.3 – Распределение Стьюдента [16]

Вероятность $P |t| > t_{M_{1-\alpha}}$								
$M \backslash \alpha$	0.80	0.40	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.001
1	0.325	1.376	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	636.619
2	0.289	1.061	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	31.598
3	0.277	0.978	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	12.941
4	0.271	0.941	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	8.610
5	0.267	0.920	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	6.859
6	0.265	0.906	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.959
7	0.263	0.896	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	5.405
8	0.262	0.889	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	5.041
9	0.261	0.883	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.781
10	0.260	0.879	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.587
11	0.260	0.876	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.437
12	0.259	0.873	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	4.318
13	0.259	0.870	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	4.221
14	0.258	0.863	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	4.140
15	0.258	0.866	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	4.073
16	0.258	0.865	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	4.015



по значениям M и уровню значимости α определяют $t_{\text{ТАБЛ}}(\text{УЗ})$; площадь заштрихованной области пропорциональна вероятности того, что отброшенный член полинома является значимым

Рисунок 3.13 – Вид распределения Стьюдента при числе степеней свободы $M = 3$

- вычисляем среднее квадратическое отклонение:

$$\sigma_y = \sqrt{D_B y}; \quad (3.29)$$

$$\sigma_{L_{w=100}} = \sqrt{D_B L_{w=100}} = 2.8,$$

что составляет около 3% от номинального значения индуктивности. Как видно, «шум» эксперимента относительно небольшой и опыт воспроизводим с достаточной для практики точностью;

- по формуле (3.25) находим дисперсию полиномиальных коэффициентов:

$$D B_i = \frac{D_B y}{N} = \frac{D_B L_{w=100}}{N} = \frac{8.1}{8} = 1.01;$$

- вычисляем среднее квадратическое отклонение коэффициентов:

$$\sigma(B_i) = [D(B_i)]^{0.5}; \quad (3.30)$$

оно составляет примерно 1.005. Значения коэффициентов уравнения (3.8б) существенно больше. Следовательно, можно полагать, что все оставшиеся коэффициенты полинома значимы;

- дополнительно производим проверку значимости с использованием критерия Стьюдента. Для уровня значимости, равного $\alpha = 0.05$ и степеней свободы:

$$M = (N \cdot \gamma - N) = 8 \cdot 2 - 8 = 8;$$

из таблицы 3.3 находим $t_{\text{ТАБЛ}}(УЗ) = 2.306$.

Тогда

$$t_{\text{ТАБЛ}} \text{ УЗ} \sqrt{\frac{D_B y}{N}} = t_{\text{ТАБЛ}} \alpha=0.05; M=8 \sqrt{\frac{D_B y}{N}} = 2.306 \sqrt{\frac{8.1}{8}} = 2.32.$$

Полученное число 2.32 меньше коэффициентов B_i полинома (3.12а):

$$B_0 = 68; B_1 = 7; B_2 = 12; B_3 = 5.$$

Это, согласно (3.28), является подтверждением того, что все коэффициенты полинома значимы;

- производим проверку адекватности. Для проверки адекватности должна быть сохранена избыточность. Сущность ее состоит в сравнении результатов эксперимента для разных сочетаний переменных $m(y_{m\gamma})$, взятых из таблицы 3.2 с теми результатами, которые при том же сочетании переменных будут получены для параметра после расчета по полиному (3.12а) и занесены в правый крайний столбец этой таблицы. Приведём результаты расчета выходного параметра $y_m \text{ РАСЧ}$ по этому полиному с нормированными переменными:

$$y_m \text{ РАСЧ} = L_m \text{ РАСЧ} = 68 + 7b^* + 12D^* - 5l^*;$$

$$y_{1 \text{ РАСЧ}} = L_{1 \text{ РАСЧ}} = 68 + 7 \cdot (-1) + 12 \cdot (-1) - 5 \cdot (-1) = 54;$$

$$y_{2 \text{ РАСЧ}} = L_{2 \text{ РАСЧ}} = 68 + 7 \cdot (+1) + 12 \cdot (-1) - 5 \cdot (-1) = 68;$$

$$y_{3 \text{ РАСЧ}} = L_{3 \text{ РАСЧ}} = 68 + 7 \cdot (-1) + 12 \cdot (+1) - 5 \cdot (-1) = 78;$$

$$y_{4 \text{ РАСЧ}} = L_{4 \text{ РАСЧ}} = 68 + 7 \cdot (+1) + 12 \cdot (+1) - 5 \cdot (-1) = 92;$$

$$y_{5 \text{ РАСЧ}} = L_{5 \text{ РАСЧ}} = 68 + 7 \cdot (-1) + 12 \cdot (-1) - 5 \cdot (+1) = 44;$$

$$y_{6 \text{ РАСЧ}} = L_{6 \text{ РАСЧ}} = 68 + 7 \cdot (+1) + 12 \cdot (-1) - 5 \cdot (+1) = 58;$$

$$y_{7 \text{ РАСЧ}} = L_{7 \text{ РАСЧ}} = 68 + 7 \cdot (-1) + 12 \cdot (+1) - 5 \cdot (+1) = 68;$$

$$y_{8 \text{ РАСЧ}} = L_{8 \text{ РАСЧ}} = 68 + 7 \cdot (+1) + 12 \cdot (+1) - 5 \cdot (+1) = 82.$$

Затем вычисляем дисперсию адекватности:

$$D_{\text{Ад}} y = \frac{1}{N-d} \sum_{m=1}^N \left[m y_{m\gamma} - y_{m \text{ РАСЧ}} \right]^2, \quad (3.31)$$

где $m(y_{m\gamma})$ – среднее значение результата эксперимента, взятое из m -ой строки таблицы 3.2, $y_{m \text{ РАСЧ}}$ – результаты расчета по полиному для того же сочетания переменных; d – количество членов, оставленных в полиноме.

Для $D_{\text{Ад}}(y)$ принимается $(N-d)$ степеней свободы, а для $D_{\text{В}}(y)$ берется $N \cdot (\gamma - 1)$ степеней свободы.

Для проверки адекватности, то есть проверки гипотез о равенстве дисперсий адекватности $D_{\text{Ад}}(y)$ и воспроизводимости $D_{\text{В}}(y)$, вычисляют случайную величину $F_{\text{Ад}}$ распределения Фишера:

$$F_{\text{Ад}} = \frac{D_{\text{Ад}} y}{D_{\text{В}} y}. \quad (3.32)$$

Адекватность полинома результатам опыта может быть установлена из таблицы 3.4 распределения Фишера при сравнении величины $F_{\text{Ад}}$ с $F_{\text{ТАБЛ}}$. В таблице приведены значения квантилей $F_{\text{ТАБЛ}}$ для вероятности $\alpha = 0.05$ (обычный шрифт) и для $\alpha = 0.01$ (жирный шрифт) в зависимости от числа степеней свободы M и M' : M – число степеней свободы для большей дисперсии, а M' – число степеней свободы для меньшей дисперсии.

По принятому уровню значимости α , т.е. вероятности того, что ошибочно будет отвергнута гипотеза о равенстве дисперсий, по известной функции распределения для F , из таблицы 3.4 находят значение $F_{\text{ТАБЛ}}$, с которым надлежит сравнивать результаты расчета по формуле (3.32). Если $F_{\text{Ад}} < F_{\text{ТАБЛ}}$, то принимается решение об адекватности полинома результатам опыта (рисунок 3.14).

Для рассматриваемого примера:

- количество членов, оставленных в полиноме $d = 4$;

- количество степеней свободы для дисперсии адекватности:

$$(N-d) = 8 - 4 = 4, \text{ т.е. } M' = 4;$$

- количество степеней свободы для дисперсии воспроизводимости:

$$N \cdot (\gamma - 1) = 8 \cdot (2 - 1) = 8, \text{ т.е. } M = 8;$$

- расчёт дисперсии адекватности по формуле (3.31) даёт $D_{\text{Ад}}(y) = 9.1$;

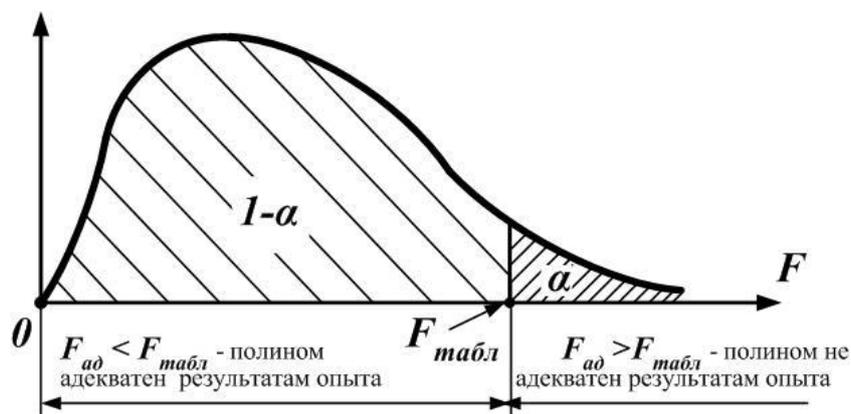
- расчёт критерия Фишера $F_{\text{Ад}}$ по формуле (3.32) даёт:

$$F_{\text{Ад}} = \frac{D_{\text{Ад}} y}{D_{\text{В}} y} = \frac{9.1}{8.1} = 1.12;$$

из таблицы 3.4 при уровне значимости $\alpha = 0.05$ с учетом того, что $M = 8$, а $M' = 4$, получаем $F_{\text{ТАБЛ}} = 6.04$.

Таблица 3.4 – Распределение Фишера [16]

$M' \backslash M$	1	2	3	4	5	6	7	8	10	16	∞
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.36	19.37	19.39	19.43	19.50
	98.49	99.00	99.17	99.25	99.30	9.33	99.34	99.36	99.40	99.44	99.50
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.88	8.84	8.78	8.69	8.53
	34.12	30.82	29.46	28.71	28.24	27.91	27.67	27.49	27.23	26.83	26.12
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	5.96	5.84	5.63
	21.20	18.00	16.69	15.94	15.52	15.21	14.93	14.80	14.54	14.15	13.46
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.505	4.95	4.88	4.82	4.74	4.60	4.36
	16.26	13.27	12.06	11.39	10.97	10.67	10.45	10.27	10.05	9.63	9.02
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.06	3.92	3.67
	13.74	10.92	9.78	9.15	8.75	8.47	8.26	8.10	7.87	7.52	6.88
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.63	3.49	3.23
	12.25	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	7.00	6.84	6.62	6.27	5.65
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.34	3.20	2.93
	11.26	8.65	7.59	7.01	6.63	6.37	6.19	6.03	5.82	5.43	4.86
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.13	2.98	2.71
	10.56	8.02	6.99	6.42	6.06	5.80	5.62	5.47	5.26	4.92	4.31
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	2.97	2.82	2.54
	10.04	7.56	6.55	5.99	5.04	5.39	5.21	5.06	4.85	4.52	3.91
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.86	2.70	2.40
	9.65	7.20	6.22	5.67	5.32	5.07	4.88	4.74	4.54	4.21	3.60
12	4.75	3.88	3.49	3.26	3.11	3.00	2.92	2.85	2.76	2.60	2.30
	9.33	6.93	5.95	5.41	5.06	4.82	4.65	4.59	4.30	3.93	3.38



площадь области α равна вероятности ошибочного решения о неадекватности, а площадь области $(1 - \alpha)$ равна вероятности ошибочного решения об адекватности

Рисунок 3.14 – Вид распределения Фишера, используемого для определения адекватности полинома результатам эксперимента, при сравнении дисперсий адекватности $D_{Ад}(y)$ и воспроизводимости $D_{В}(y)$

Как видно, $F_{\text{Ад}} = 1.12 < F_{\text{ТАБЛ}} = 6.04$. Следовательно, полином адекватен результатам опыта. Таким образом, с помощью ПФЭ 2^n для $n = 3$ получена полиномиальная модель, содержащая ограниченное количество значимых членов, адекватная результатам опыта.

3.3.4 Пример получения полиномиальной модели с помощью ПФЭ с вычислением коэффициентов взаимодействия 2-го порядка

Задание.

Требуется получить полиномиальную модель с помощью ПФЭ 2^n для $n = 3$ (ПФЭ 2^3) с вычислением коэффициентов взаимодействия 2-го порядка для выходного напряжения (точка 5) усилительного каскада. Схема усилительного каскада, подготовленная в программе схемотехнического моделирования MicroCAP 8, изображена на рисунке 3.15. При эксплуатации пределы изменения температуры окружающей среды T от -10°C до $+50^\circ\text{C}$, пределы изменения сопротивления нагрузки $R4$ от 40 до 80 Ом, а пределы изменения напряжения питания $V1$ от 22 до 24 В.

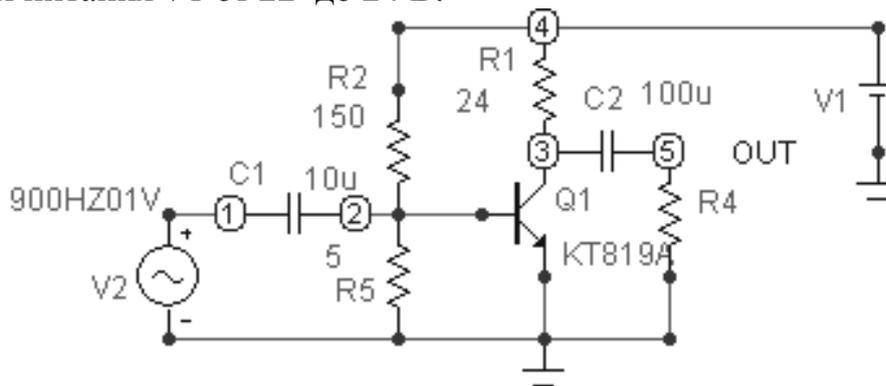


Рисунок 3.15 – Схема усилительного каскада с управлением по задающему воздействию (напряжению базы транзистора)

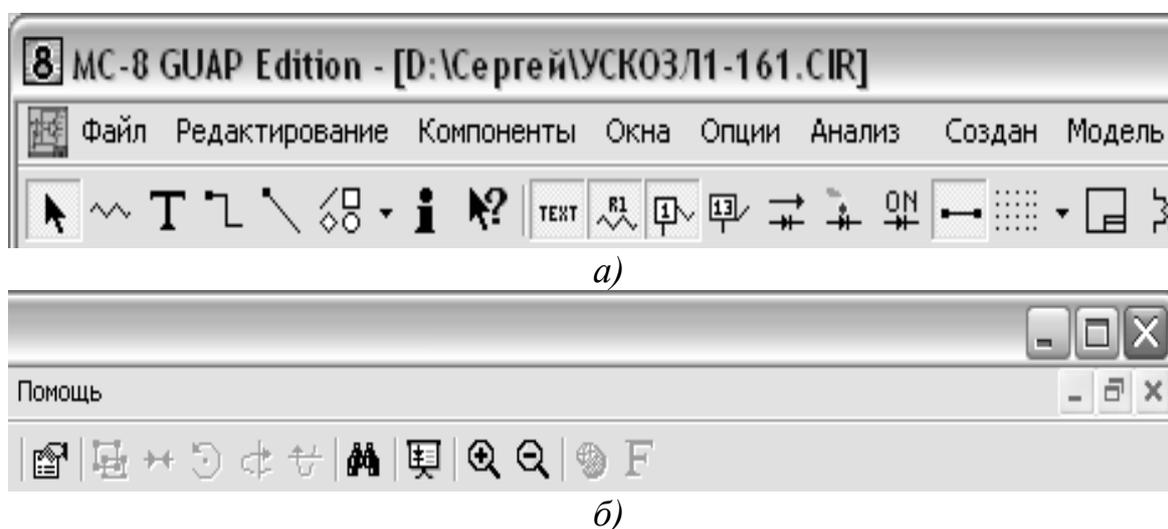
Ход работы.

Задаём значения параметров эксплуатации усилительного каскада в удобной для составления матрицы планирования форме: температуру окружающей среды $T_0 = +20^\circ\text{C}$, $\Delta T = \pm 30^\circ\text{C}$, напряжение питания $V1_0 = 23\text{В}$, $\Delta V1 = \pm 1\text{В}$, сопротивление нагрузки $R4_0 = 60\text{ Ом}$, $\Delta R4 = \pm 20\text{ Ом}$. Тогда параметру матрицы планирования $x_1^* = -1$ соответствует температура окружающей среды $T_{-1} = T_0 - \Delta T = -10^\circ\text{C}$, а параметру $x_1^* = +1$ соответствует температура $T_{+1} = T_0 + \Delta T = +50^\circ\text{C}$. Параметру $x_2^* = -1$ соответствует напряжение питания $V1_{-1} = V1_0 - \Delta V1 = 22\text{В}$, а параметру $x_2^* = +1$ соответствует напряжение $V1_{+1} = V1_0 + \Delta V1 = 24\text{В}$. Параметру $x_3^* = -1$ соответствует сопротивление

нагрузки $R_{4-1} = R_{40} - \Delta R_4 = 40 \text{ Ом}$, а параметру $x_3^* = +1$ соответствует сопротивление $R_{4+1} = R_{40} + \Delta R_4 = 80 \text{ Ом}$.

Подготовим в системе MicroCAP 8 схему, изображённую на рисунке 3.15, задав значения $V_1 = 22\text{В}$, $R_4 = 40 \text{ Ом}$ ($x_2^* = -1, x_3^* = -1$). Навыки работы в системе MicroCAP должны быть приобретены студентами в предыдущих курсах [23, 24]. Навыки работы в MicroCAP 8 изложены также в справочной литературе, например в [25]. Поэтому здесь порядок подготовки схемы не приводится.

Для получения численных значений амплитуды выходного напряжения в точке 5 усилительного каскада необходимо выполнить команду *Анализ / Переходные процессы...* (интерфейс, используемый в системе MicroCAP 8, изображён на рисунке 3.16). В результате появляется диалоговое окно задания параметров моделирования (рисунок 3.17).



a – левая часть; *б* – правая часть

Рисунок 3.16 – Интерфейс системы MicroCAP 8

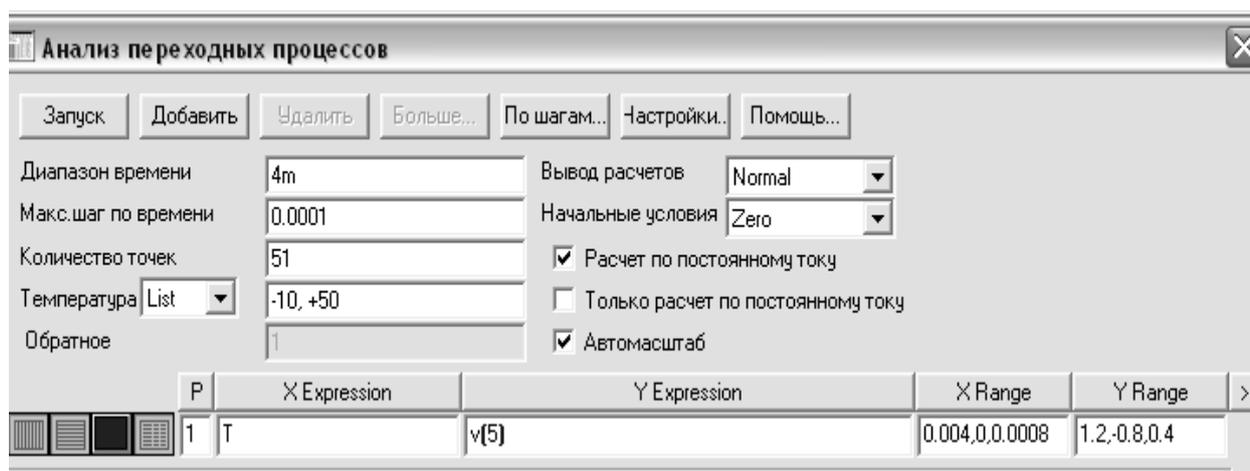
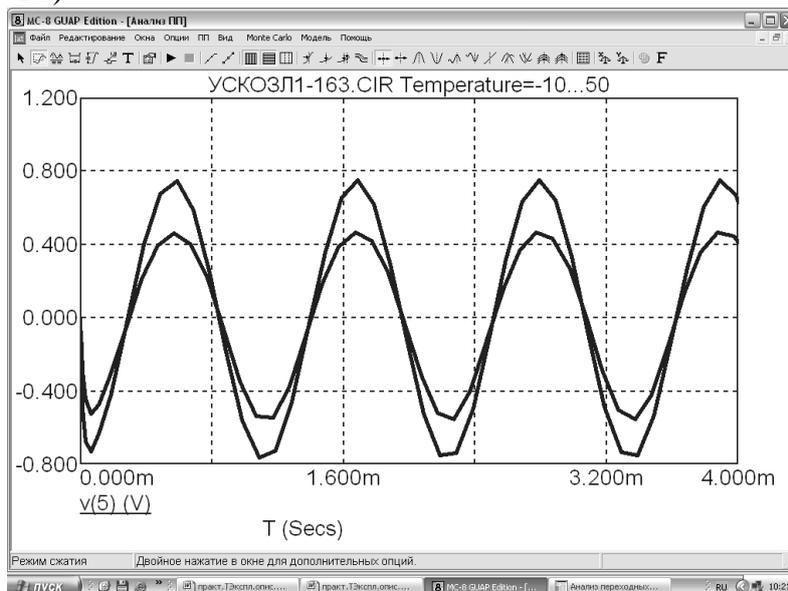


Рисунок 3.17 – Диалоговое окно задания параметров моделирования при анализе переходных процессов

Задаём:

- диапазон времени **4m** (4 миллисекунды); вывод расчётов **Normal**;
- максимальный шаг по времени **0.0001**; начальные условия **Zero** (нулевые);
- количество точек **51**; $\sqrt{\quad}$ Расчёт по постоянному току;
- температура List **-10, +50**; $\sqrt{\quad}$ Автомасштаб;
- квадрат первый слева: масштаб по оси X – линейный;
- квадрат второй слева: масштаб по оси Y – линейный;
- квадрат третий слева: цвет линии для графика функции – любой;
- квадрат четвертый слева: запись числовых значений по результатам моделирования в текстовом файле – кнопка отжата;
- в ячейке **P** – порядковый номер координатной плоскости для вывода графика функции – номер **1**;
- в ячейке **X Expression** определено выражение для оси X – время **T**;
- в ячейке **Y Expression** определено выражение для оси Y – значение напряжения в точке 5 схемы (выход усилительного каскада) – **v(5)**;
- в ячейках **X Range** и **Y Range** определяются диапазоны представления на координатной плоскости значений аргумента и функции, соответственно. Однако, поскольку в нашем случае активирована опция $\sqrt{\quad}$ Автомасштаб, то значения ячеек **X Range** и **Y Range** системой MicroCAP 8 игнорируются.

Для запуска моделирования переходных процессов необходимо нажать кнопку *Запуск*. В результате на экране появится окно с двумя графиками зависимости выходного напряжения (в точке 5) усилительного каскада для значений температуры окружающей среды -10°C и $+50^{\circ}\text{C}$ при $V_1 = 22\text{В}$, $R_4 = 40\text{ Ом}$ (рисунок 3.18).



температура окружающей среды -10°C ($x_1^* = -1$) и $+50^{\circ}\text{C}$ ($x_1^* = +1$);

$V_1 = 22\text{В}$ ($x_2^* = -1$); $R_4 = 40\text{ Ом}$ ($x_3^* = -1$)

Рисунок 3.18 – Графики зависимости выходного напряжения (точка 5) усилительного каскада

Выполним двойной щелчок на заголовке графиков **УСКОЗЛ1-163.CIR Temperature=-10...50**. В результате появляется диалоговое окно задания параметров оформления графиков *Свойства* (рисунок 3.19). В этом диалоговом окне можно сделать настройки, которые повышают удобство работы с графиками и помогают в последующем оформлении отчета. Выберем в диалоговом окне *Свойства* вкладку *Цвета, шрифты, линии*. На этой вкладке представлен список *Объекты* (рисунок 3.20). Редактирование типов, размеров и цветов элементов рисунка осуществляется при выборе соответствующего пункта из списка *Объекты*, например:

- редактирование типа, цвета и высоты шрифта текста;
- редактирование элементов координатной сетки;
- редактирование типа, цвета и высоты шрифта для меток на графике;
- редактирование толщины и цвета кривой и т.д.

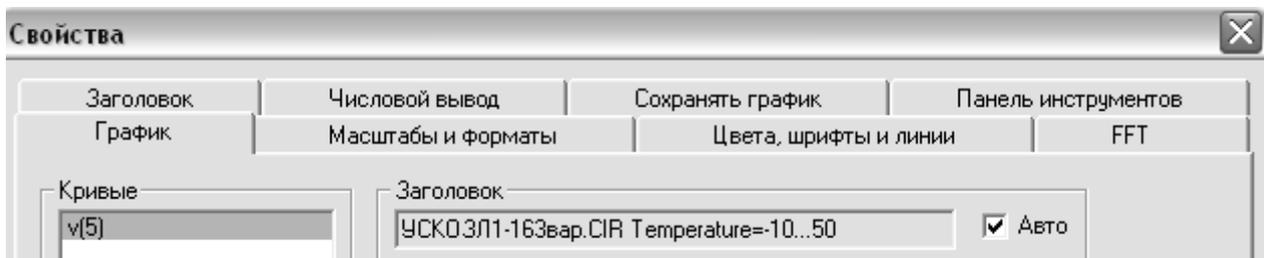


Рисунок 3.19 – Верхняя часть диалогового окна *Свойства*

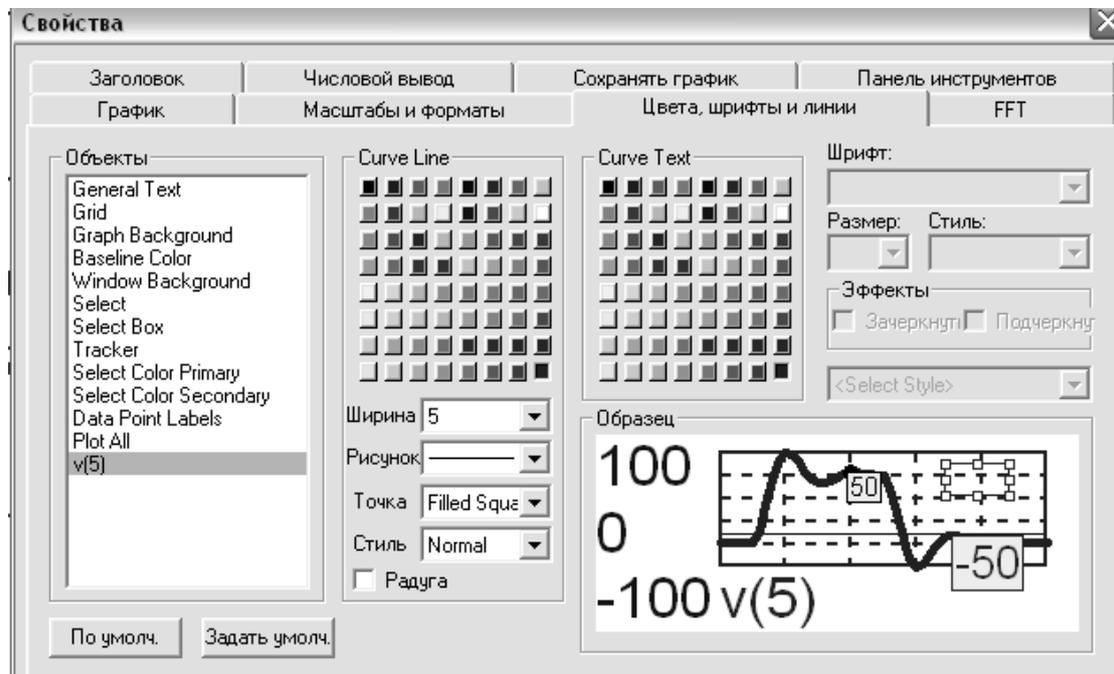
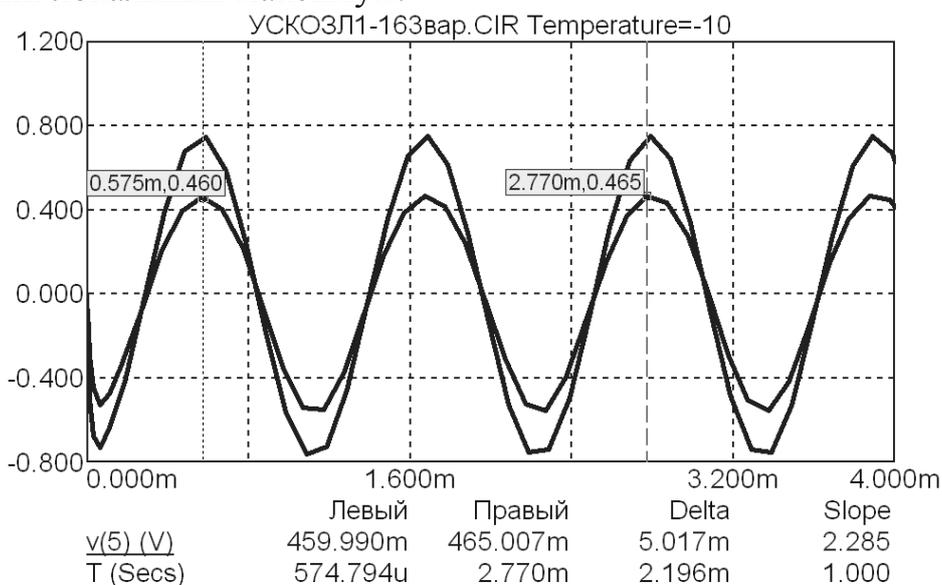


Рисунок 3.20 – Вкладка *Цвета, шрифты и линии* диалогового окна *Свойства*

Схемы и графики, полученные в системе MicroCAP 8, можно передавать во внешние приложения с помощью команды *Редактирование / Копировать в буфер обмена / Копировать видимую область в BMP формат*. При

этом графический образ копируется в буфер обмена *Windows*. Затем при помощи команды *Правка / Вставить* любого внешнего приложения, например текстового редактора *Microsoft Word*, скопированный графический образ размещается в требуемом месте.

Для снятия численных значений амплитуды с графиков зависимости выходного напряжения (точка 5) усилительного каскада следует воспользоваться режимом «электронного курсора». Для этого, находясь в окне отображения графиков зависимостей, следует нажать на пиктограмму  (на рисунке 3.18 третья слева на панели инструментов). После этого на экране появляются изображения двух электронных курсоров, совмещенных с одним из графиков – выходным напряжением усилителя при температуре среды -10°C (рисунок 3.21). Заметим, что электронные курсоры можно произвольно перемещать вдоль всего графика функции с помощью мыши или с помощью клавишей-стрелок \leftarrow и \rightarrow . Перемещение правого электронного курсора на экране происходит либо при нажатой правой клавиши мыши, либо при нажатой клавише *Shift* (в случае перемещения с помощью стрелок). Для нахождения локальных максимумов функции можно воспользоваться пиктограммой , расположенной на панели инструментов. При нажатии на эту пиктограмму левый электронный курсор перемещается на ближайший локальный максимум функции. Для того чтобы задействовать для поиска максимумов правый электронный курсор, необходимо его сначала активировать. Делается это правой кнопкой мыши; затем, также как и в предыдущем случае, нажатие на пиктограмму  заставляет правый электронный курсор перемещаться на ближайший локальный максимум.



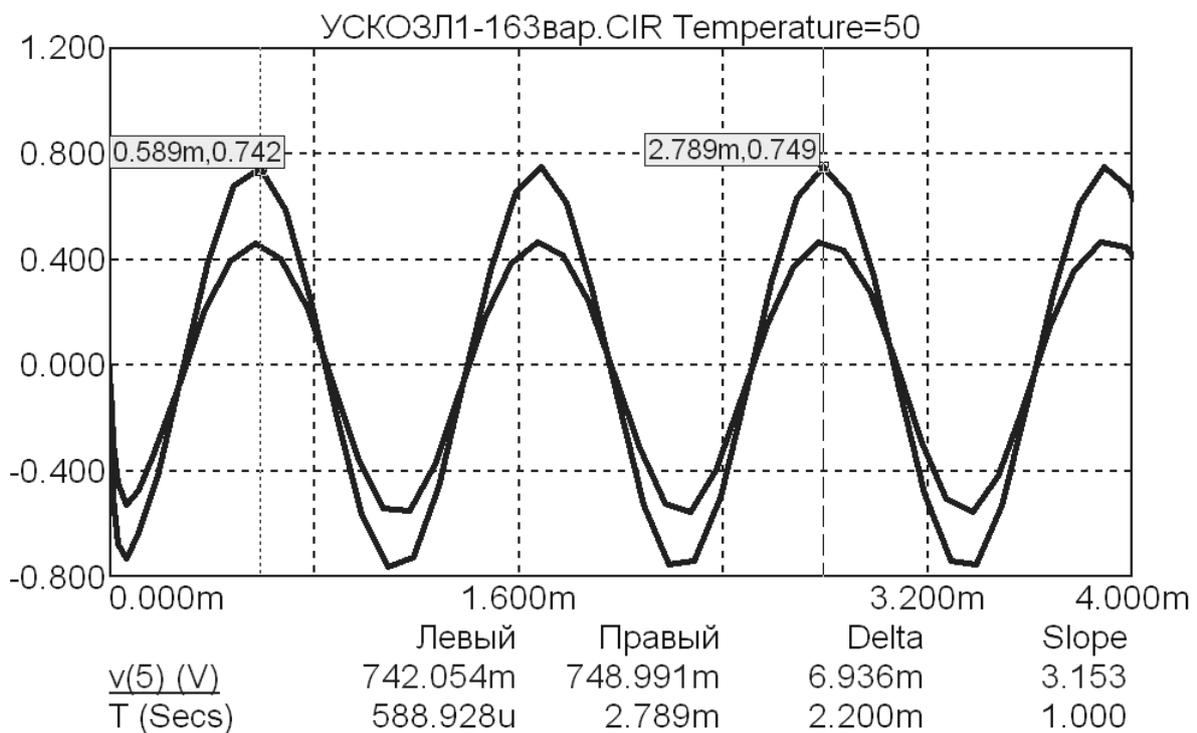
температура окружающей среды -10°C ($x_1^* = -1$) и $+50^{\circ}\text{C}$ ($x_1^* = +1$);

$V_1 = 22\text{В}$ ($x_2^* = -1$); $R_4 = 40\ \text{Ом}$ ($x_3^* = -1$); электронные курсоры совмещены с графиком, соответствующим температуре среды -10°C

Рисунок 3.21 – Реализация опыта №1 ПФЭ

Из рисунка 3.21 видно, что значения амплитуды выходного напряжения при температуре -10°C составляют 460 мВ и 465 мВ. Более точные значения текущих координат электронного курсора отображаются под координатной плоскостью в столбцах *Левый* и *Правый* (первая строка): 459.990 мВ и 465.007 мВ.

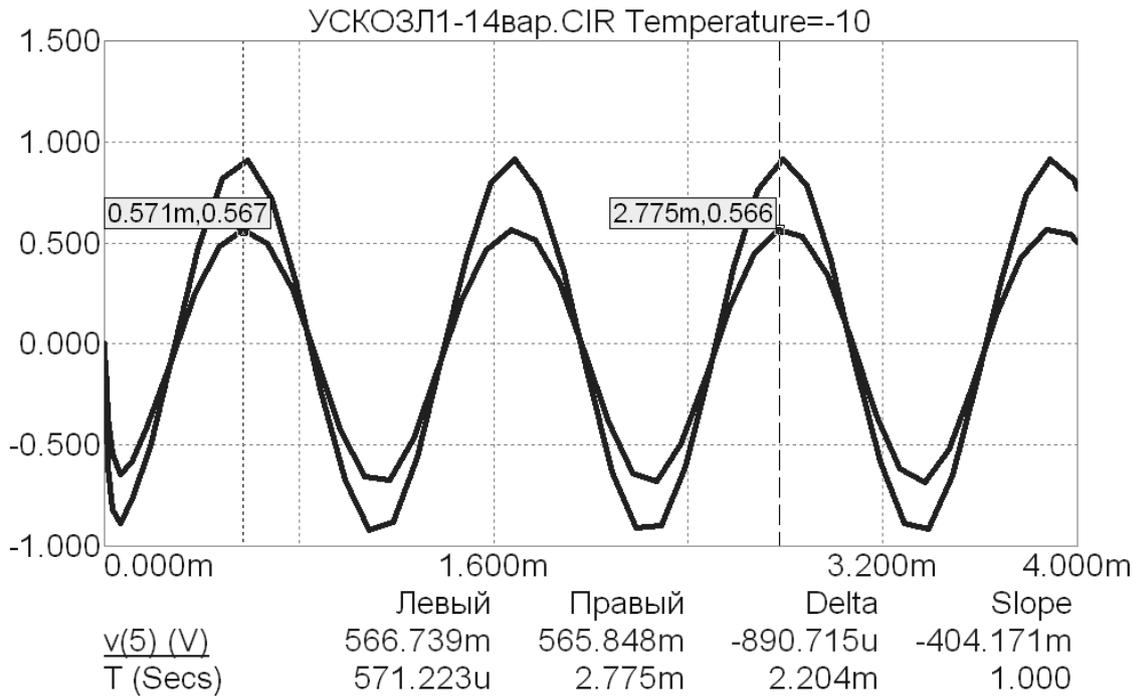
Для перехода к измерению другой зависимости – выходного напряжения при температуре среды $+50^{\circ}\text{C}$ – необходимо с помощью клавиш-стрелок \uparrow или \downarrow переместить электронные курсоры на соседний график (рисунок 3.22). Из рисунка 3.22 видно, что значения амплитуды выходного напряжения при температуре $+50^{\circ}\text{C}$ составляют 742.054 мВ и 748.991 мВ.



температура окружающей среды -10°C ($x_1^* = -1$) и $+50^{\circ}\text{C}$ ($x_1^* = +1$);
 $V1 = 22\text{В}$ ($x_2^* = -1$); $R4 = 40\ \text{Ом}$ ($x_3^* = -1$); электронные курсоры совмещены с графиком, соответствующим температуре среды $+50^{\circ}\text{C}$

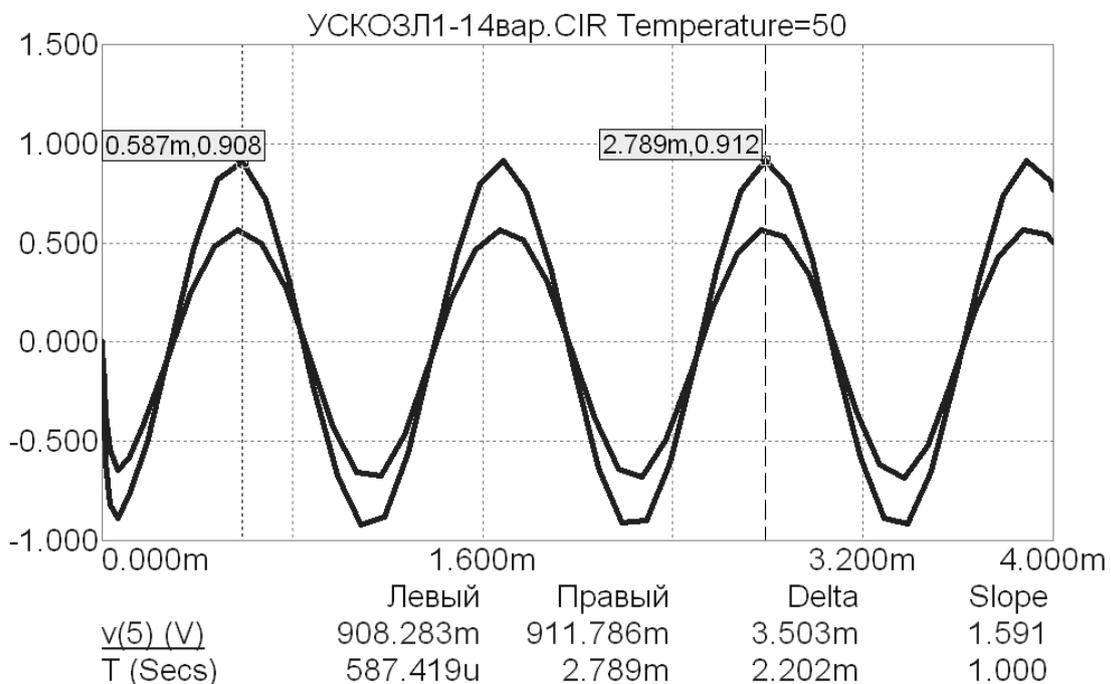
Рисунок 3.22 – Реализация опыта №2 ПФЭ

Подготавливаем в системе MicroCAP 8 схему, изображённую на рисунке 3.15, задав значения $V1 = 22\text{В}$, $R4 = 80\ \text{Ом}$ ($x_2^* = -1$, $x_3^* = +1$). В этом случае при температуре окружающей среды -10°C ($x_1^* = -1$) значения амплитуды на выходе усилителя (точка 5) составляют 566.739 мВ и 565.848 мВ (рисунок 3.23), а при температуре окружающей среды $+50^{\circ}\text{C}$ ($x_1^* = +1$) значения амплитуды составляют 908.283 мВ и 911.786 мВ (рисунок 3.24).



температура окружающей среды -10°C и $+50^{\circ}\text{C}$ при $V_1 = 22\text{В}$ ($x_2^* = -1$) и $R_4 = 80\ \text{Ом}$ ($x_3^* = +1$); электронные курсоры совмещены с графиком, соответствующим температуре среды -10°C ($x_1^* = -1$)

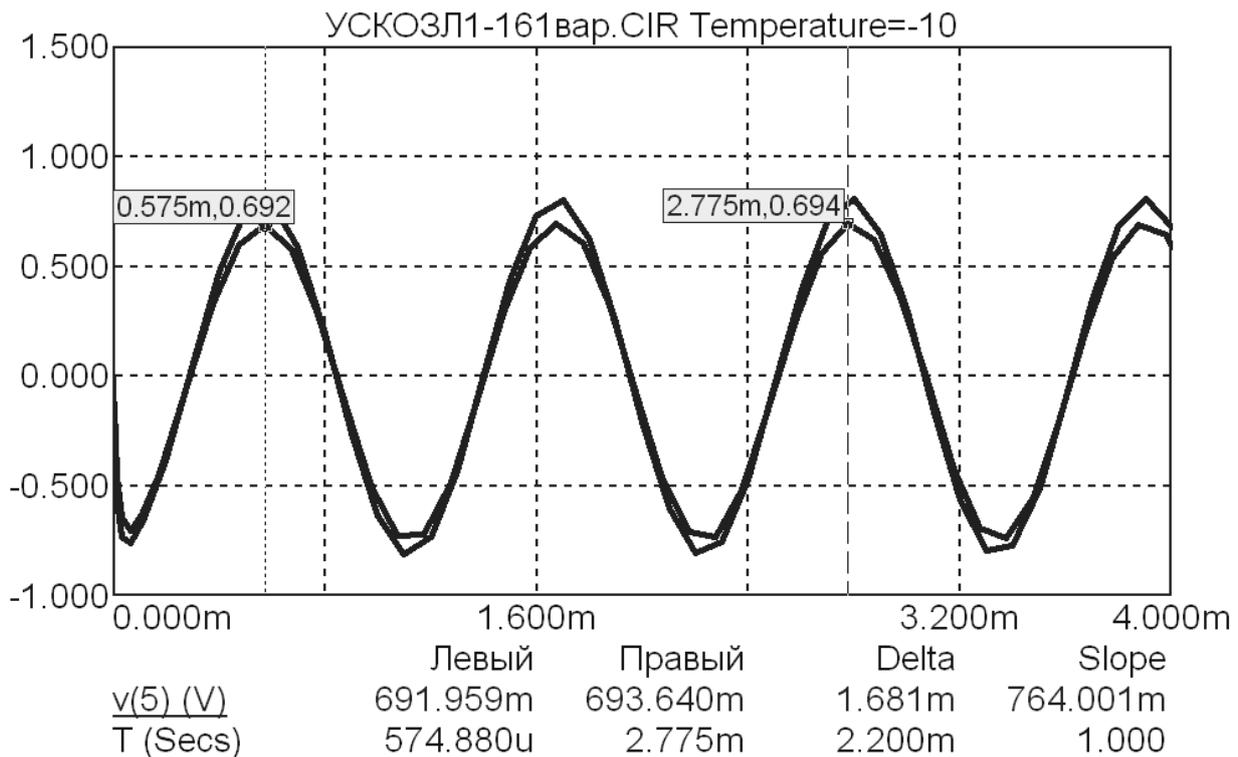
Рисунок 3.23 – Реализация опыта №5 ПФЭ



температура окружающей среды -10°C и $+50^{\circ}\text{C}$ при $V_1 = 22\text{В}$ ($x_2^* = -1$) и $R_4 = 80\ \text{Ом}$ ($x_3^* = +1$); электронные курсоры совмещены с графиком, соответствующим температуре среды $+50^{\circ}\text{C}$ ($x_1^* = +1$)

Рисунок 3.24 – Реализация опыта №6 ПФЭ

Подготавливаем в системе MicroCAP 8 схему, изображённую на рисунке 3.15, задав значения $V1 = 24\text{В}$, $R4 = 40\ \text{Ом}$ ($x_2^* = +1$, $x_3^* = -1$). В этом случае при температуре окружающей среды -10°C ($x_1^* = -1$) значения амплитуды составляют $691.959\ \text{мВ}$ и $693.640\ \text{мВ}$ (рисунок 3.25), а при температуре окружающей среды $+50^\circ\text{C}$ ($x_1^* = +1$) значения амплитуды составляют $791.565\ \text{мВ}$ и $800.017\ \text{мВ}$ (рисунок 3.26).

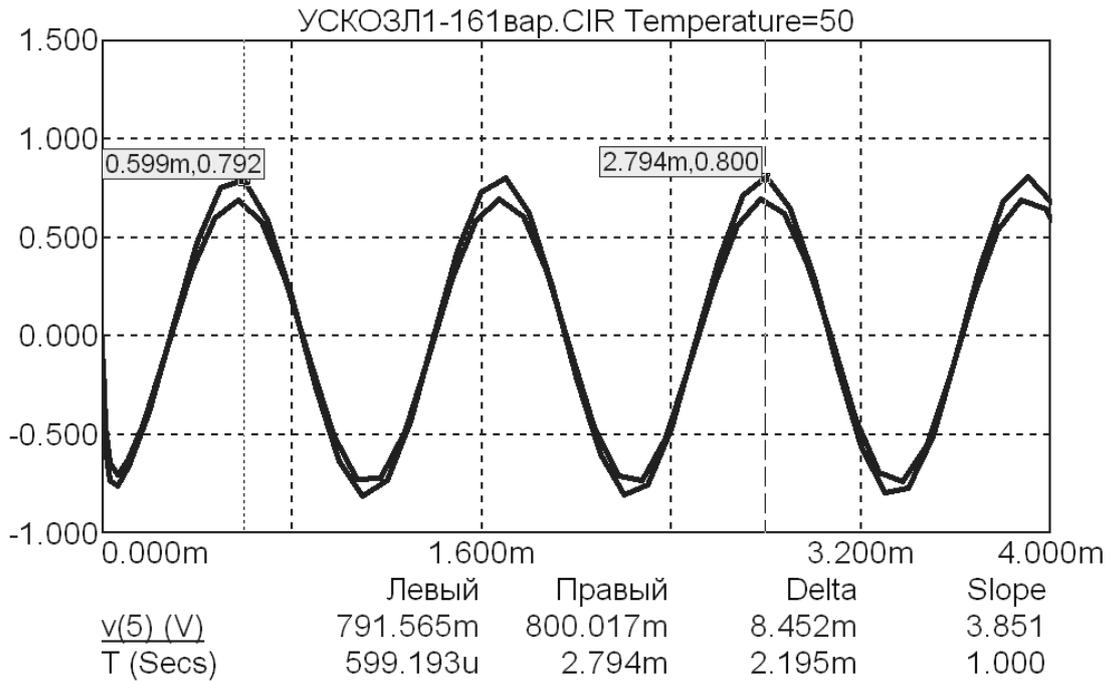


температура окружающей среды -10°C и $+50^\circ\text{C}$ при $V1 = 24\text{В}$ ($x_2^* = +1$) и $R4 = 40\ \text{Ом}$ ($x_3^* = -1$); электронные курсоры совмещены с графиком, соответствующим температуре среды -10°C ($x_1^* = -1$)

Рисунок 3.25 – Реализация опыта №3 ПФЭ

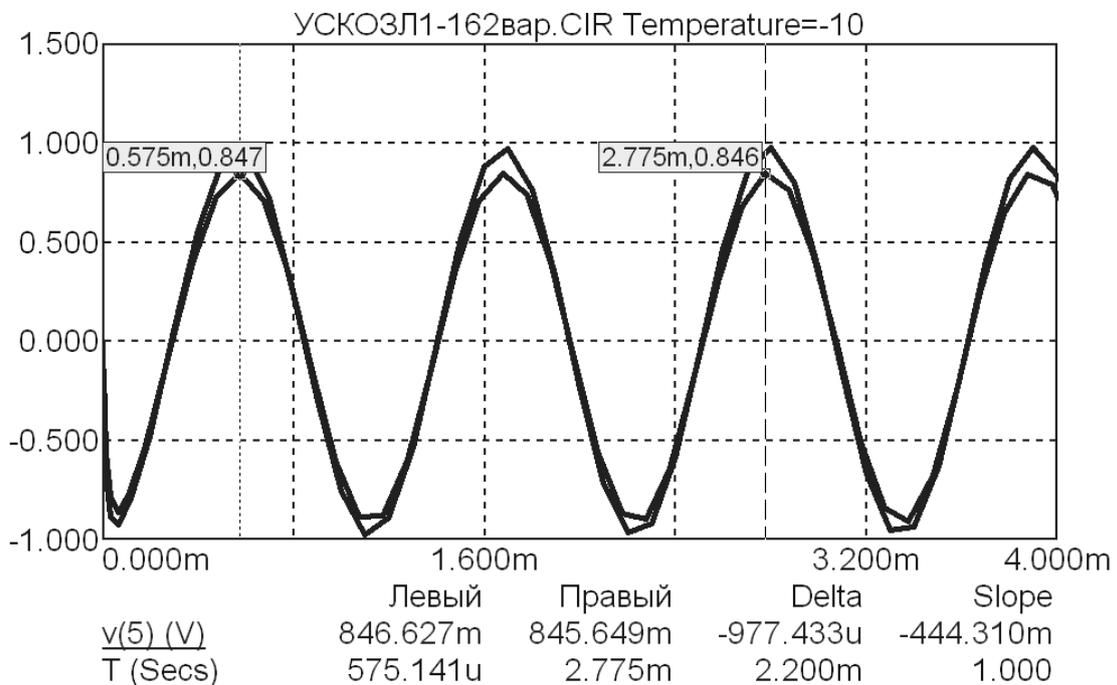
Подготавливаем в системе MicroCAP 8 схему, изображённую на рисунке 3.15, задав значения $V1 = 24\text{В}$, $R4 = 80\ \text{Ом}$ ($x_2^* = +1$, $x_3^* = +1$). В этом случае при температуре окружающей среды -10°C значения амплитуды составляют $847.627\ \text{мВ}$ и $845.649\ \text{мВ}$ (рисунок 3.27), а при температуре окружающей среды $+50^\circ\text{C}$ значения амплитуды составляют $961.79\ \text{мВ}$ и $975.502\ \text{мВ}$ (рисунок 3.28).

Полученные в результате анализа переходных процессов численные значения выходного напряжения $y_{m\gamma} = V5_\gamma$ для различных сочетаний нормированных переменных x_i^* (рисунки 3.21 – 3.28) заносим в матрицу планирования ПФЭ 2^n для $n = 3$ и числа измерений $\gamma = 2$ (таблица 3.5).



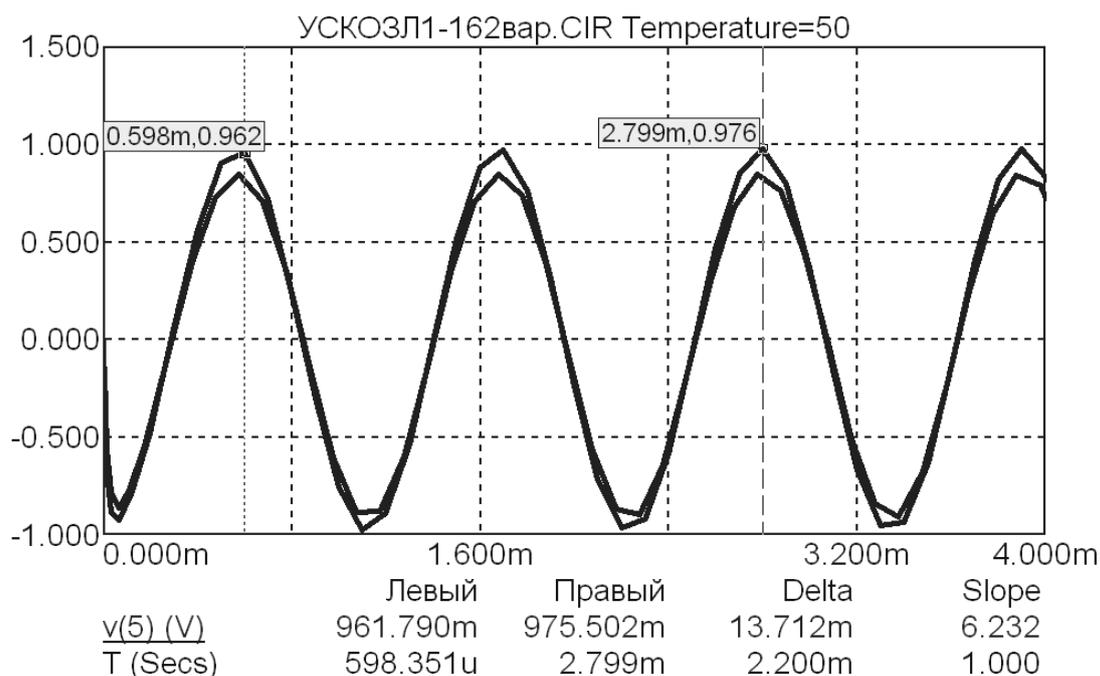
температура окружающей среды -10°C и $+50^{\circ}\text{C}$ при $V1 = 24\text{В}$ ($x_2^* = +1$) и $R4 = 40\ \text{Ом}$ ($x_3^* = -1$); электронные курсоры совмещены с графиком, соответствующим температуре среды $+50^{\circ}\text{C}$ ($x_1^* = +1$)

Рисунок 3.26 – Реализация опыта №4 ПФЭ



температура окружающей среды -10°C и $+50^{\circ}\text{C}$ при $V1 = 24\text{В}$ ($x_2^* = +1$) и $R4 = 80\ \text{Ом}$ ($x_3^* = +1$); электронные курсоры совмещены с графиком, соответствующим температуре среды -10°C ($x_1^* = -1$)

Рисунок 3.27 – Реализация опыта №7 ПФЭ



температура окружающей среды -10°C и $+50^{\circ}\text{C}$ при $V1 = 24\text{В}$ ($x_2^* = +1$) и $R4 = 80\ \text{Ом}$ ($x_3^* = +1$); электронные курсоры совмещены с графиком, соответствующим температуре среды $+50^{\circ}\text{C}$ ($x_1^* = +1$)

Рисунок 3.28 – Реализация опыта №8 ПФЭ

Таблица 3.5 – Матрица планирования ПФЭ 2^n для $n = 3$ и $\gamma = 2$ (ПФЭ 2^3)

m	x_1^*	x_2^*	x_3^*	...	$y_{m1} = V5_{m1}$	$y_{m2} = V5_{m2}$	$m(y_m) = (y_{m1} + y_{m2})/2 = m(V5_m)$
1	-1	-1	-1	...	459.99	465.007	$m(y_1) = 462.499$
2	+1	-1	-1	...	742.054	748.991	$m(y_2) = 745.523$
3	-1	+1	-1	...	691.959	693.64	$m(y_3) = 692.799$
4	+1	+1	-1	...	791.565	800.017	$m(y_4) = 795.791$
5	-1	-1	+1	...	565.848	566.739	$m(y_5) = 566.293$
6	+1	-1	+1	...	908.283	911.786	$m(y_6) = 910.034$
7	-1	+1	+1	...	846.627	845.649	$m(y_7) = 846.138$
8	+1	+1	+1	...	961.79	975.502	$m(y_8) = 968.646$

Среднее значение $m(y_m)$ в каждой m -ой строке в таблице 3.5 вычислено по формуле (3.22):

$$m \ y_m = \frac{1}{\gamma} \sum_{p=1}^{\gamma} y_{mp}.$$

Для вычисления коэффициентов полинома (3.12):

$$y = B_0 + \sum_{i=1}^n B_i x_i^* + \sum_{i < j} B_{ij} x_i^* x_j^* + \sum_{i=1}^n B_{ii} x_i^{*2}$$

используются выражения (3.16), в которых следует принять $N = 8$, а величины y_m – равными средним измеренным значениям $m(y_m)$, взятым из таблицы 3.5 ($y_m = m(y_m)$). Тогда:

$$B_0 = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N y_m =$$

$$= \frac{462.499 + 745.523 + 692.799 + 795.791 + 566.293 + 910.034 + 846.138 + 968.646}{8} =$$

$$= 748.465 \text{ мВ.}$$

$$B_1 = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N y_m x_{1m}^* =$$

$$= 0.125 \cdot (-462.499 + 745.523 - 692.799 + 795.791 - 566.293 +$$

$$+ 910.034 - 846.138 + 968.646) = 106.533 \text{ мВ.}$$

$$B_2 = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N y_m x_{2m}^* =$$

$$= 0.125 \cdot (-462.499 - 745.523 + 692.799 + 795.791 - 566.293 -$$

$$- 910.034 + 846.138 + 968.646) = 77.378 \text{ мВ.}$$

$$B_3 = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N y_m x_{3m}^* =$$

$$= 0.125 \cdot (-462.499 - 745.523 - 692.799 - 795.791 + 566.293 +$$

$$+ 910.034 + 846.138 + 968.646) = 74.313 \text{ мВ.}$$

Если пренебречь квадратичными членами, то полином (3.12) для нашего примера примет вид:

$$y = 748.465 + 106.533x_1^* + 77.378x_2^* + 74.313x_3^*. \quad (3.12б)$$

Перейдём от коэффициентов B , которые получаются из опыта, к коэффициентам β в натуральном масштабе в полиноме (3.8). При использовании полиномов первого порядка расчёт проводим по формулам (3.15):

$$\beta_0 = B_0 + \sum_i -\frac{B_i}{\Delta x_i} x_{i0} = 748.465 - 106.533 \cdot \frac{20}{30} - 77.378 \cdot \frac{23}{1} - 74.313 \cdot \frac{60}{20} =$$

$$= 748.465 - 71.022 - 1779.694 - 222.939 = -1325.193 \text{ мВ;}$$

$$\beta_i = \frac{B_i}{|\Delta x_i|};$$

$$\beta_1 = \frac{106.533}{30} = 3.551 \text{ мВ/}^\circ\text{C}; \quad \beta_2 = \frac{77.378}{1} = 77.378 \text{ мВ/В;}$$

$$\beta_3 = \frac{74.313}{20} = 3.716 \text{ мВ/Ом.}$$

Полином первого порядка с коэффициентами β в натуральном масштабе для нашего примера примет вид:

$$V5 = (-1325.193 + 3.551 \cdot T + 77.378 \cdot V1 + 3.716 \cdot R4) \text{ мВ.}$$

Значения строчной дисперсии вычислены по формуле (3.23), которая при $\gamma = 2$ примет вид:

$$D y_m = \sum_{p=1}^2 [y_{mp} - m y_m]^2.$$

$$\begin{aligned} D(y_1) &= (459.99 - 462.499)^2 + (465.007 - 462.499)^2 = 12.585 \text{ мВ}^2; \\ D(y_2) &= (742.054 - 745.523)^2 + (748.991 - 745.523)^2 = 24.061 \text{ мВ}^2; \\ D(y_3) &= (691.959 - 692.799)^2 + (693.64 - 692.799)^2 = 1.413 \text{ мВ}^2; \\ D(y_4) &= (791.565 - 795.791)^2 + (800.017 - 795.791)^2 = 35.718 \text{ мВ}^2; \\ D(y_5) &= (565.848 - 566.293)^2 + (566.739 - 566.293)^2 = 0.397 \text{ мВ}^2; \\ D(y_6) &= (908.283 - 910.034)^2 + (911.786 - 910.034)^2 = 6.136 \text{ мВ}^2; \\ D(y_7) &= (846.627 - 846.138)^2 + (845.649 - 846.138)^2 = 0.478 \text{ мВ}^2; \\ D(y_8) &= (961.79 - 968.646)^2 + (975.502 - 968.646)^2 = 94.009 \text{ мВ}^2. \end{aligned}$$

Исходя из строчной дисперсии, по формуле (3.24) находим дисперсию воспроизводимости:

$$\begin{aligned} D_B y &= \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N D y_{my} = 0.125 \cdot (12.585 + 24.061 + 1.413 + 35.718 + 0.397 + \\ &+ 6.136 + 0.478 + 94.009) = 21.85 \text{ мВ}^2. \end{aligned}$$

Зная дисперсию воспроизводимости, находим дисперсию полиномиальных коэффициентов B_i :

$$D B_i = \frac{D_B y}{N} = \frac{21.85}{8} = 2.731 \text{ мВ}^2.$$

По формуле (3.30) вычисляем среднее квадратическое отклонение коэффициентов:

$$\sigma(B_i) = [D(B_i)]^{0.5} = 2.731^{0.5} = 1.653 \text{ мВ.}$$

Значения коэффициентов уравнения (3.12б) существенно больше. Следовательно, можно полагать, что все оставшиеся коэффициенты полинома значимы.

Дополнительно производим проверку значимости с использованием критерия Стьюдента. Для уровня значимости, равного $\alpha = 0.05$ и степеней свободы $M = (N \cdot \gamma - N) = 8 \cdot 2 - 8 = 8$, из таблицы 3.3 находим $t_{\text{ТАБЛ}}(УЗ) = 2.306$.

Тогда:

$$t_{\text{ТАБЛ}} \text{ УЗ} \sqrt{\frac{D_B y}{N}} = t_{\text{ТАБЛ}} \alpha = 0.05, M = 8 \sqrt{\frac{D_B y}{N}} = 2.306 \sqrt{\frac{21.85}{8}} = 3.811 \text{ мВ.}$$

Полученное число 3.811 меньше коэффициентов B_i полинома (3.12б):

$$B_0 = 748.465 \text{ мВ}; B_1 = 106.533 \text{ мВ}; B_2 = 77.378 \text{ мВ}; B_3 = 74.313 \text{ мВ.}$$

Это согласно (3.28) является подтверждением того, что все коэффициенты полинома значимы.

Производим проверку адекватности путём сравнения результатов эксперимента $m(y_{m\gamma})$ для разных сочетаний переменных x_m^* с теми результатами, которые при том же сочетании переменных получены для параметра после расчета по полиному (3.12б). Результаты расчета помещаем в таблицу 3.6.

Таблица 3.6 – Сравнение результатов эксперимента $m(y_{m\gamma})$ с результатами, которые получены после расчета по полиному

m	$m(y_m)$	$y_{mРАСЧ}$	$[m(y_m) - y_{mРАСЧ}]^2$
1	462.499	$748.465 + 106.533 \cdot (-1) + 77.378 \cdot (-1) + 74.313 \cdot (-1) = 490.242$	769.681
2	745.523	$748.465 + 106.533 \cdot (+1) + 77.378 \cdot (-1) + 74.313 \cdot (-1) = 703.308$	1782.09
3	692.799	$748.465 + 106.533 \cdot (-1) + 77.378 \cdot (+1) + 74.313 \cdot (-1) = 644.998$	2284.98
4	795.791	$748.465 + 106.533 \cdot (+1) + 77.378 \cdot (+1) + 74.313 \cdot (-1) = 858.064$	3877.94
5	566.293	$748.465 + 106.533 \cdot (-1) + 77.378 \cdot (-1) + 74.313 \cdot (+1) = 638.867$	5266.88
6	910.034	$748.465 + 106.533 \cdot (+1) + 77.378 \cdot (-1) + 74.313 \cdot (+1) = 851.933$	3375.80
7	846.138	$748.465 + 106.533 \cdot (-1) + 77.378 \cdot (+1) + 74.313 \cdot (+1) = 792.623$	2757.81
8	968.646	$748.465 + 106.533 \cdot (+1) + 77.378 \cdot (+1) + 74.313 \cdot (+1) = 1006.69$	1447.29

Приведём результаты расчета выходного параметра $y_{mРАСЧ}$ по этому полиному с нормированными переменными:

$$y = 748.465 + 106.533x_1^* + 77.378x_2^* + 74.313x_3^*. \quad (3.12б)$$

Затем по формуле (3.31) вычисляем дисперсию адекватности:

$$D_{АД} \ y = \frac{1}{N-d} \sum_{m=1}^N [m \ y_{m\gamma} - y_{mРАСЧ}]^2 = \frac{1}{8-4} \cdot 21562.47 = 5390.6 \text{ мВ}^2,$$

где $m(y_{m\gamma})$ – среднее значение результата эксперимента, взятое из m -ой строки таблицы 3.5; $y_{mРАСЧ}$ – результаты расчета по полиному (3.12б) для того же сочетания переменных; d – количество членов, оставленных в полиноме.

Для $D_{АД}(y)$ принимается $(N-d)$ степеней свободы, а для $D_{В}(y)$ берется $N \cdot (\gamma - 1)$ степеней свободы.

Для проверки адекватности по формуле (3.32) вычисляем случайную величину $F_{АД}$ распределения Фишера:

$$F_{АД} = \frac{D_{АД} \ y}{D_{В} \ y} = \frac{5390.6}{21.85} = 246.714.$$

Адекватность полинома установим с помощью таблицы 3.4 распределения Фишера при сравнении величины $F_{АД}$ с $F_{ТАБЛ}$. Если $F_{АД} < F_{ТАБЛ}$, то принимается решение об адекватности полинома результатам опыта. В противном случае принимается решение о его неадекватности.

Для рассматриваемого примера:

- количество членов, оставленных в полиноме $d = 4$;

- количество степеней свободы для дисперсии адекватности:

$$(N-d) = 8 - 4 = 4, \text{ т.е. } M' = 4;$$

- количество степеней свободы для дисперсии воспроизводимости:

$$N \cdot (\gamma - 1) = 8 \cdot (2 - 1) = 8, \text{ т.е. } M = 8;$$

- из таблицы 3.4 при уровне значимости $\alpha = 0.05$ с учетом того, что $M = 8$, а $M' = 4$, получаем $F_{\text{ТАБЛ}} = 6.04$, а при уровне значимости $\alpha = 0.01$ $F_{\text{ТАБЛ}} = 14.8$.

Как видно, $F_{\text{Ад}} = 246.714 > F_{\text{ТАБЛ}} = 6.04$ при уровне значимости $\alpha = 0.05$ и $F_{\text{Ад}} = 246.714 > F_{\text{ТАБЛ}} = 14.8$ при уровне значимости $\alpha = 0.01$. Следовательно, в отличие от предыдущей задачи полученный линейный полином не адекватен результатам опыта с вероятностью ошибки в этом решении не меньше, чем $1 - \alpha = 0.99$.

Для обеспечения адекватности в полином следует ввести коэффициенты взаимодействия. В рассматриваемом примере можно вычислить коэффициенты взаимодействия B_{ij} 2-го порядка [20]:

$$B_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N x_{im}^* x_{jm}^* m(y_m) \quad (3.18)$$

и получить неполный полином 2-го порядка. Как упоминалось ранее, получение коэффициентов при x_i^{*2} из результатов ПФЭ в нашем случае невозможно.

Для вычисления коэффициентов взаимодействия 2-го порядка заполним вспомогательную таблицу 3.7, а затем запишем неполный полином 2-го порядка:

$$\begin{aligned} y &= B_0 + \sum_{i=1}^n B_i x_i^* + \sum_{i < j} B_{ij} x_i^* x_j^* = \\ &= 748.465 + 106.533x_1^* + 77.378x_2^* + 74.313x_3^* - 50.158x_1^* x_2^* + 7.236x_2^* x_3^* \text{ мВ.} \end{aligned}$$

С помощью вспомогательной таблицы 3.8 вычислим относительные отклонения измеренных значений от расчётных ($\delta\%$) при использовании линейного полинома и от расчётных значений при использовании неполного полинома 2-го порядка ($\delta\%$ уточ). Эти отклонения рассчитаем по формулам:

$$\delta\% = \frac{|m y_m - y_{\text{мРАСЧ}}|}{m y_m} \cdot 100 \quad (3.33)$$

и

$$\delta\%_{\text{УТОЧ}} = \frac{|m y_m - y_{\text{мУТОЧ}}|}{m y_m} \cdot 100, \quad (3.34)$$

где

$$y_{\text{мУТОЧ}} = y_{\text{мРАСЧ}} - 50.158x_1^* x_2^* + 7.236x_2^* x_3^*. \quad (3.35)$$

По данным таблицы 3.8 видно уменьшение относительных отклонений измеренных значений от расчётных при использовании полинома 2-го порядка ($\delta\%_{\text{УТОЧ}} < \delta\%$).

Таблица 3.7 – Вспомогательная таблица для вычисления коэффициентов взаимодействия 2-го порядка

m	x_1^*	x_2^*	x_3^*	...	$x_{1m}^* x_{2m}^* m(y_m)$	$x_{2m}^* x_{3m}^* m(y_m)$
1	-1	-1	-1	...	462.499	462.499
2	+1	-1	-1	...	-745.523	745.523
3	-1	+1	-1	...	-692.799	-692.799
4	+1	+1	-1	...	795.791	-795.791
5	-1	-1	+1	...	566.293	-566.293
6	+1	-1	+1	...	-910.034	-910.034
7	-1	+1	+1	...	-846.138	846.138
8	+1	+1	+1	...	968.646	968.646
$B_{12} = \frac{1}{8} \sum_{m=1}^8 x_{1m}^* x_{2m}^* m(y_m) =$ $= -401.265/8 = -50.158 \text{ мВ}$					$B_{23} = \frac{1}{8} \sum_{m=1}^8 x_{2m}^* x_{3m}^* m(y_m) =$ $= 57.887/8 = 7.236 \text{ мВ}$	

Таблица 3.8 – Вспомогательная таблица для вычисления относительных отклонений измеренных значений от расчётных

m	x_1^*	x_2^*	x_3^*	$m(y_m)$	$y_{m\text{РАСЧ}}$	$\delta\%$	$y_{m\text{УТОЧ}} = y_{m\text{РАСЧ}} - 50.15x_1^* x_2^* + 7.177x_2^* x_3^*$	$\delta\%_{\text{УТОЧ}}$
1	-1	-1	-1	462.499	490.242	6.00	$490.242 - 50.158 + 7.236 = 447.319$	3.282
2	+1	-1	-1	745.523	703.308	5.66	$703.308 + 50.158 + 7.236 = 760.702$	2.036
3	-1	+1	-1	692.799	644.998	6.90	$644.998 + 50.158 - 7.236 = 687.92$	0.704
4	+1	+1	-1	795.791	858.064	7.83	$858.064 - 50.158 - 7.236 = 800.67$	0.613
5	-1	-1	+1	566.293	638.867	12.8	$638.867 - 50.158 - 7.236 = 581.473$	2.68
6	+1	-1	+1	910.034	851.933	6.39	$851.933 + 50.158 - 7.236 = 894.855$	1.668
7	-1	+1	+1	846.138	793.623	6.21	$793.623 + 50.158 + 7.236 = 851.017$	0.577
8	+1	+1	+1	968.646	1006.69	3.93	$1006.69 - 50.158 + 7.236 = 963.767$	0.504

Вычислим коэффициенты взаимодействия 2-го порядка β_{ij} в натуральном масштабе:

$$\beta_{ij} = \frac{B_{ij}}{|\Delta x_i| \cdot |\Delta x_j|}; \quad (3.36)$$

$$\beta_{12} = \beta_{T,V1} = \frac{B_{12}}{|\Delta x_1| \cdot |\Delta x_2|} = \frac{-50.158}{30 \cdot 1} = -1.672 \frac{\text{мВ}}{^\circ\text{C} \cdot \text{В}};$$

$$\beta_{23} = \beta_{V1,R4} = \frac{B_{23}}{|\Delta x_2| \cdot |\Delta x_3|} = \frac{7.236}{1 \cdot 20} = 0.362 \frac{\text{мВ}}{\text{В} \cdot \text{Ом}}.$$

В двух последних формулах шаг изменения температуры окружающей среды $\Delta x_1 = \Delta T = \pm 30^\circ\text{C}$, шаг изменения напряжения питания $\Delta x_2 = \Delta V1 = \pm 1\text{В}$, шаг изменения сопротивления нагрузки $\Delta x_3 = \Delta R4 = \pm 20\text{Ом}$.

Неполный полином 2-го порядка с коэффициентами β в натуральном масштабе для нашего примера примет вид:

$$V5 = y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j =$$

$$= (-1325.193 + 3.551 \cdot T + 77.378 \cdot V1 + 3.716 \cdot R4 - 1.672 \cdot T \cdot V1 + 0.362 \cdot V1 \cdot R4) \text{ мВ}.$$

Для анализа точности и стабильности выходного параметра вычислим по формуле (3.21) коэффициенты $k_{i\text{ОТН}}$ в уравнении отклонений:

$$k_{i\text{ОТН}} = \frac{B_i}{|\Delta x_i|} \cdot \frac{x_{i0}}{y_0} = \beta_i \frac{x_{i0}}{y_0}$$

и коэффициенты взаимодействия в уравнении отклонений

$$k_{ij\text{ОТН}} = \beta_{ij} \frac{x_{i0} x_{j0}}{y_0}, \quad (3.37)$$

где номинальная величина:

$$y_0 = V5_0 = (829.269 + 828.989)/2 = 829.129 \text{ мВ}$$

это значение выходного параметра $V5$, определённое из графика (рисунок 3.29) для номинальных значений исходных параметров: температуры окружающей среды 20°C ($x_{1,0}$), напряжения питания $V1_0 = 23\text{В}$ ($x_{2,0}$) и $R4_0 = 60\text{Ом}$ ($x_{3,0}$).

$$k_{T,\text{ОТН}} = \beta_T \frac{T_0}{y_0} = 3.551 \cdot \frac{20}{829.129} = 0.086;$$

$$k_{V1,\text{ОТН}} = \beta_{V1} \frac{V1_0}{y_0} = 77.378 \cdot \frac{23}{829.129} = 2.146;$$

$$k_{R4,\text{ОТН}} = \beta_{R4} \frac{R4_0}{y_0} = 3.716 \cdot \frac{60}{829.129} = 0.269;$$

$$k_{T,V1} = k_{12} = \beta_{T,V1} \frac{T_0 \cdot V1_0}{V5_0} = -1.672 \cdot \frac{20 \cdot 23}{829.129} = -0.928;$$

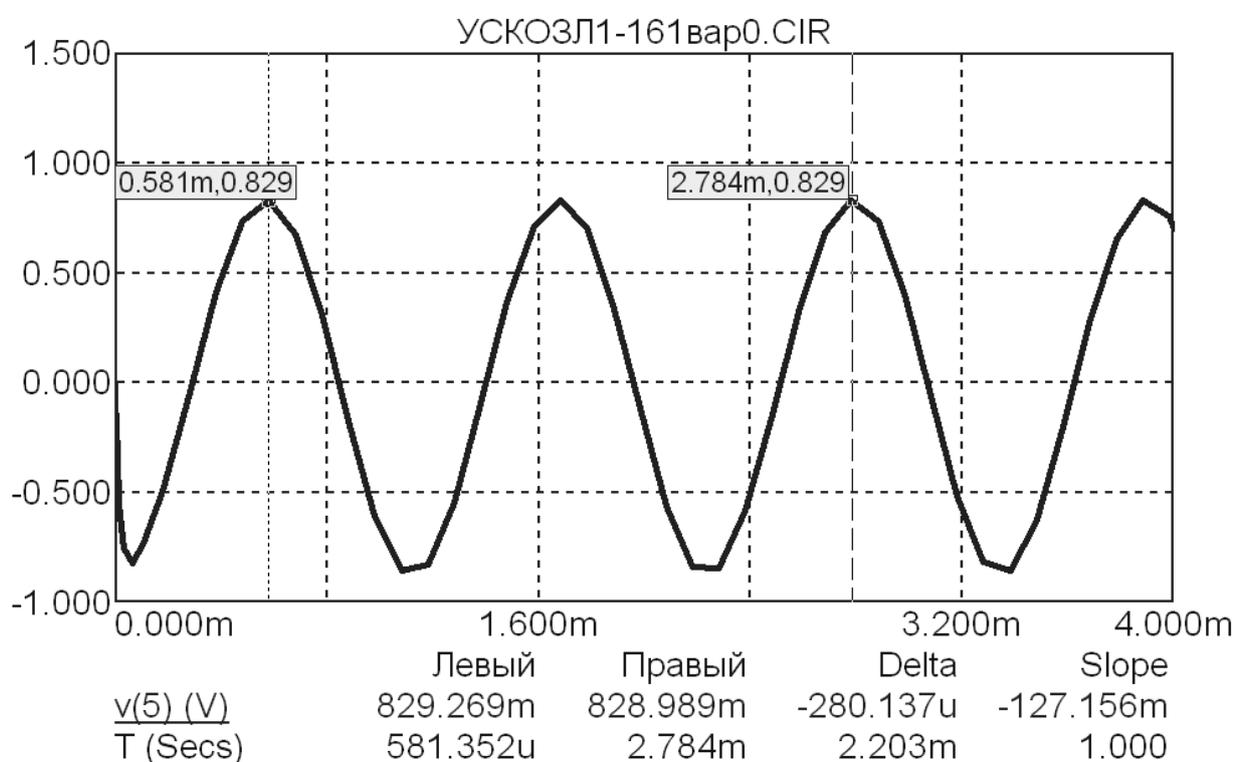
$$k_{V1,R4} = k_{23} = \beta_{V1,R4} \frac{V1_0 \cdot R4_0}{V5_0} = 0.362 \cdot \frac{23 \cdot 60}{829.129} = 0.602.$$

Получим явный вид уравнения отклонений неполного полинома 2-го порядка:

$$\frac{\Delta y}{y_0} = \sum_{i=1}^n k_{i\text{отн}} \frac{\Delta x_i}{x_{i0}} + \sum_{i<j} k_{ij} \frac{\Delta x_i}{x_{i0}} \cdot \frac{\Delta x_j}{x_{j0}}. \quad (3.38)$$

Подставим численные значения величин коэффициентов $k_{i\text{отн}}$ и $k_{ij\text{отн}}$:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta V5}{V5} = \frac{\Delta y}{y_0} = & 0.086 \frac{\Delta T}{T_0} + 2.146 \frac{\Delta V1}{V1_0} + 0.269 \frac{\Delta R4}{R4_0} - \\ & - 0.928 \frac{\Delta T}{T_0} \cdot \frac{\Delta V1}{V1_0} + 0.602 \frac{\Delta V1}{V1_0} \cdot \frac{\Delta R4}{R4_0}. \end{aligned}$$



температура окружающей среды $20^{\circ}\text{C}(x_{1,0})$,

напряжение питания $V1_0 = 23\text{В}(x_{2,0})$ и $R4_0 = 60\text{ Ом}(x_{3,0})$

Рисунок 3.29 – График зависимости выходного напряжения усилительного каскада для номинальных значений

3.3.5 Лабораторное задание

Получить у преподавателя номер варианта задания. Для выходного напряжения у усилительного каскада, математическая модель которого получена в системе MicroCAP 8, требуется получить полиномиальную модель с помощью ПФЭ 2^n для $n = 3$ (ПФЭ 2^3) с вычислением коэффициентов 1-го порядка, а также провести статистический анализ полинома и качества экспе-

римента с проверкой значимости членов полинома и адекватности этого полинома результатам опыта. При неадекватности полинома 1-го порядка результатам опыта получить полиномиальную модель с вычислением коэффициентов взаимодействия 2-го порядка.

Для вариантов с 1 по 6 и с 13 по 18 исследуется схема, изображённая на рисунке 3.15, а для вариантов с 7 по 12 и с 19 по 24 – схема, изображённая на рисунке 3.30. Для схемы на рисунке 3.15 выходной параметр – это напряжение резисторе $R4$, а для схемы на рисунке 3.30 выходным параметром следует считать напряжение на коллекторе транзисторе. Заметим, что номер узла для измерения выходного напряжения в каждом конкретном случае может быть иным, отличным от номеров, показанных на рисунках 3.15 и 3.30.

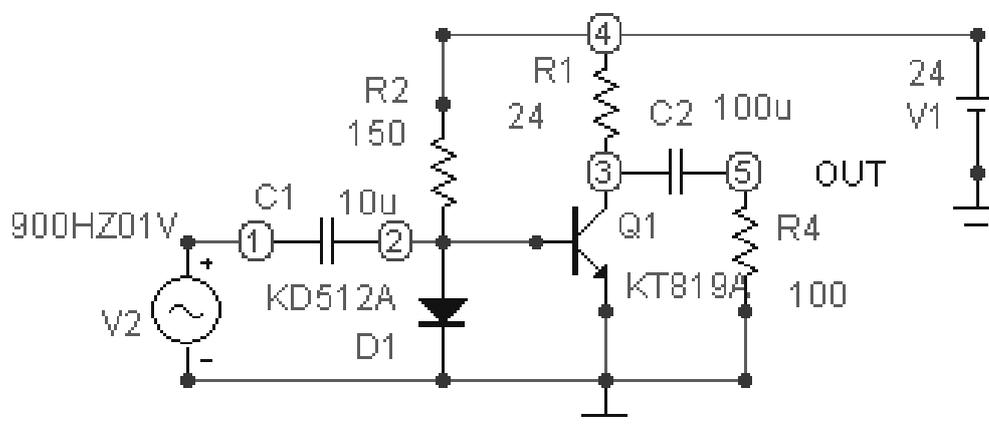


Рисунок 3.30 – Усилительный каскад с комбинированным управлением по задающему воздействию (напряжению базы транзистора) и по возмущающему воздействию (температуре)

Значение сопротивления $R1$ и средние значения варьируемых при эксперименте параметров $x_{i,0}$ (температуры окружающей среды $T_0 = x_{1,0}$, напряжения питания $V1_0 = x_{2,0}$, сопротивления нагрузки $R4_0 = x_{3,0}$) выбирать в соответствии с номером варианта задания из таблицы 3.9.

Температура окружающей среды $T = x_1 = x_{1,0} \pm \Delta x_1$, а шаг её варьирования $\Delta T = \Delta x_1 = 25^\circ\text{C}$. Напряжение питания $V1 = x_2 = x_{2,0} \pm \Delta x_2$, а шаг его варьирования $\Delta V1 = \Delta x_2 = 1\text{В}$. Сопротивление нагрузки $R4 = x_3 = x_{3,0} \pm \Delta x_3$, а шаг его варьирования $\Delta R4 = \Delta x_3 = 20\text{ Ом}$.

Вычислить величины относительных отклонений измеренных в системе MicroCAP 8 значений выходного параметра от расчётных ($\delta\%$) при использовании линейного полинома и от расчётных значений при использовании неполного полинома 2-го порядка ($\delta\%_{\text{УТОЧ}}$).

При выполнении задания руководствоваться методикой, подробно изложенной в пункте 3.3.4.

Таблица 3.9 – Значение сопротивления $R1$ и средние значения варьируемых параметров $x_{i,0}$

№ варианта	$T_0, ^\circ\text{C}$ $x_{1,0}$	$V1_0, \text{В}$ $x_{2,0}$	$R_{4_0}, \text{Ом}$ $x_{3,0}$	$R1, \text{Ом}$	№ варианта	$T_0, ^\circ\text{C}$ $x_{1,0}$	$V1_0, \text{В}$ $x_{2,0}$	$R_{4_0}, \text{Ом}$ $x_{3,0}$	$R1, \text{Ом}$
1	10	20	47	23	13	10	23	47	23
2	20	21	51	24	14	20	24	51	24
3	5	22	56	25	15	5	25	56	25
4	5	23	62	26	16	5	26	62	26
5	10	20	68	23	17	10	23	68	23
6	20	21	75	24	18	20	24	75	24
7	5	22	47	25	19	5	25	47	25
8	20	23	51	26	20	20	26	51	26
9	10	20	56	23	21	10	23	56	23
10	20	21	62	24	22	20	24	62	24
11	5	22	68	25	23	5	25	68	25
12	10	23	75	26	24	10	26	75	26

3.3.6 Содержание отчета

- цель работы;
- графики, таблицы и расчёты по методике, изложенной в пункте 3.3.4, отображающие результаты функциональных испытаний математической модели усилительного каскада в системе MicroCAP 8 с использованием метода планирования полного факторного эксперимента при изменении температуры, напряжения питания и сопротивления нагрузки. В результате расчётов должны быть решены все вопросы, изложенные в лабораторном задании;
- выводы по работе.

3.3.7 Перечень контрольных вопросов, которые могут быть заданы во время защиты отчёта по работе

1. Что такое полный факторный активный эксперимент?
2. Как составить матрицу планирования ПФЭ 2^n для $n = 3$?
3. Что даёт переход от аппроксимирующего полинома в натуральном масштабе к полиному с нормированными безразмерными переменными x^* ?
4. Как убедиться в том, что коэффициенты полинома значимы?

5. Как убедиться в адекватности аппроксимирующего полинома результатам опыта?
6. Как выглядит аппроксимирующий полином в натуральном масштабе?
7. Как выглядит аппроксимирующий полином с нормированными безразмерными переменными x^* ?

3.4 Сравнительные функциональные испытания стабильности выходного параметра математических моделей усилительных каскадов при изменении температуры эксплуатации в широком диапазоне

3.4.1 Цель работы

На примере входных каскадов усилителя обучить студентов проведению функциональных сравнительных испытаний стабильности выходного параметра математических моделей РЭС при изменении температуры эксплуатации в широком диапазоне в системе MicroCAP 8.

3.4.2 Краткие сведения о стабильности выходного параметра усилительных каскадов при изменении температуры эксплуатации в широком диапазоне

Экспериментальные и расчётные методы исследования РЭС при изменении температуры эксплуатации в широком диапазоне занимают много времени, в отличие от методов их исследования в системе схемотехнического моделирования MicroCAP 8. Точность же полученных результатов во всех случаях приблизительно одинакова. Это связано с тем, что характеристики транзисторов одной и той же марки имеют довольно большой разброс. По этой причине, при прочих равных условиях, исследования несложных радиоэлектронных узлов в системе MicroCAP 8 дают значительный выигрыш во времени и в средствах по сравнению с экспериментальными и расчётными исследованиями.

Анализ стабильности усилительных каскадов при изменении температуры эксплуатации в широком диапазоне методически удобно проводить, рассматривая эти каскады как непрерывные системы автоматического регулирования (САР), если считать, что значения выходной величины этих каскадов (выходного напряжения) прямо пропорциональны величине входного сигнала. При учёте нелинейности управления усилительные каскады следует отнести к нелинейным системам автоматического управления (САУ). Зависимость выходного напряжения усилительных каскадов на транзисторах от возмущающего воздействия температуры эксплуатации является нелинейной. Использование нелинейных законов управления позволяет значительно уве-

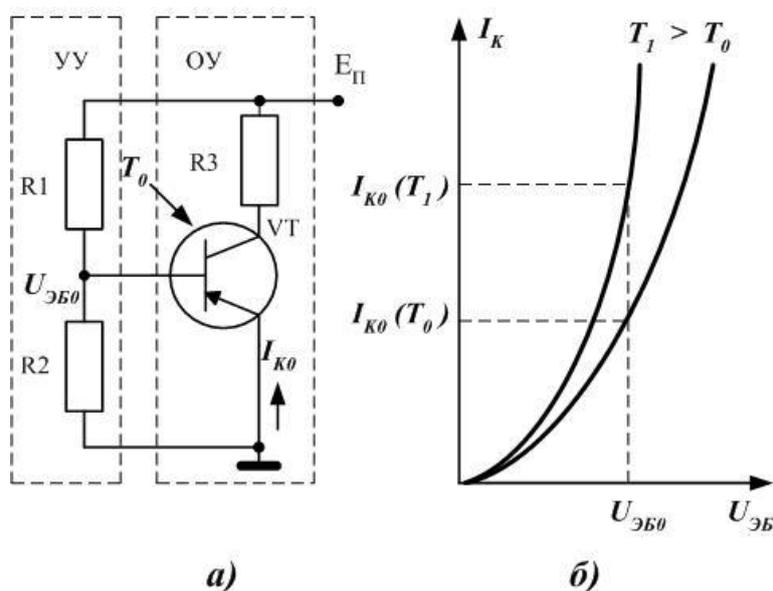
личить точность процесса управления. Из-за отсутствия общей теории расчёта нелинейных САУ проще, быстрее и дешевле провести их испытания на математических моделях в системе MicroCAP 8.

Системы автоматического управления режимом работы входного усилительного каскада усилителя низкой частот (УНЧ) бывают **разомкнутыми** и **замкнутыми**.

В **разомкнутой** САУ вход и выход каскада не связаны между собой. В **замкнутой** САУ выходной сигнал, преобразованный цепью обратной связи (как правило, отрицательной) поступает на вход усилительного каскада.

По принципу построения различают САУ:

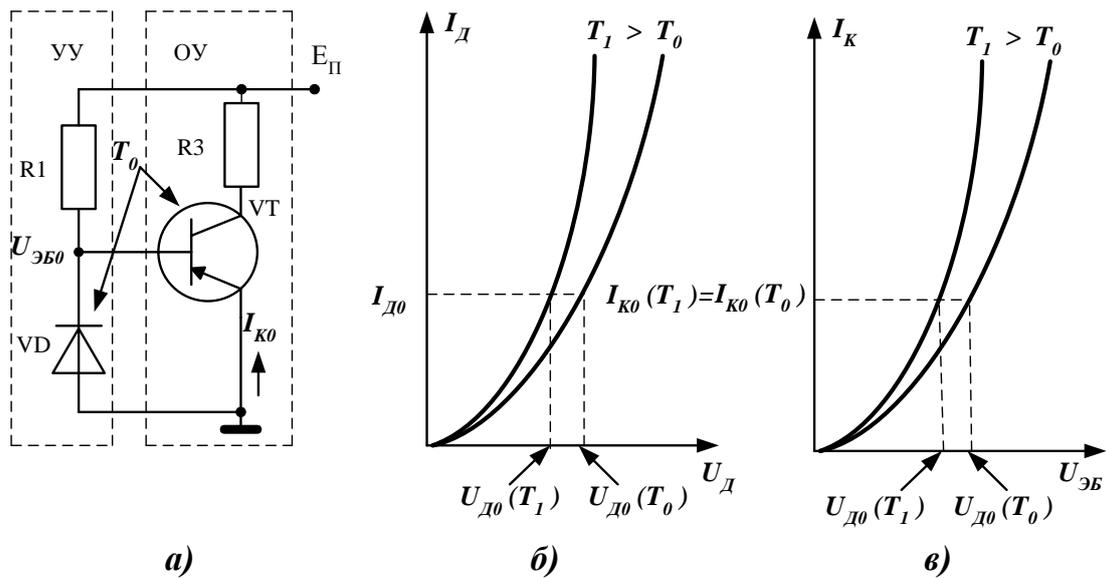
- с управлением по задающему воздействию (рисунки 3.31, а и 3.33, а);
- с управлением по возмущающему воздействию;
- с комбинированным управлением по задающему и по возмущающему воздействиям (рисунки 3.32, а и 3.33, б).



- а) – схема каскада с общим эмиттером;
 б) – вольт-амперная характеристика (ВАХ) биполярного транзистора
 (УУ – управляющее устройство; ОУ- объект управления)

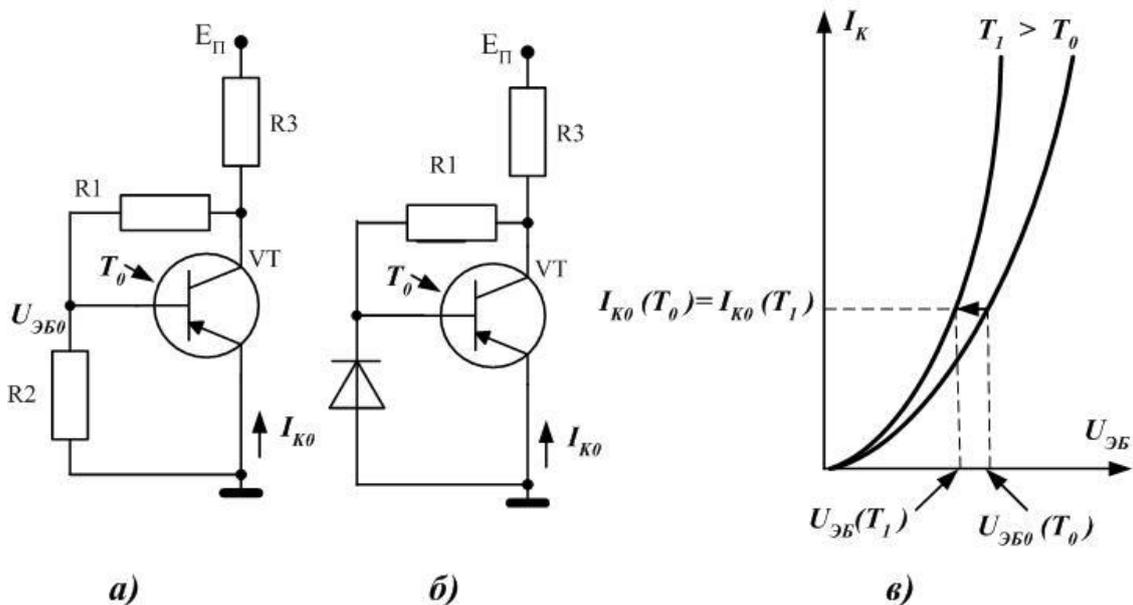
Рисунок 3.31 – Разомкнутая САУ с управлением по задающему воздействию [10]

В УНЧ следует разделять **задающее воздействие по постоянному току** – постоянное смещение на базе транзистора, снимаемое с делителя напряжения на резисторах, и **задающее воздействие по переменному току** – переменное напряжение на входе усилителя. Принято называть УНЧ двухмерными САУ, так как их выходной параметр характеризуется двумя значениями (величиной напряжения и величиной частоты). В усилительных каскадах усилителей постоянного тока (УПТ) имеется только **задающее воздействие по постоянному току**. УПТ являются одномерными САУ.



a – схема каскада с общим эмиттером; *б* – ВАХ диода;
в – ВАХ биполярного транзистора

Рисунок 3.32 – Разомкнутая САУ с комбинированным управлением по задающему и по возмущающему воздействиям [10]



a – с управлением по задающему воздействию; *б* – с комбинированным управлением по задающему и по возмущающему воздействиям;
в – ВАХ биполярного транзистора

Рисунок 3.33 – Замкнутые САУ [10]

Разомкнутые САУ с управлением по задающему воздействию наиболее просты, но имеют низкую температурную стабильность. Достоинство разомкнутой системы с комбинированным управлением – высокое качество регулирования при учете всех возмущающих воздействий; недостаток –

необходимость учета большого количества зависимостей возмущающих воздействий. Замкнутая система с управлением по задающему воздействию работает по отклонению, и регулируемая величина тока коллектора имеет какую-то ошибку. Для повышения точности работы замкнутой системы вводят комбинированное управление по задающему и возмущающему воздействиям. Достоинство замкнутой системы регулирования – универсальность; недостатки при грамотном построении замкнутой системы отсутствуют [10].

Поскольку элементы за счет герметизации защищены от воздействия атмосферного давления, от загрязнений и от повышенной влажности воздуха, а также, частично, от радиации, то основным **возмущающим воздействием** на УНЧ являются температура окружающей среды. Обычно учитывают воздействие температуры на характеристики полупроводниковых приборов (транзисторов и диодов), а более слабым воздействием температуры на характеристики остальных элементов пренебрегают.

3.4.3 Пример проведения сравнительных функциональных испытаний стабильности выходного параметра

1. Подготовим математическую модель схемы с общим эмиттером входного усилительного каскада с разомкнутой САУ и с управлением по задающему воздействию. Изображение математической модели этой схемы, представленной на рисунке 3.31, *a*, в системе MicroCAP 8 приведено на рисунке 3.34.

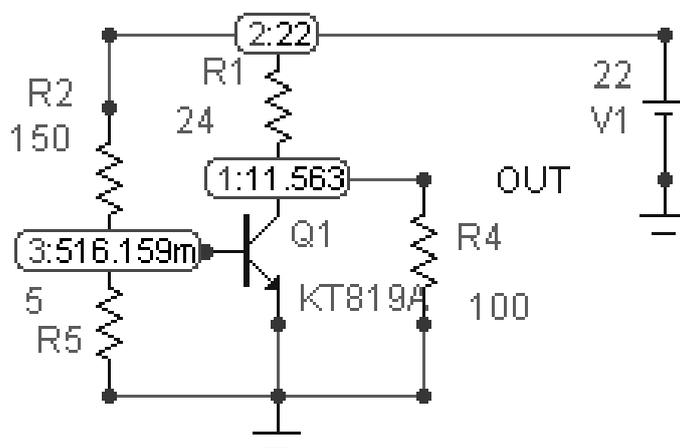
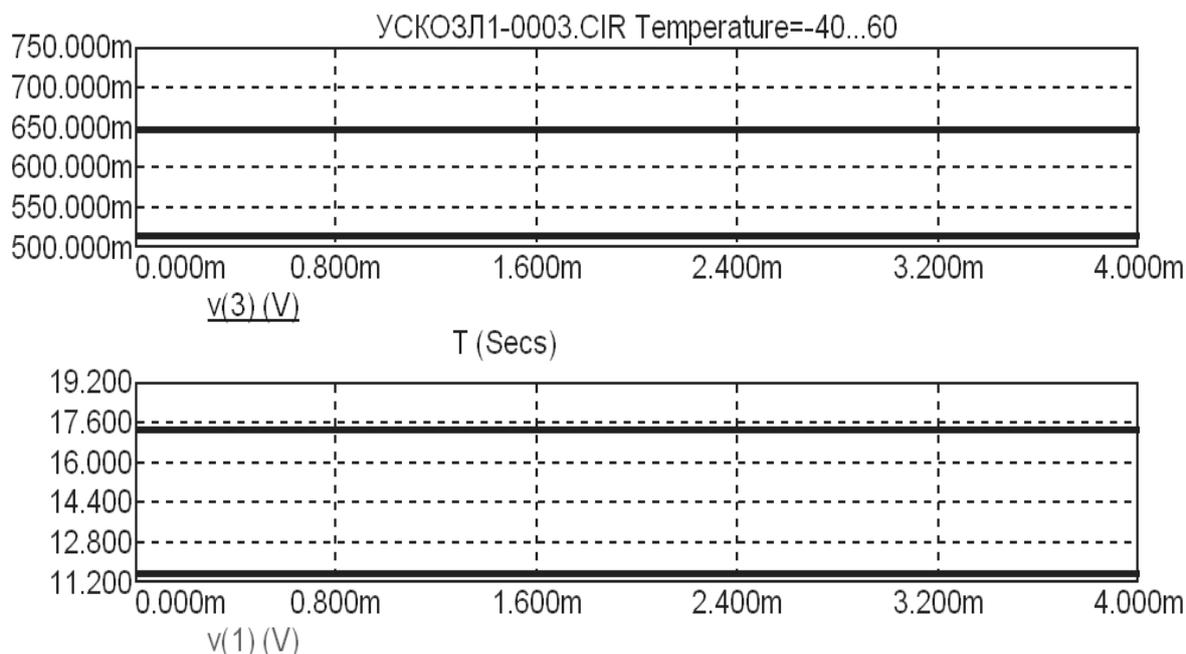


Рисунок 3.34 – Схема с общим эмиттером усилительного каскада с разомкнутой САУ и с управлением по задающему воздействию

Примечание. На рисунках 3.34, 3.36, 3.38, 3.40, 3.42, 3.44 значения напряжений в узлах схемы даны для температуры окружающей среды +60°C. Значения напряжений на схеме заключены в овалы и приведены в формате вида X:Y, где X – порядковый номер узла; Y – значение напряжения. Буква *m* обозначает милливольты.

2. В системе MicroCAP 8 получим эпюры напряжений в узлах этой схемы (с помощью команды *Анализ / Переходные процессы / Запуск*) для значений температуры окружающей среды -40°C и $+60^{\circ}\text{C}$ (рисунок 3.35). Более подробно работа с диалоговым окном задания параметров моделирования во временной области описана в пункте 3.3.4.



$V(3) = 648.2$ мВ и $V(1) = 17.29$ В для температуры окружающей среды -40°C ;
 $V(3) = 516.2$ мВ и $V(1) = 11.56$ В для температуры окружающей среды $+60^{\circ}\text{C}$

Рисунок 3.35 – Эпюры напряжений в узлах схемы, представленной на рисунке 3.34

Примечание. В подписях к рисункам 3.35, 3.37, 3.39, 3.41 приняты следующие обозначения: $V(3)$ – напряжение на входе схемы (база транзистора); $V(1)$ – напряжение на выходе схемы (коллектор транзистора);

3. Оценим температурную стабильность выходного параметра по формуле:

$$\delta\left(\frac{\%}{^{\circ}\text{C}}\right) = \frac{|V_{1,T_{\max}} - V_{1,T_{\min}}|}{0.5 T_{\max} - T_{\min} [V_{1,T_{\max}} + V_{1,T_{\min}}]} \cdot 100\% .$$

Для значений напряжений показанных на рисунке 3.35 получим:

$$\delta\left(\frac{\%}{^{\circ}\text{C}}\right) = \frac{|11.56 - 17.29|}{0.5 \cdot 60 + 40 \cdot 11.56 + 17.29} \cdot 100\% = 0.397 .$$

4. Подготовим математическую модель схемы с общим эмиттером с разомкнутой САУ и с комбинированным управлением по задающему и по возмущающему воздействиям. Изображение математической модели этой

схемы, представленной на рисунке 3.32, а, в системе MicroCAP 8 приведено на рисунке 3.36.

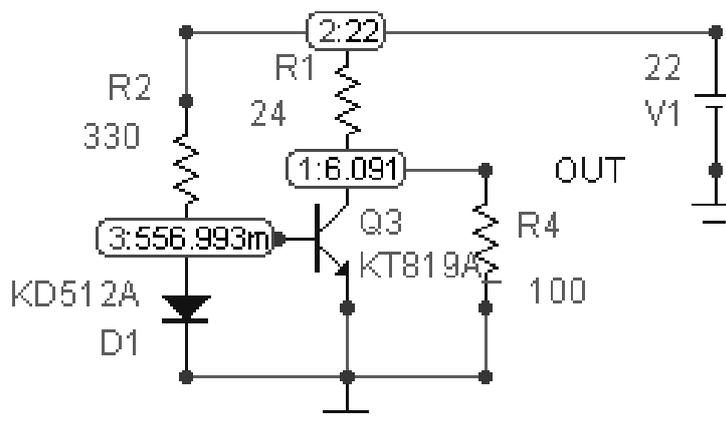
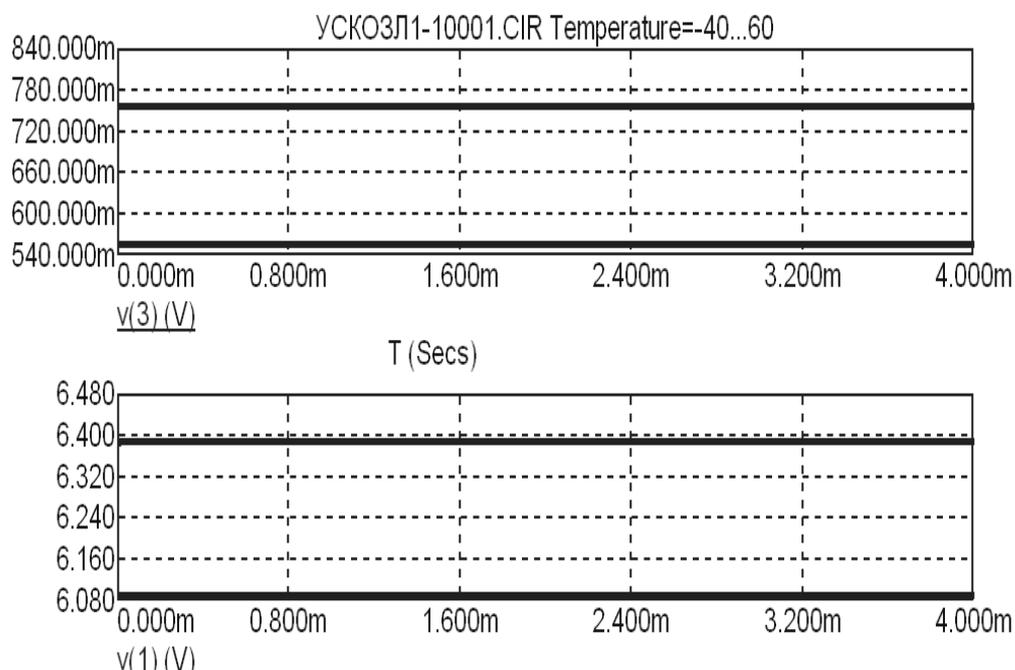


Рисунок 3.36 – Схема с общим эмиттером усилительного каскада с разомкнутой САУ и с комбинированным управлением по задающему и по возмущающему воздействиям

5. В системе MicroCAP 8 получим эпюры напряжений в узлах этой схемы для значений температуры окружающей среды -40°C и $+60^{\circ}\text{C}$ (рисунок 3.37) и оценим температурную стабильность выходного параметра:

$$\delta \left(\frac{\%}{^{\circ}\text{C}} \right) = \frac{|6.09 - 6.39|}{0.5 \cdot 60 + 40} \cdot 100\% = 0.048.$$



$V(3) = 756 \text{ мВ}$ и $V(1) = 6.39 \text{ В}$ для температуры окружающей среды -40°C ;
 $V(3) = 557 \text{ мВ}$ и $V(1) = 6.09 \text{ В}$ для температуры окружающей среды $+60^{\circ}\text{C}$

Рисунок 3.37 – Эпюры напряжений в узлах схемы, представленной на рисунке 3.36

6. Подготовим математическую модель схемы с общим эмиттером усилительного каскада замкнутой САУ с комбинированным управлением по задающему и по возмущающему воздействиям. Изображение математической модели этой схемы, представленной на рисунке 3.33, б, в системе MicroCAP 8 приведено на рисунке 3.38.

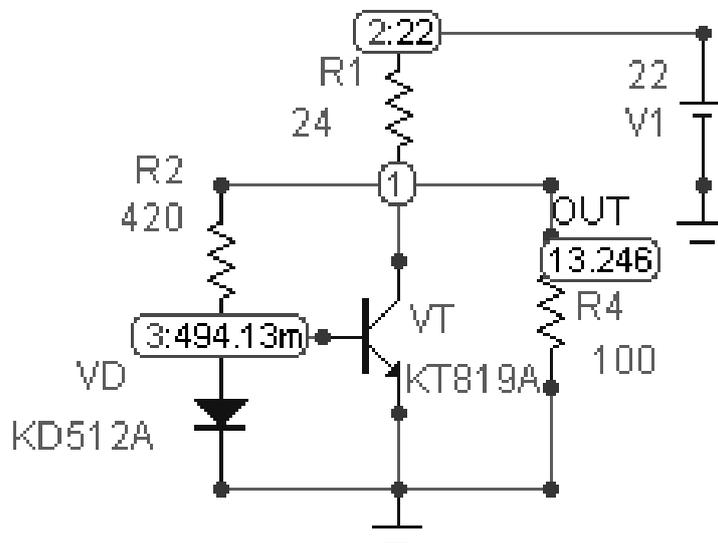


Рисунок 3.38 – Схема с общим эмиттером усилительного каскада замкнутой САУ с комбинированным управлением по задающему и по возмущающему воздействиям

7. В системе MicroCAP 8 получим эпюры напряжений в узлах этой схемы для значений температуры окружающей среды -40°C и $+60^{\circ}\text{C}$ (рисунок 3.39) и оценим температурную стабильность выходного параметра:

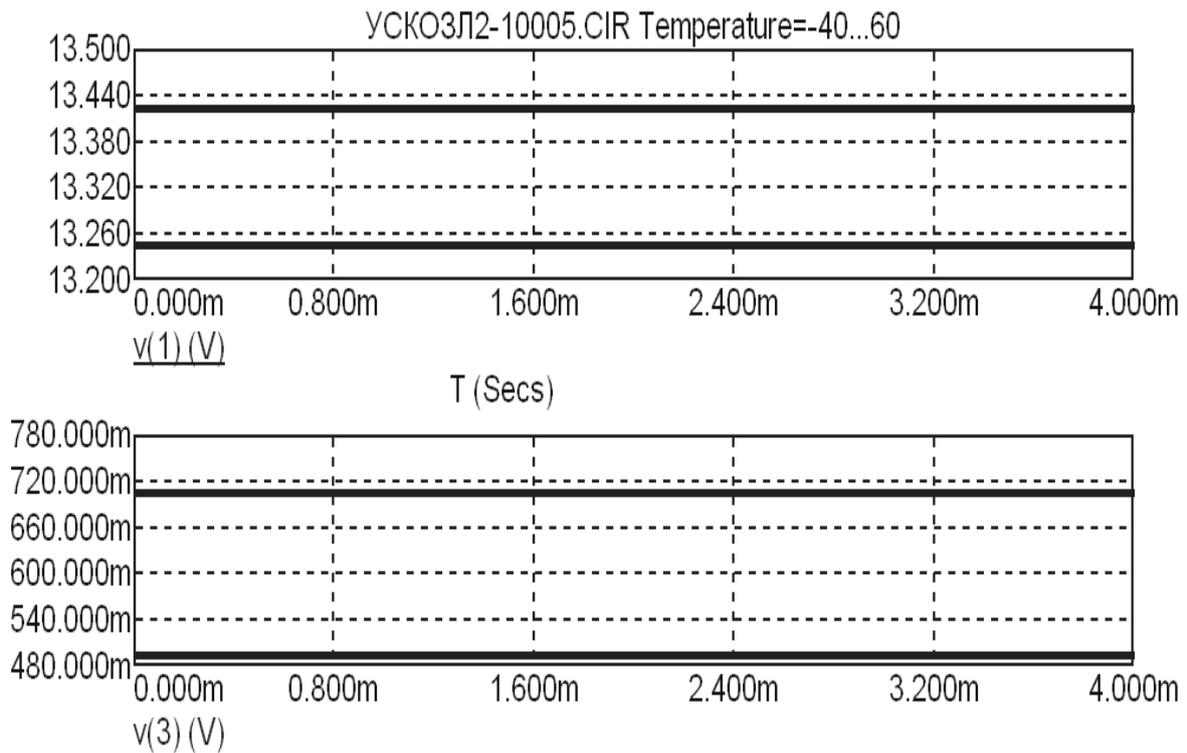
$$\delta\left(\frac{\%}{^{\circ}\text{C}}\right) = \frac{|13.246 - 13.42|}{0.5 \cdot 60 + 40 \cdot 13.246 + 13.42} \cdot 100\% = 0.013.$$

8. Подготовим математическую модель схемы с общим эмиттером усилительного каскада замкнутой САУ с управлением по задающему воздействию. Изображение математической модели этой схемы, представленной на рисунке 3.33 а, в системе MicroCAP 8 приведено на рисунке 3.40.

9. В системе MicroCAP 8 получим эпюры напряжений в узлах этой схемы для значений температуры окружающей среды -40°C и $+60^{\circ}\text{C}$ (рисунок 3.41) и оценим температурную стабильность выходного параметра:

$$\delta\left(\frac{\%}{^{\circ}\text{C}}\right) = \frac{|16.963 - 16.969|}{0.5 \cdot 60 + 40 \cdot 16.963 + 16.969} \cdot 100\% = 0.00035.$$

10. Подготовим математическую модель схемы с общим эмиттером усилительного каскада с разомкнутой САУ и с управлением по задающему воздействию в системе MicroCAP 8 при подаче на вход САУ синусоидального напряжения. Изображение математической модели этой схемы в системе MicroCAP 8 приведено на рисунке 3.42.



$V(3) = 704$ мВ и $V(1) = 13.42$ В для температуры окружающей среды -40°C ;
 $V(3) = 494$ мВ и $V(1) = 13.246$ В для температуры окружающей среды $+60^{\circ}\text{C}$

Рисунок 3.39 – Эпюры напряжений в узлах схемы, представленной на рисунке 3.38

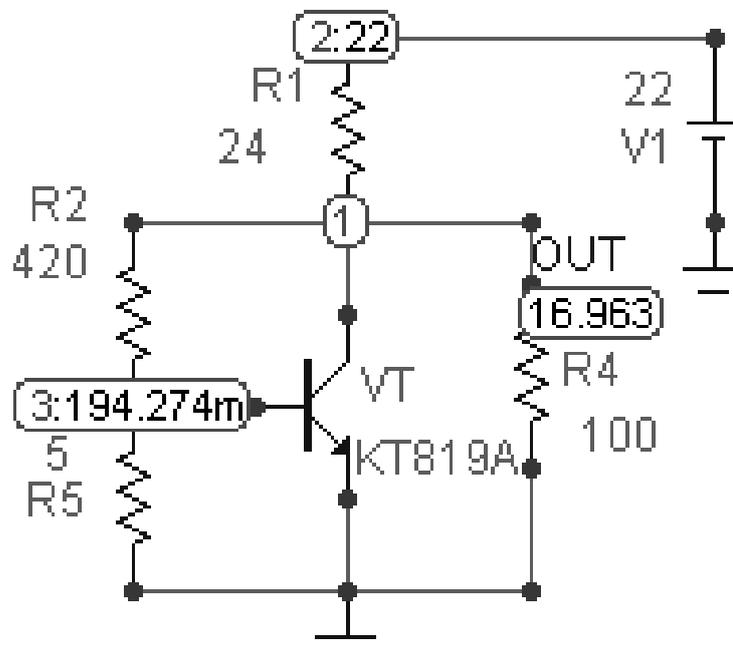
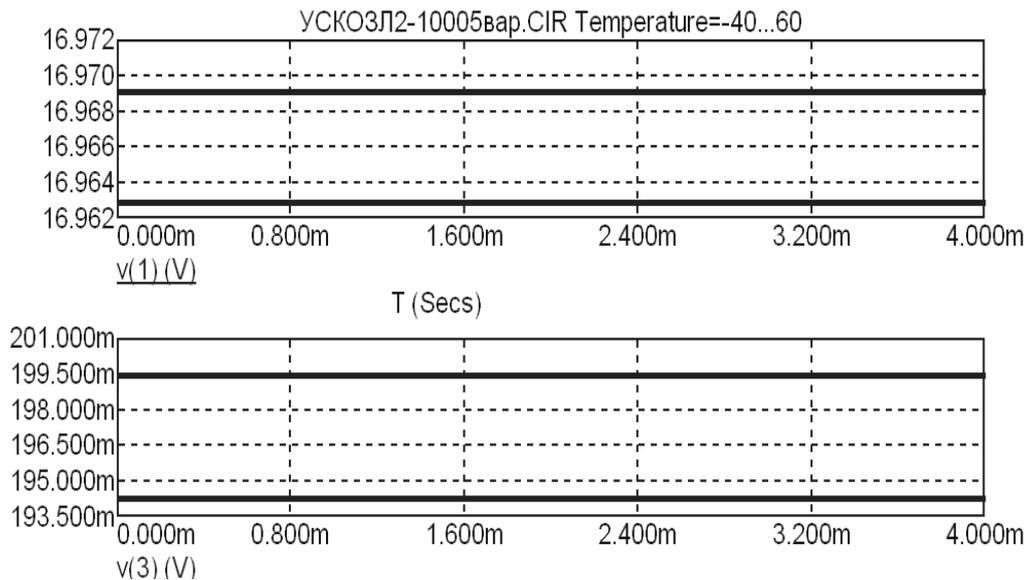


Рисунок 3.40 – Схема с общим эмиттером усилительного каскада замкнутой САУ с управлением по задающему воздействию



$V(3) = 199 \text{ мВ}$ и $V(1) = 16.969 \text{ В}$ для температуры окружающей среды -40°C ;
 $V(3) = 194.274 \text{ мВ}$ и $V(1) = 16.963 \text{ В}$ для температуры окружающей среды $+60^\circ\text{C}$

Рисунок 3.41 – Эпюры напряжений в узлах схемы, представленной на рисунке 3.40

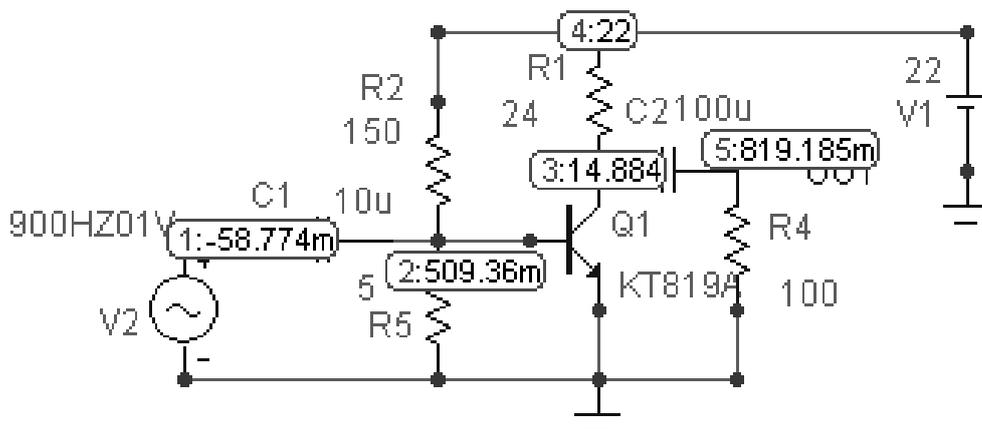


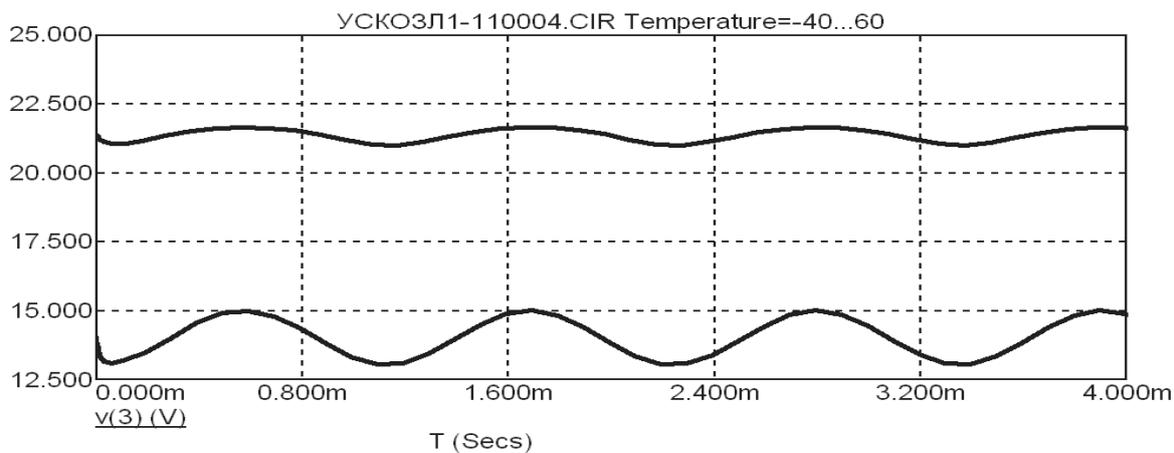
Рисунок 3.42 – Схема с общим эмиттером усилительного каскада с разомкнутой САУ и с управлением по задающему воздействию при подаче на вход САУ синусоидального напряжения

11. В системе MicroCAP 8 получим эпюры напряжений в узлах этой схемы для значений температуры окружающей среды -40°C и $+60^\circ\text{C}$ (рисунок 3.43) и оценим температурную стабильность выходного параметра по формуле:

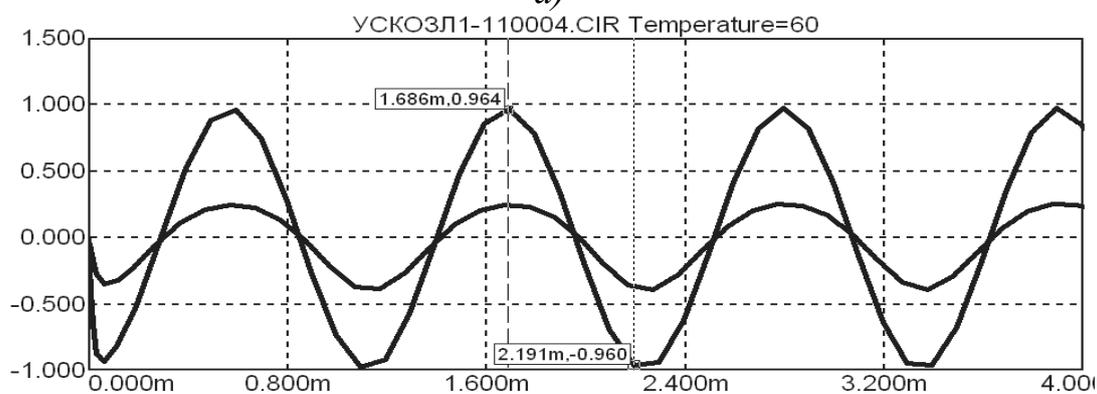
$$\delta \left(\frac{\%}{^\circ\text{C}} \right) = \frac{|V_{5, +60^\circ\text{C}} - V_{5, -40^\circ\text{C}}|}{0.5 \cdot 60 + 40 [V_{5, +60^\circ\text{C}} + V_{5, -40^\circ\text{C}}]} \cdot 100\% =$$

$$= \frac{|0.962 - 0.317|}{50 \cdot 0.962 + 0.317} \cdot 100\% = 1.009,$$

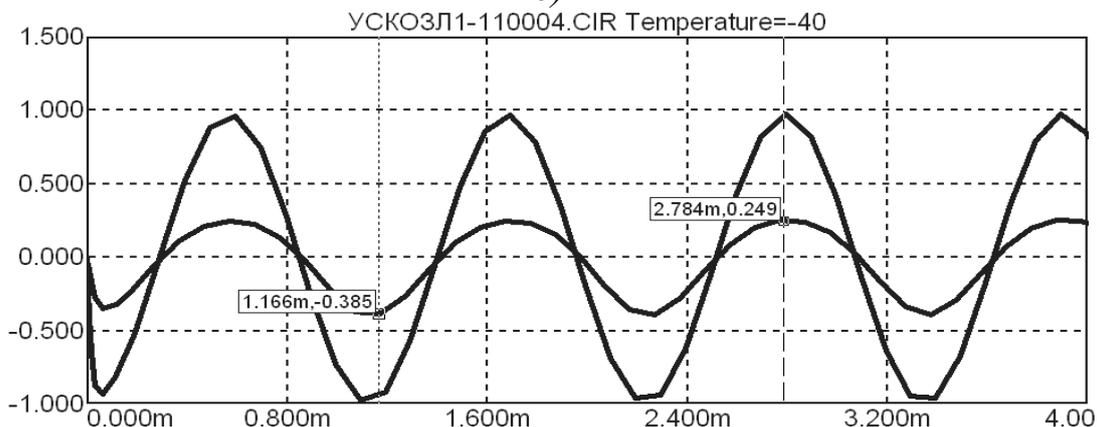
где $V(5, +60^{\circ}\text{C})$, $V(5, -40^{\circ}\text{C})$ – значение напряжения на узле №5 схемы (выход усилительного каскада) при температуре $+60^{\circ}\text{C}$ и -40°C , соответственно.



а)



б)



в)

а – на коллекторе транзистора; б – напряжение на выходе каскада

$V(5, +60^{\circ}\text{C}) = 0.5 \cdot (0.96 + 0.964) = 0.962 \text{ В}$ для температуры $+60^{\circ}\text{C}$;

в – напряжение на выходе каскада $V(5, -40^{\circ}\text{C}) = 0.5 \cdot (0.385 + 0.249) = 0.317 \text{ В}$
для температуры -40°C

Рисунок 3.43 – Эпюры напряжений в узлах схемы, представленной на рисунке 3.42

12. Подготовим математическую модель схемы с общим эмиттером усилительного каскада с замкнутой САУ с комбинированным управлением по задающему и по возмущающему воздействиям в системе MicroCAP 8 при подаче на вход САУ синусоидального напряжения. Изображение математической модели этой схемы в системе MicroCAP 8 приведено на рисунке 3.44.

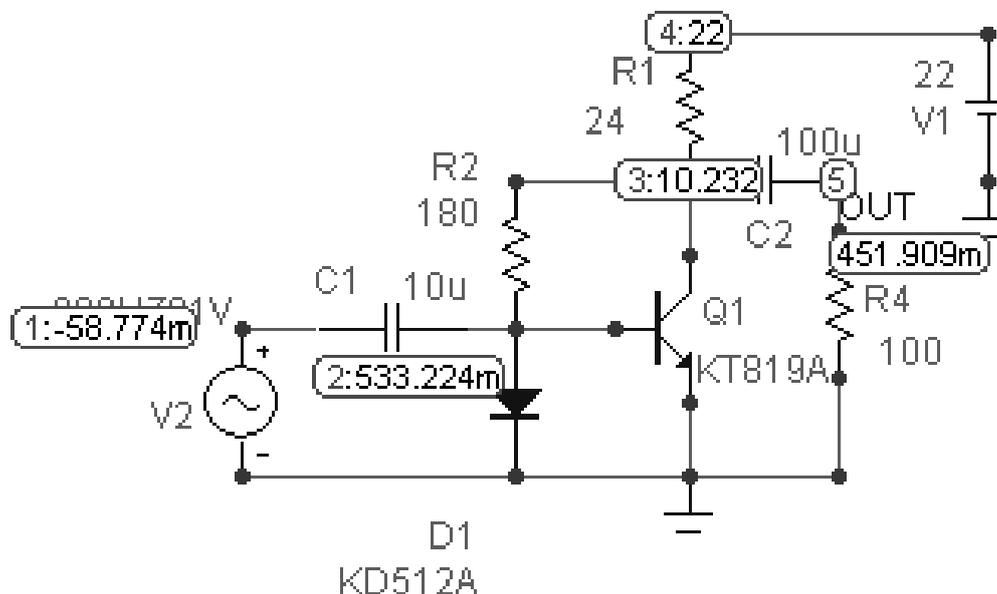
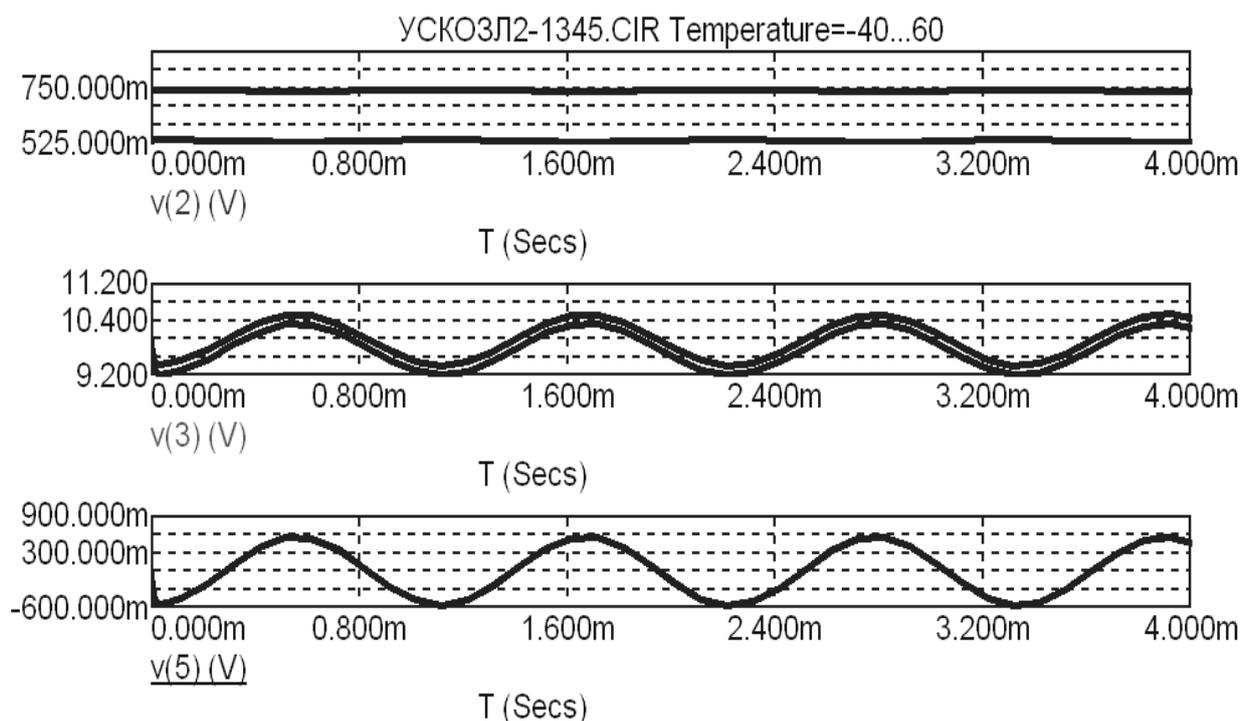


Рисунок 3.44 – Схема с общим эмиттером усилительного каскада с замкнутой САУ с комбинированным управлением по задающему и по возмущающему воздействиям при подаче на вход САУ синусоидального напряжения

13. В системе MicroCAP 8 получим эпюры напряжений в узлах этой схемы для значений температуры окружающей среды -40°C и $+60^{\circ}\text{C}$ (рисунок 3.45). Из рисунка видно, что напряжение на выходе каскада $V(5, +60^{\circ}\text{C}) \approx V(5, -40^{\circ}\text{C})$. Это означает, что $\delta(\%/^{\circ}\text{C}) \approx 0$, то есть температурная стабильность выходного параметра близка к идеальной.

14. Результаты сравнительных функциональных испытаний стабильности выходного напряжения применительно к математическим моделям усилительных каскадов при изменении температуры эксплуатации от -40°C до $+60^{\circ}\text{C}$ представлены в таблице 3.10. Из этой таблицы видно, что на постоянном токе наибольший температурный дрейф $\delta(\%/^{\circ}\text{C}) = 0.397$ наблюдался у каскада с разомкнутой САУ и с управлением по задающему воздействию, а наименьший $\delta(\%/^{\circ}\text{C}) = 0.00035$ – у каскада с замкнутой САУ с управлением по задающему воздействию. При подаче на вход каскада синусоидального напряжения наибольший температурный дрейф $\delta(\%/^{\circ}\text{C}) = 1.009$ наблюдался у каскада с разомкнутой САУ и с управлением по задающему воздействию, а наименьший $\delta(\%/^{\circ}\text{C}) \approx 0$ – у каскада с комбинированным управлением по задающему и по возмущающему воздействиям.



**Рисунок 3.45 – Эпюры напряжений в узлах схемы,
представленной на рисунке 3.44**

**Таблица 3.10 – Результаты сравнительных функциональных испытаний
стабильности выходного напряжения**

Тип усилительного каскада	δ (%/°C)
Каскад с разомкнутой САУ и с управлением по задающему воздействию (рисунок 3.34)	0.397
Каскад с разомкнутой САУ и с комбинированным управлением по задающему и по возмущающему воздействиям (рисунок 3.36)	0.048
Каскад с замкнутой САУ с комбинированным управлением по задающему и по возмущающему воздействиям (рисунок 3.38)	0.013
Каскад с замкнутой САУ с управлением по задающему воздействию (рисунок 3.40)	0.00035
Каскад с разомкнутой САУ и с управлением по задающему воздействию при подаче на вход каскада синусоидального напряжения (рисунок 3.42)	1.009
Каскад с замкнутой САУ с комбинированным управлением по задающему и по возмущающему воздействиям при подаче на вход каскада синусоидального напряжения (рисунок 3.44)	≈ 0

3.4.4 Лабораторное задание

Получить у преподавателя номер варианта задания. Провести сравнительные функциональные испытания стабильности выходного напряжения $u = U_{\text{ВЫХ}} = U_{R4}$ математических моделей усилительных каскадов, изображённых на рисунках 3.34, 3.36, 3.38, 3.40, 3.42, 3.44, при изменении температуры эксплуатации от -40°C до $+60^{\circ}\text{C}$. Для всех вариантов задания принять тип транзистора КТ819А, тип диода КД512А, величину сопротивления $R4 = 100$ Ом, величину сопротивления $R5 = 5$ Ом, амплитуду переменного напряжения с частотой 900 Гц $V2 = 0.1$ В. Величины напряжения питания $V1$ и сопротивлений $R1$, $R2$, $R4$ найти в таблице 3.11 для заданного номера варианта. При выполнении задания руководствоваться методикой проведения сравнительных функциональных испытаний стабильности выходного параметра усилительных каскадов, подробно изложенной в пункте 3.4.3.

Таблица 3.11 – Величины напряжения питания $V1$ и сопротивлений $R1$, $R2$, $R4$ для разных вариантов задания

№ варианта	$R2$, Ом для рис. 3.34, 3.42 и 3.44	$R2$, Ом для рис. 3.36, 3.38 и 3.40	$V1$, В	$R5$, Ом	$R1$, Ом	№ варианта	$R2$, Ом для рис. 3.34, 3.42 и 3.44	$R2$, Ом для рис. 3.36, 3.38 и 3.40	$V1$, В	$R5$, Ом	$R1$, Ом
1	190	340	20	4.7	110	13	190	400	23	5.6	96
2	140	350	21	5.1	120	14	140	410	24	6.2	110
3	160	360	24	5.6	83	15	160	340	25	6.8	130
4	130	370	23	6.2	96	16	130	350	26	7.5	110
5	170	380	20	6.8	110	17	170	360	23	4.7	120
6	200	390	21	7.5	130	18	200	370	24	5.1	83
7	160	400	24	4.7	110	19	160	340	25	5.6	96
8	130	410	23	5.1	120	20	130	350	26	6.2	110
9	170	340	20	5.6	83	21	170	360	23	6.8	130
10	200	350	21	6.2	96	22	200	370	24	7.5	110
11	190	360	24	6.8	110	23	190	380	25	4.7	120
12	140	370	23	7.5	130	24	140	390	26	5.1	83

3.4.5 Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Графики, таблицы и расчёты по методике, изложенной в пункте 3.4.3, отображающие результаты сравнительных функциональных испытаний стабильности выходного напряжения $u = U_{\text{ВЫХ}} = U_{R4}$ при изменении температуры. Математические модели усилительных каскадов подготовить в системе MicroCAP 8. В результате расчётов должны быть решены все вопросы, изложенные в лабораторном задании.
3. Выводы по работе.

3.4.6 Перечень контрольных вопросов, которые могут быть заданы во время защиты отчёта по работе

1. Каковы преимущества методов сравнительных испытаний РЭС при изменении температуры эксплуатации в широком диапазоне на математических моделях в системе MicroCAP 8 перед испытаниями на реальных образцах РЭС?
2. К какому типу САУ относятся усилительные каскады (к линейным или к нелинейным):
 - а) по отношению к регулируемому воздействию;
 - б) по отношению возмущающего воздействия температуры эксплуатации?
3. Чем отличаются разомкнутые САУ от замкнутых?
4. Чем отличаются САУ:
 - а) с управлением по задающему воздействию;
 - б) с управлением по возмущающему воздействию;
 - в) с комбинированным управлением по задающему и по возмущающему воздействиям?
5. Каково главное достоинство замкнутой системы регулирования?
6. Каков порядок величины температурного дрейфа у каскада с разомкнутой САУ и с управлением по задающему воздействию, и каков у каскада с комбинированным управлением по задающему и по возмущающему воздействиям?

4 ОПИСАНИЯ И ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ, В КОТОРЫХ ИСПОЛЬЗУЕТСЯ МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ТЕОРИИ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

4.1 Определение статистических характеристик технического обслуживания замкнутой системы массового обслуживания с ожиданием

4.1.1 Цель работы

Обучить студентов применению методики по определению статистических характеристик технического обслуживания применительно к замкнутой системе массового обслуживания с ожиданием. Методика базируется на использовании программного комплекса MathCAD.

4.1.2 Общие сведения о применении теории массового обслуживания для определения статистических характеристик технического обслуживания

Теория массового обслуживания (ТМО) изучает статистические характеристики систем массового обслуживания. **Система массового обслуживания** (СМО) – это совокупность однородных обслуживающих устройств (приборов, мастерских и т.д.), называемых каналами обслуживания. Примерами СМО могут служить сборочные цеха, ремонтные мастерские, инженерно-авиационная служба, восстанавливаемая резервированная аппаратура, телефонные станции, все виды транспорта (вместе с билетными кассами) и т.д.

Основными элементами СМО, определяющими их пропускную способность, являются: число каналов обслуживания, быстродействие каждого канала и поток событий (заявок на обслуживание, поток обслуженных заявок и т.д.).

По признаку потерь заявок на обслуживание СМО подразделяются на три типа: **с отказами**, **с ожиданием** и **смешанного типа**.

В **СМО с отказами** заявки обслуживаются немедленно, если каналы свободны, или получают отказ и теряются, если все каналы заняты. Пример такой СМО – телефонная сеть. В **СМО с ожиданием** (например, в системах ремонта техники) все заявки выстраиваются в очередь, если каналы заняты. В **СМО смешанного типа** имеются **ограничения на время пребывания заявки в системе или на длину очереди**. При невыполнении требуемого ограничения заявка покидает СМО необслуженной.

По числу каналов обслуживания, которые могут одновременно обслуживать входные заявки, СМО делят на **одноканальные** и **многоканальные**.

Если обслуженная заявка покидает СМО, то СМО называют **открытыми**, а если снова поступает на обслуживание в СМО, то **замкнутыми**.

При выполнении лабораторной работы мы исследуем **замкнутую многоканальную СМО с ожиданием**, наиболее подходящую для описания процесса эксплуатации техники, в частности, для расчета характеристик ТО и показателей надежности резервируемой аппаратуры в зависимости от числа каналов и их производительности.

Пусть СМО с ожиданием содержит n работающих приборов и r каналов обслуживания. При одном отказе прибора получается одна заявка. Поток отказов порождает поток заявок, которые немедленно удовлетворяются обслуживанием, а когда все r каналов обслуживания заняты, заявки выстраиваются в очередь. В этом случае $r \leq k < n$, где k – число отказов приборов. Требуется найти вероятности пребывания системы в состоянии $P_k(t)$ в любой момент времени t для различных значений k . Вероятность $P_k(t)$ – это вероятность состояния системы, при котором k приборов отказали, из них r приборов обслуживаются, а остальные $(k - r)$ стоят в очереди. Найденные значения $P_k(t)$ позволяют рассчитать все критерии, характеризующие степень удовлетворения потока заявок и степень использования каналов обслуживания. Предполагается, что вероятность безотказной работы любого прибора изменяется во времени по экспоненциальному закону $P(t) = \exp(-\lambda t)$, причём интенсивность отказов (поступления заявок) λ не зависит от времени. Если до момента t прибор был исправен, то вероятность отказа $P_{\text{ОТК}}(\Delta t)$ в малом промежутке времени Δt , следующем за временем t , для нашего случая определяется приближенным выражением:

$$P_{\text{ОТК}}(\Delta t) \approx \lambda \Delta t, \text{ при } \lambda \Delta t \ll 1. \quad (4.1)$$

По аналогии определяется вероятность завершения обслуживания заявки к моменту $t + \Delta t$, поступившей в момент t на обслуживание:

$$P_{\text{ОБС}}(\Delta t) \approx \mu \Delta t, \text{ при } \mu \Delta t \ll 1. \quad (4.2)$$

В (4.2) μ – это интенсивность восстановления (обслуживания, ремонта) в одном канале. Граф изменения состояний замкнутой многоканальной СМО с ожиданием представлен на рисунке 4.1.

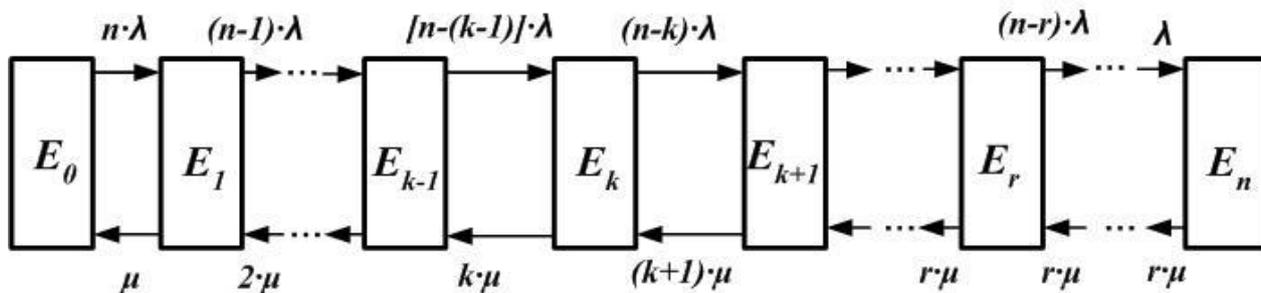


Рисунок 4.1 – Граф изменения состояний замкнутой многоканальной СМО с ожиданием

Под термином **техническое состояние** E_k понимают совокупность подверженных изменению в процессе производства или эксплуатации свойств

объекта, характеризуемую в определённый момент признаками, установленными технической документацией.

На рисунке 4.1 введены следующие обозначения:

- E_k – техническое состояние СМО, при котором k из n работающих приборов находятся в состоянии неработоспособности;

- r – число каналов обслуживания;

- λ [ч⁻¹] – интенсивность поступления заявок, равная интенсивности от-казов одного прибора;

- μ [ч⁻¹] – интенсивность обслуживания (восстановления или ремонта) в одном канале.

Указанная СМО может использоваться как система технического обслуживания не только приборов, но и транспорта (парки самолетов, автомобилей и т.п.).

Академик А.Н.Колмогоров сформулировал инженерное правило составления дифференциальных уравнений по виду графа или по виду схемы состояний [1, 4]:

«Производная от вероятности пребывания системы в любой момент времени в состоянии k равна алгебраической сумме произведений интенсивностей переходов в k -ое состояние (или из k -ого состояния) на вероятность того состояния, откуда совершается переход в k -ое состояние. Причем, тем слагаемым, которым соответствуют уходящие стрелки из k -ого состояния, приписывается знак «минус», а входящим – «плюс».

Анализ графа (рисунок 4.1) позволяет вывести дифференциальное уравнение для вероятностей состояний:

$$\frac{dP_k}{dt} = n - k + 1 \cdot \lambda \cdot P_{k-1} - [n - k \cdot \lambda + k \cdot \mu] \cdot P_k + k + 1 \cdot \mu \cdot P_{k+1} \quad (4.3)$$

Для установившегося режима $\frac{dP_k}{dt} = 0$, так как P_k в этом случае не меняется во времени, и уравнение для вероятности состояний примет вид:

$$(n - k + 1) \cdot \lambda \cdot P_{k-1} + [(n - k) \cdot \lambda + k \cdot \mu] \cdot P_k + (k + 1) \cdot \mu \cdot P_{k+1} = 0. \quad (4.4)$$

Решение уравнения для вероятностей в этом случае дает результат:

$$P_k = A_k \cdot P_0, \quad (4.5)$$

где P_0 – вероятность того, что работают все приборы.

$$P_0 = \frac{1}{1 + \sum_k A_k}; \quad (4.6)$$

$$A_k = \frac{n!}{2^{k-2} \cdot 2! \cdot (n - k)!} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k. \quad (4.7)$$

Для проверки правильности расчета P_k используется нормировочное отношение:

$$\sum_{k=0}^n P_k = 1. \quad (4.8)$$

Суммарная погрешность расчета P_k находится из выражения:

$$\delta_{\Sigma} = 1 - \sum_{k=0}^n P_k. \quad (4.9)$$

Полученные выражения для P_k (вероятностей пребывания системы в состоянии k) позволяют с помощью схемы для определения статических характеристик СМО, изображенной на рисунке 4.2, определять эти характеристики [1]:

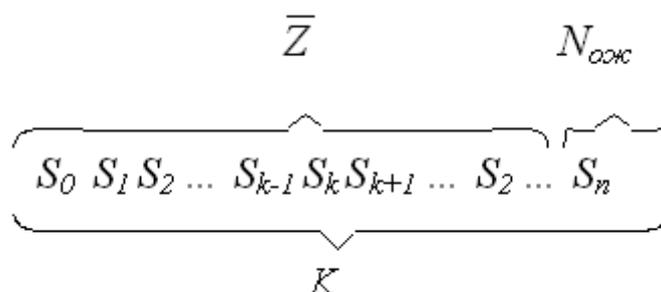


Рисунок 4.2 – Схема определения статических характеристик СМО

а) среднее количество заявок в каналах обслуживания, то есть среднее количество каналов занятых на ремонте:

$$\bar{Z} = \sum_{k=0}^r k \cdot P_k + \sum_{k=r+1}^n r \cdot P_k, \quad (4.10)$$

где первое слагаемое характеризует отсутствие очереди, а второе – очередь;

б) пропускная способность:

$$M = \frac{\bar{Z}}{T_B} = \bar{Z} \cdot \mu, \quad (4.11)$$

где T_B – среднее время восстановления одного прибора, величина обратная интенсивности восстановления;

в) среднее число заявок, находящихся в СМО (как в каналах обслуживания, так и в очереди на обслуживание):

$$K = \sum_{k=0}^n k \cdot P_k = n - \bar{Z} \cdot \frac{\mu}{\lambda}; \quad (4.12)$$

г) среднее число заявок, находящихся в очереди на обслуживание:

$$N_{ож} = \sum_{k=r+1}^n k - r \cdot P_k = n - \bar{Z} \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\lambda}\right); \quad (4.13)$$

д) среднее число простаивающих каналов обслуживания из-за отсутствия заявок:

$$R_{пп} = \sum_{k=0}^{r-1} r - k \cdot P_k; \quad (4.14)$$

е) среднее относительное время простоя каждого канала СМО из-за отсутствия заявок:

$$T_{\text{пр}} = \frac{R_{\text{пр}}}{r} \text{ при } r > 1; \quad (4.15)$$

ж) среднее относительное значение времени пребывания заявок в очереди на обслуживание:

$$T_{\text{ож}} = \frac{N_{\text{ож}}}{n}; \quad (4.16)$$

з) среднее относительное значение времени пребывания заявок в очереди и в канале обслуживания:

$$T_{\text{обс}} = \frac{K}{n}; \quad (4.17)$$

и) при определении минимального количества каналов обслуживания r_{min} , обеспечивающего отсутствие очереди на обслуживание, используют неравенство:

$$r_{\text{min}} \geq \frac{n \cdot \lambda}{\lambda + \mu} = n \cdot K_{\text{п}} = n \cdot 1 - K_{\text{г}}, \quad (4.18)$$

где $K_{\text{п}}$ и $K_{\text{г}}$ – коэффициенты простоя и готовности, соответственно.

4.1.3 Пример использования ТМО для расчета характеристик технического обслуживания замкнутой многоканальной СМО с ожиданием

Дана СМО, состоящая из $n = 9$ работающих приборов и $r = 3$ каналов обслуживания. Интенсивность поступления заявок, равная интенсивности отказов одного прибора, $\lambda = 0.1671$ [ч⁻¹], а интенсивность обслуживания (восстановления или ремонта) в одном канале $\mu = 0.3$ [ч⁻¹]. Требуется определить:

а) среднее количество заявок \bar{Z} , занятых в каналах обслуживания, то есть занятых каналов на ремонте;

б) пропускную способность M ;

в) среднее число заявок K , находящихся в СМО (как в каналах обслуживания, так и стоящих в очереди на обслуживание);

г) среднее число заявок $N_{\text{ож}}$, находящихся в очереди на обслуживание;

д) среднее число простаивающих каналов обслуживания из-за отсутствия заявок $R_{\text{пр}}$;

е) среднее относительное время простоя каждого канала обслуживания из-за отсутствия заявок $T_{\text{пр}}$;

ж) среднее относительное значение времени пребывания заявки в очереди на обслуживание $T_{\text{ож}}$;

з) среднее относительное значение времени пребывания заявки в очереди и в канале обслуживания $T_{\text{обс}}$;

и) потребное количество каналов, обеспечивающее отсутствие очереди $r_{\text{ОПТ}}$.

Решение:

а) находим вспомогательные коэффициенты A_k при $1 \leq k \leq n$:

$$A_k = \frac{n!}{r^{k-r} \cdot r! \cdot (n-k)!} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k;$$

$$A_1 = 7.52; A_2 = 11.169; A_3 = 14.516; A_4 = 16.171;$$

$$A_5 = 15.012; A_6 = 11.149; A_7 = 6.21; A_8 = 2.306; A_9 = 0.428;$$

б) определим вспомогательную величину P_0 (вероятность того, что в системе исправно работают все приборы):

$$P_0 = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^n A_k} = 0.012;$$

в) находим вероятность нахождения системы в k -ом состоянии, т.е. в состоянии, когда k приборов отказали ($1 \leq k \leq n$):

$$P_k = A_k \cdot P_0;$$

$$P_1 = 0.088; P_2 = 0.131; P_3 = 0.17; P_4 = 0.189;$$

$$P_5 = 0.176; P_6 = 0.13; P_7 = 0.073; P_8 = 0.027; P_9 = 5.009 \cdot 10^{-3}.$$

Проверка правильности решения:

$$\sum_{k=0}^n P_k = 1;$$

г) находим среднее количество заявок в каналах обслуживания:

$$\bar{Z} = \sum_{k=0}^r P_k \cdot k + \sum_{k=r+1}^n r \cdot P_k; \quad \bar{Z} = 2.658;$$

д) находим пропускную способность M :

$$M = \bar{Z} \cdot \mu; \quad M = 0.797;$$

е) находим среднее количество заявок находящихся в СМО (в каналах и в очереди):

$$K = n - \bar{Z} \cdot \frac{\mu}{\lambda}; \quad K = 4.227;$$

ж) находим среднее количество заявок, находящихся в очереди на обслуживание:

$$N_{\text{ОЖ}} = n - z \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\lambda}\right); \quad N_{\text{ОЖ}} = 1.569;$$

з) находим среднее количество простаивающих каналов из-за отсутствия заявок:

$$R_{\text{ПР}} = \sum_{k=0}^{r-1} (r-k) \cdot P_k; \quad R_{\text{ПР}} = 0.343;$$

и) находим среднее относительное время простоя из-за отсутствия заявок:

$$T_{\text{ПР}} = \frac{R_{\text{ПР}}}{r}; \quad T_{\text{ПР}} = 0.114;$$

к) находим среднее относительное значение времени пребывания заявки в очереди:

$$T_{\text{ОЖ}} = \frac{N_{\text{ОЖ}}}{n}; \quad T_{\text{ОЖ}} = 0.174;$$

л) находим среднее относительное значение времени пребывания заявки в СМО:

$$T_{\text{ОБС}} = \frac{K}{n}; \quad T_{\text{ОБС}} = 0.47;$$

м) определяем коэффициент готовности:

$$K_{\Gamma} = \frac{\mu}{\lambda + \mu}; \quad K_{\Gamma} = 0.642;$$

н) находим потребное количество каналов, необходимых для обеспечения отсутствия очереди:

$$r_{\text{ОПТ}} \geq \frac{n \cdot \lambda}{\lambda + \mu}; \quad r_{\text{ОПТ}} \geq 3.22.$$

Принимаем $r_{\text{ОПТ}} = 4$, то есть равным ближайшему целому числу большему 3.22.

4.1.4 Индивидуальные задания для расчета в лабораторной работе характеристик технического обслуживания замкнутой многоканальной СМО с ожиданием

Дана СМО, состоящая из n работающих приборов и r каналов обслуживания. Интенсивность поступления заявок (интенсивность отказов одного прибора) равна λ , а интенсивность обслуживания (восстановления или ремонта) в одном канале равна μ .

Определить:

а) среднее количество заявок \bar{Z} , занятых в каналах обслуживания, то есть занятых каналов на ремонте;

б) пропускную способность M ;

в) среднее число заявок K , находящихся в СМО (как в каналах обслуживания, так и стоящих в очереди на обслуживание);

г) среднее число заявок $N_{\text{ОЖ}}$, находящихся в очереди на обслуживание;

д) среднее число простаивающих каналов обслуживания из-за отсутствия заявок $R_{\text{ПР}}$;

е) среднее относительное время простоя каждого канала обслуживания из-за отсутствия заявок $T_{\text{ПР}}$;

ж) среднее относительное значение времени пребывания заявки в очереди на обслуживание $T_{\text{ОЖ}}$;

з) среднее относительное значение времени пребывания заявки в очереди и в канале обслуживания $T_{\text{ОБС}}$;

и) потребное количество каналов, обеспечивающее отсутствие очереди $r_{\text{ОПТ}}$.

Численные значения исходных величин для расчёта индивидуальных заданий даны в таблице 4.1 и зависит от номера варианта.

Таблица 4.1 – Численные значения исходных величин для расчёта индивидуальных заданий с использованием программного комплекса MathCAD

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
n	8	9	10	11	12	11	10	9	8	10
r	2	3	2	3	2	2	3	2	3	2
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
μ, [ч⁻¹]	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.6
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Выражение для определения λ: $x = \frac{\mu \cdot r}{\lambda \cdot n - r}$	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.75

4.1.5 Этапы выполнения лабораторной работы

1. Подготовиться к ответу на контрольные вопросы и получить у преподавателя допуск к выполнению задания.

2. Используя номер варианта задания, выданный преподавателем, выполнить расчет задания по пункту 4.1.4.

4.1.6 Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Письменный ответ на контрольные вопросы, указанные преподавателем.
3. Расчёт индивидуального задания.
4. Заключение – выводы по результатам работы.

4.1.7 Перечень контрольных вопросов, которые могут быть заданы во время защиты отчёта по работе

1. Какие разновидности СМО упоминаются в описании к лабораторной работе и в чём особенности этих СМО?
2. Какими статистическими характеристиками технического обслуживания характеризуют замкнутую многоканальную СМО с ожиданием, и каковы выражения для их расчёта?
3. Что изучает теория массового обслуживания?
4. Что называют системой массового обслуживания?
5. Что такое техническое состояние СМО?

4.2 Определение статистических характеристик технического обслуживания открытых систем массового обслуживания с ожиданием и с отказами

4.2.1 Цель работы

Обучить студентов применению методики определения статистических характеристик технического обслуживания открытых СМО с использованием программного комплекса MathCAD на примерах:

- а) одноканальной СМО с ожиданием;
- б) многоканальной СМО с ожиданием;
- в) многоканальной СМО смешанного типа с ограниченным временем ожидания;
- г) многоканальной СМО смешанного типа с ограничением по длине очереди и с отказами.

4.2.2 Общие сведения о СМО с ожиданием и с отказами

По признаку потерь заявок на обслуживание СМО подразделяются на три типа: с отказами, с ожиданием и смешанного типа. В СМО с отказами заявки обслуживаются немедленно, если каналы свободны, или получают отказ и теряются, если все каналы заняты. В СМО с ожиданием (например, в системах ремонта техники) все заявки выстраиваются в очередь, если каналы заняты. В СМО смешанного типа имеются ограничения на время пребывания заявки в системе или на длину очереди. При невыполнении требуемого ограничения заявка покидает СМО необслуженной. Если обслуженная заявка покидает СМО, то СМО называют открытыми, а если снова поступает на обслуживание в СМО, то замкнутыми. По числу каналов обслуживания, которые могут одновременно обслуживать входные заявки СМО делят на одноканальные и многоканальные.

Для сокращенного наименования СМО используют обозначения вида $A/B/n/m$, где A указывает распределение интервалов между событиями; B – распределение времени обслуживания; n – число каналов; m – количество мест в очереди. Показательное распределение обозначим буквой M ; Эрланговского порядка k – E_k ; постоянное время обслуживания или регулярный поток – D ; распределение обслуживания общего, неконкретизируемого типа – G [3]. В СМО с чистым ожиданием $m = \infty$, а в СМО с отказами $m = 0$. Таким образом, одноканальную СМО с чистым ожиданием, с простейшим потоком на входе, с интенсивностью λ и экспоненциальным временем обслуживания с показателем μ обозначают $M/M/1/\infty$, а многоканальную СМО такого же типа с числом каналов n – $M/M/n/\infty$. Многоканальную СМО с ожиданием смешанного типа, с ограничением на длину очереди, с простейшим потоком на входе и показательным законом распределения времени обслуживания обозначают $M/M/n/m$.

4.2.3 Общие сведения об открытой одноканальной СМО с ожиданием

Работу открытой одноканальной СМО с ожиданием можно проиллюстрировать с помощью графа переходов системы из одного состояния E_n в другое (рисунок 4.3). Как упоминалось в описании к лабораторной работе 4.1, под термином **техническое состояние** E_n понимают совокупность подверженных изменению в процессе производства или эксплуатации свойств объекта, характеризуемую в определённый момент признаками, установленными технической документацией. В техническом состоянии E_n в СМО находится n заявок на обслуживание. На рисунке 4.3 стрелки обозначают вероятности переходов системы из одного состояния E_n в другое.

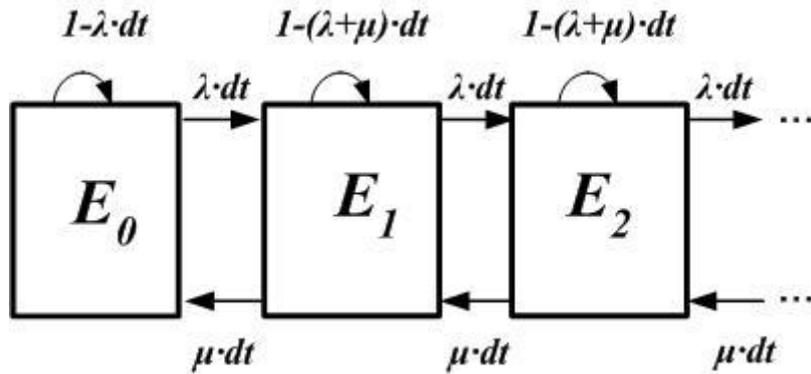


Рисунок 4.3 – Граф переходов открытой одноканальной СМО с ожиданием из одного состояния E_n в другое

Вероятности P_{nn} того, что система не изменит свое состояние E_n , не влияют на вероятности состояний. Поэтому на графах переходов обычно указывают только вероятности переходов типа $P_{n,n+1}$ и $P_{n,n-1}$, и только интенсивности переходов (рисунок 4.4). Такой граф называется схемой гибели и размножения.

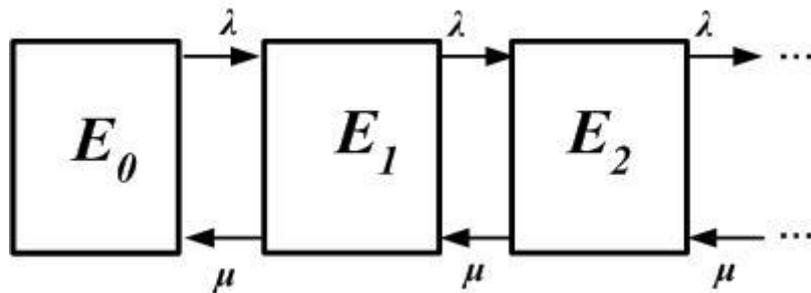


Рисунок 4.4 – Граф переходов открытой одноканальной СМО с ожиданием из одного состояния E_n в другое, изображённый в виде схемы гибели и размножения

Составим дифференциальные уравнения по виду графа состояний, изображённого в виде схемы гибели и размножения, по инженерному правилу А.Н. Колмогорова:

«Производная от вероятности пребывания системы в любой момент времени в состоянии k равна алгебраической сумме произведений интенсивностей переходов в k -ое состояние (или из k -ого состояния) на вероятность того состояния, откуда совершается переход в k -ое состояние. Причем, тем слагаемым, которым соответствуют уходящие стрелки из k -ого состояния, приписывается знак «минус», а входящим – «плюс».

$$\frac{dP_0}{dt} = -\lambda \cdot P_0 + \mu \cdot P_1 ; \tag{4.19}$$

$$\dots\dots\dots$$

$$\frac{dP_n}{dt} = \lambda \cdot P_{n-1} - (\lambda + \mu) \cdot P_n + \mu \cdot P_{n+1} . \tag{4.20}$$

Для стационарного режима:

$$\frac{dP_n}{dt} = 0 \quad (4.21)$$

и система дифференциальных уравнений преобразуется в систему линейных уравнений:

$$0 = -\lambda \cdot P_0 + \mu \cdot P_1; \quad (4.22)$$

$$0 = \lambda \cdot P_0 - (\lambda + \mu) \cdot P_1 + \mu \cdot P_2. \quad (4.22a)$$

$$\dots\dots\dots$$

$$0 = \lambda \cdot P_{n-1} - (\lambda + \mu) \cdot P_n + \mu \cdot P_{n+1}. \quad (4.23)$$

Откуда $P_1 = \frac{\lambda}{\mu} \cdot P_0$; $P_2 = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2 \cdot P_0$ и $P_n = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \cdot P_0$.

Учитывая, что:

$$\sum_{n=0}^{\infty} P_n = 1, \quad (4.24)$$

получаем:

$$1 = P_0 \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n = \frac{P_0}{\left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right)}, \quad (4.25)$$

$$P_0 = 1 - \alpha = 1 - \frac{\lambda}{\mu}; \quad (4.26)$$

$$P_n = (1 - \alpha) \cdot \alpha^n; \quad n = 1, 2, \dots \quad (4.27)$$

Параметр $\alpha = \lambda/\mu$ выражает среднее число заявок, приходящихся на среднее время обслуживания одной заявки, то есть степень насыщения в системе и называется загрузкой или коэффициентом использования СМО. Для одноканальных СМО при $\alpha > 1$ установившегося режима не существует, и очередь растет неограниченно. Получим статистические характеристики открытой одноканальной СМО с ожиданием [28].

Среднее число заявок в системе:

$$K = \sum_{n=0}^{\infty} n \cdot P_n = 1 - \alpha \cdot \sum_{n=0}^{\infty} n \cdot \alpha^n = \frac{\alpha}{1 - \alpha}. \quad (4.28)$$

Среднее число \bar{Z} занятых каналов:

$$\bar{Z} = P_{n>0} = 1 - P_0 = \alpha. \quad (4.29)$$

Среднее число заявок $N_{ож}$, находящихся в очереди на обслуживание:

$$N_{ож} = K - \bar{Z} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} - \alpha = \frac{\alpha^2}{1 - \alpha}. \quad (4.30)$$

4.2.4 Общие сведения об открытой многоканальной СМО смешанного типа с ограниченным временем ожидания

Для такой СМО заявки на обслуживание, поступающие на вход системы и заставшие все каналы обслуживания занятыми, встают в очередь. По количеству мест очередь не имеет ограничений. Но заявка, простоявшая некоторое время в очереди и не получившая обслуживания, покидает очередь с интенсивностью ухода ν . Время ожидания распределено экспоненциально со средним сроком ожидания:

$$\bar{t}_{\text{ож}} = \frac{1}{\nu}. \quad (4.31)$$

При $\nu \rightarrow \infty$ многоканальная СМО смешанного типа, с ограниченным временем ожидания, с числом каналов обслуживания s переходит в многоканальную СМО с отказами, а при $\nu \rightarrow 0$ – в многоканальную чистую СМО с ожиданием. Это позволяет использовать приведённые в данном разделе формулы для СМО смешанного типа при расчёте других СМО указанных выше типов, в зависимости от численного значения ν .

Расчёт проводим по методике, изложенной в пункте 4.2.3 для открытой одноканальной СМО с ожиданием. По инженерному правилу А.Н.Колмогорова по виду графа состояний, изображённого на рисунке 4.5 в виде схемы гибели и размножения, составим систему дифференциальных уравнений. Для стационарного режима система этих дифференциальных уравнений преобразуется в систему линейных уравнений из-за того, что $\frac{dP_n}{dt} = 0$. Из линейных уравнений методом подстановки, учитывая, что

$\sum_{n=0}^{\infty} P_n = 1$ получим выражения для вероятностей P_n состояний n [28]:

$$P_n = \frac{\alpha^n}{n!} \cdot P_0; \quad 0 \leq n \leq s; \quad (4.32)$$

$$P_n = \frac{\alpha^s}{s!} \cdot \frac{\lambda^{n-s}}{s \cdot \mu + \nu \cdot \dots \cdot [s \cdot \mu + n - s \cdot \nu]} \cdot P_0; \quad s \leq n; \quad (4.33)$$

$$P_0 = \left[\sum_{n=0}^{s-1} \frac{\alpha^n}{n!} + \frac{\alpha^s}{s!} \cdot \sum_{n=s}^{\infty} \frac{\lambda^{n-s}}{s \cdot \mu + \nu \cdot \dots \cdot [s \cdot \mu + n - s \cdot \nu]} \right]^{-1}. \quad (4.34)$$

Непосредственное пользование формулой (4.34) затруднено тем, что в неё входит бесконечная сумма. Однако члены этой суммы быстро убывают [32]. При приближенном вычислении вероятности P_0 простая СМО из-за отсутствия заявок на обслуживание в сумме $\sum_{n=s}^{\infty}$ формулы (4.34) достаточно

ограничиться первыми десятью членами. Здесь стационарный режим существует всегда: ряд P_n при $s < n$ сходится. Приведём статистические характеристики многоканальной СМО смешанного типа с ограниченным временем ожидания [28].

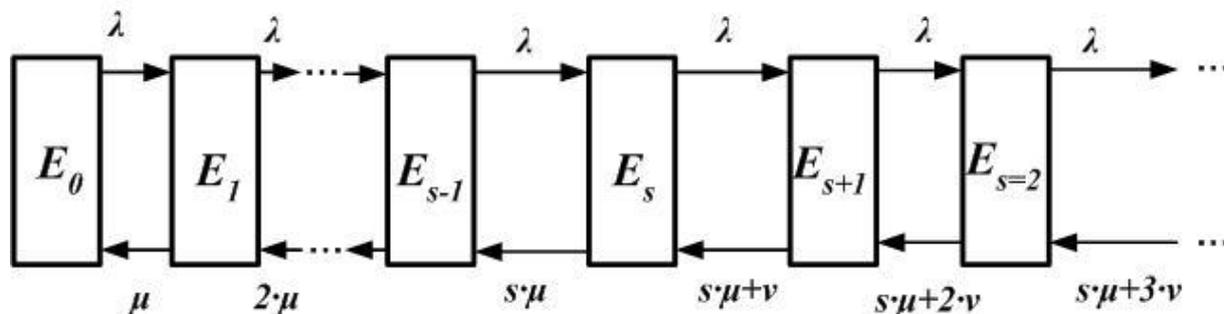


Рисунок 4.5 – Граф переходов многоканальной СМО смешанного типа с ограниченным временем ожидания, изображённый в виде схемы гибели и размножения

Вероятность отказа для данной системы не имеет смысла.

Среднее число заявок $N_{\text{ОЖ}}$, находящихся в очереди на обслуживание:

$$N_{\text{ОЖ}} = \sum_{n=s+1}^{\infty} (n-s) \cdot P_n. \quad (4.35)$$

В сумме $\sum_{n=s+1}^{\infty}$ формулы (4.35) также достаточно ограничиться первыми десятью членами.

Абсолютная пропускная способность:

$$M = \lambda - v \cdot N_{\text{ОЖ}}, \quad (4.36)$$

где $v \cdot N_{\text{ОЖ}}$ – заявки, ушедшие из очереди в единицу времени.

Относительная пропускная способность:

$$q = \frac{M}{\lambda} = 1 - \frac{v}{\lambda} \cdot N_{\text{ОЖ}}. \quad (4.37)$$

Среднее число \bar{Z} занятых каналов:

$$\bar{Z} = \frac{M}{\mu} = \alpha - \frac{v}{\mu} \cdot N_{\text{ОЖ}}. \quad (4.38)$$

4.2.5 Общие сведения об открытой многоканальной СМО смешанного типа с ограничением по длине очереди

Для такой СМО (рисунок 4.6) заявка, заставшая все n каналов занятыми, становится в очередь, только если в ней находится менее t заявок; если же число заявок в очереди равно t (больше t оно быть не может), то последняя прибывшая заявка в очередь не становится и покидает систему не обслуженной.

женной. Остальные допущения – о простейшем потоке заявок и о показательном распределении времени обслуживания – оставим прежними.

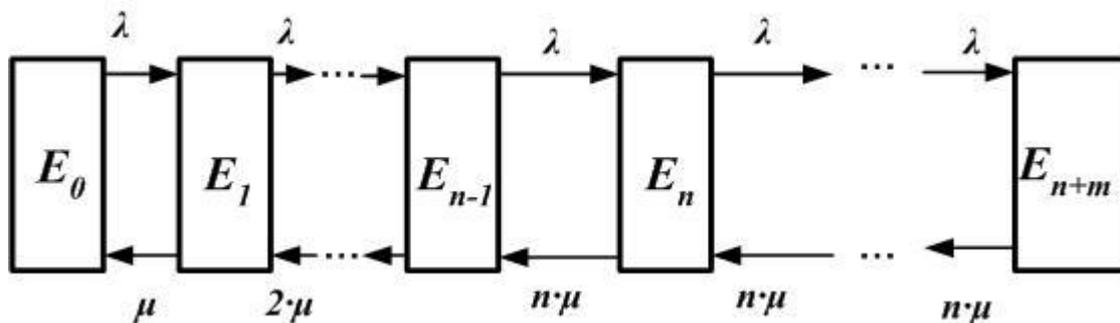


Рисунок 4.6 – Граф переходов многоканальной СМО смешанного типа с ограничением по длине очереди, изображённый в виде схемы гибели и размножения

В данном случае число состояний системы будет конечно, так как общее число заявок, связанных с системой, не может превышать $(n + m)$ (n обслуживаемых и m стоящих в очереди). Расчёт проводим по методике, изложенной в пункте 4.2.3 для открытой одноканальной СМО с ожиданием. Не останавливаясь на этом решении, приведем только окончательные формулы для определения вероятностей P_k состояний k , когда очередь отсутствует, и вероятностей P_{n+s} состояний $(n + s)$, когда имеется очередь [32].

$$P_k = \frac{\alpha^k}{k!} \left(\sum_{k=0}^n \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^n}{n!} \cdot \sum_{s=1}^m \left(\frac{\alpha}{n} \right)^s \right)^{-1}; \quad 0 \leq k \leq n; \quad (4.39)$$

$$P_{n+s} = \frac{\frac{\alpha^n}{n!} \cdot \left(\frac{\alpha}{n} \right)^s}{\sum_{k=0}^n \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^n}{n!} \cdot \sum_{s=1}^m \left(\frac{\alpha}{n} \right)^s}; \quad 1 \leq s \leq m. \quad (4.40)$$

Вероятность того, что заявка покинет систему необслуженной (формула (4.40)), равна вероятности P_{n+m} того, что в очереди уже стоят m заявок.

Относительная пропускная способность системы:

$$q = 1 - P_{n+m}. \quad (4.41)$$

Абсолютная пропускная способность:

$$M = \lambda \cdot q. \quad (4.42)$$

Средняя доля времени, которое система будет простаивать, равна вероятности P_0 (формула (4.34)).

Характеристики открытой многоканальной СМО с отказами можно определить по формуле (4.39) при $m = 0$ и формулам (4.41), (4.42).

4.2.6 Индивидуальные задания для расчета в лабораторной работе характеристик технического обслуживания открытых многоканальных СМО с ожиданием и с отказами

Задание 1

Дана открытая система массового обслуживания смешанного типа с ограниченным ожиданием, имеющая n каналов обслуживания. Интенсивность потока заявок на обслуживание, поступающих в СМО, равна λ [ч⁻¹]. Интенсивность выполнения заявок (интенсивность восстановления) равна μ [ч⁻¹], а отношение $\lambda/\mu < n$. Значения n , λ [ч⁻¹], μ [ч⁻¹] и ν [ч⁻¹] приведены в таблице 4.2 и зависят от номера варианта, представляющего трёхзначное число. Определить следующие статистические характеристики СМО для трёх значений средней длительности ожидания $T_{ОЖ}$: когда $0 < T_{ОЖ} = 1/\nu < \infty$; когда $T_{ОЖ} = 0$ (чистая СМО с отказами) и когда $T_{ОЖ} = \infty$ (чистая СМО с ожиданием):

- вероятность P_0 простая СМО из-за отсутствия заявок на обслуживание;

- вероятность наличия очереди на обслуживание $P_{Оч} = 1 - \sum_{n=0}^s P_n$;

- среднее число \bar{Z} занятых каналов;

- среднее число заявок $N_{ОЖ}$, находящихся в очереди на обслуживание;

- абсолютную пропускную способность;

- относительную пропускную способность.

Расчёты провести с использованием программного комплекса MathCAD.

Таблица 4.2 – Численные значения исходных величин для расчёта индивидуального задания №1 с использованием программного комплекса MathCAD

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
λ , ч ⁻¹	10	8	7	9	6	7	8	9	12	6
μ , ч ⁻¹	3	2.3	1.5	2.5	1.8	2	1.9	3	3	2
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
n	6	7	6	7	7	5	5	6	5	4
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
ν , ч ⁻¹	3.5^{-1}	4^{-1}	5^{-1}	6^{-1}	5^{-1}	7^{-1}	6.5^{-1}	5.5^{-1}	4.5^{-1}	4^{-1}

Задание 2

Дана открытая система массового обслуживания смешанного типа с ограничением по длине очереди. Число каналов СМО n , максимальное число заявок в очереди m , поток заявок простейший, время обслуживания распределено по показательному закону. Интенсивность потока заявок λ [ч⁻¹], а средняя длительность обслуживания заявок $T_{\text{ОБС}}$. Значения λ [ч⁻¹], $T_{\text{ОБС}}$ [ч], n и m приведены в таблице 4.3 и зависят от номера варианта, представляющего трёхзначное число. Определить следующие статистические характеристики СМО для случая, когда все каналы обслуживания исправно работают и для случая, когда один из каналов не работает:

- вероятность P_0 простоя СМО из-за отсутствия заявок на обслуживание;
- вероятность того, что заявка покинет систему необслуженной;
- абсолютную пропускную способность;
- относительную пропускную способность.

Определить эти же характеристики, но для открытой многоканальной СМО с отказами (при $m = 0$).

Расчёты провести с использованием программного комплекса MathCAD.

Таблица 4.3 – Численные значения исходных величин для расчёта индивидуального задания №2 с использованием программного комплекса MathCAD

Первая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
λ , ч ⁻¹	1	3	2	3	2	1	2	1	3	3
$T_{\text{ОБС}}$, ч	4	1.5	2.8	2	2.5	3.5	2.2	4.5	1.8	2
Вторая цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
n	3	4	5	4	3	5	4	5	4	5
Третья цифра номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
m	2	2	4	2	2	3	2	3	2	3

4.2.7 Этапы выполнения лабораторной работы

1. Подготовиться к ответу на контрольные вопросы, и получить у преподавателя допуск к выполнению лабораторного задания.
2. Используя номер варианта задания, выданный преподавателем, выполнить расчеты по пункту 4.2.6.

4.2.8 Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Письменный ответ на контрольные вопросы, указанные преподавателем.
3. Расчёт индивидуального задания.
4. Заключение – выводы по результатам работы.

4.2.9 Перечень контрольных вопросов, которые могут быть заданы во время защиты отчёта по работе

1. Какие разновидности открытых СМО упоминаются в описании к лабораторной работе и в чём особенности этих СМО?
2. Какими статистическими характеристиками технического обслуживания характеризуют открытую многоканальную СМО с чистым ожиданием, и каковы выражения для их расчёта?
3. Какими статистическими характеристиками технического обслуживания характеризуют открытую многоканальную СМО смешанного типа с ограничением по длине очереди, и каковы выражения для их расчёта?
4. Какими статистическими характеристиками технического обслуживания характеризуют открытую многоканальную СМО смешанного типа с ограниченным ожиданием, и каковы выражения для их расчёта?
5. Какими статистическими характеристиками технического обслуживания характеризуют открытую многоканальную СМО смешанного типа с отказами, и каковы выражения для их расчёта?
6. Какова формулировка инженерного правила составления дифференциальных уравнений по виду графа или по виду схемы состояний?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павленко К.И. Основы эксплуатации РЭО летательных аппаратов. – М.: Военное издательство, 1988.
2. Леонов А.И., Дубровский Н.Ф. Основы технической эксплуатации бытовой РЭА. – М.: Легпромбытиздат, 1991.
3. Дубровский В.И. Эксплуатация средств навигации и управления воздушным движением. – М.: Воздушный транспорт, 1995.
4. Давыдов П.С. Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем. – М.: Радио и связь, 1988.
5. Полибин В.В. Ремонт и регулировка бытовой РЭА: Учебное пособие для техникумов. – М.: Легпромбытиздат, 1987.
6. Фёдоров В.К. и др. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств. – М.: Техносфера, 2005.
7. Кирпиченко Ю.Р. Диагностика бытовой радиоэлектронной аппаратуры: Учебное пособие. – Томск: ТМЦДО, 2003.
8. Кирпиченко Ю.Р. Диагностика бытовой радиоэлектронной аппаратуры: Учебно-методическое пособие. – Томск: ТМЦДО, 2003.
9. Дудко Б.П. Радионавигационные системы: Лабораторный практикум. – Томск: ТУСУР, 2005.
10. Якушевич Г.Н. Радиоавтоматика: Учебно-методическое пособие. – Томск: ТУСУР, 2005.
11. Хабаров Б.П., Куликов Г.В., Парамонов А.А. Техническая диагностика и ремонт бытовой радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Телеком, 2004.
12. Сыпчук П.П., Талалай А.М. Методы статистического анализа при управлении качеством изготовления элементов РЭА. – М.: Советское радио, 1979.
13. Ушаков В.М., Озёркин Д.В., Миньков С.Л. Основы научных исследований. – Томск: Издательство ТГПУ, 2002.
14. Козлов В.Г. Теория надёжности. – Томск: ТУСУР, 2004.
15. Михайлов А.В. Эксплуатационные допуски и надёжность в РЭА. – М.: Советское радио, 1970.
16. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1974.
17. Глудкин О.П. Методы и устройства испытаний РЭА и ЭВА. – М.: Высшая школа, 1991.
18. Малинский В.Д. Контроль и испытания радиоаппаратуры. – М.: Энергия, 1970.
19. Озёркин Д.В. Теория надёжности: Компьютерный лабораторный практикум. – Томск: ТУСУР, 2005.
20. Рычина Т.А. Электрорадиоэлементы. – М.: Советское радио, 1976.

21. Валков Л.И. Управление эксплуатацией летательных комплексов. – М.: Высшая школа, 1981.
22. Адлер Ю.П. и др. Планирование экспериментов при поиске оптимальных решений. – М.: Наука, 1971.
23. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. – М.: Наука, 1965.
24. Озёркин Д.В. Основы автоматики и системы автоматического управления: Компьютерный лабораторный практикум. – Томск: ТУСУР, 2004.
25. Разевиг В.Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-CAP 7. – М.: Горячая линия - Телеком, 2003.
26. Основы эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры / Под ред. В.Ю.Лавриненко. – М.: Высшая школа, 1978.
27. Алексеенко А.Я., Адрихин И.В. Эксплуатация радиотехнических комплексов. – М.: Воениздат, 1980.
28. Салмина Н.Ю. Моделирование систем. – Томск: ТУСУР, 2002.
29. Эксплуатация радиотехнических комплексов / Под ред. А.И.Алексеева. – М.: Советское радио, 1976.
30. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности: Учебное пособие для вузов. – СПб: БХВ-Петербург, 2006.
31. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности: Практикум. Учебное пособие для вузов. – СПб: БХВ-Петербург, 2006.
32. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 2000.

