

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП)

**В. М. Дмитриев, Л. А. Гембух, А. Е. Сахабутдинов**

# **Цифровые двойники**

**Учебное пособие**

для студентов вузов, обучающихся по техническим направлениям  
подготовки и всех форм обучения

Томск 2024

УДК 681.5:004(075.8)

ББК 32.81я73

Д534

**Рецензенты:**

**Ганджа Т. В., д-р техн. наук, проф. кафедры компьютерных систем в  
управлении и проектировании (КСУП), ТУСУР**

**Лукутин Б.В. , д-р техн. наук, проф., отделение электроэнергетики и  
электротехники (ОЭЭ), ТПУ**

**Цифровые двойники:** учебное пособие / В.М. Дмитриев [и др.] –  
Томск: Изд-во Томск.гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 32 рис., 4  
таблицы, 2024. – 88с.

ISBN

В учебном пособии вслед за введением приводятся основные понятия и определения цифровых двойников, а также их основных элементов. Рассматриваются инжиниринговые инструменты ЦД и их эволюция. Рассмотрены технологии сбора и обработки данных, а также технологии математического моделирования и цифровых теней. Вводятся требования к сложности для реализации аналитических и математических моделей физико-механических процессов. Устанавливаются связи ЦД и облачных и периферийных вычислений, а также присущие ЦД новые человеко-машинные интерфейсы. Представлены основные технологии, составляющие ЦД. В заключительной части пособия приведены примеры ЦД в энергетике и пример построения ЦД в среде многоуровневого моделирования МАРС.

Одобрено на заседании кафедры КСУП, протокол №14 от 30.05.2023 г.

УДК 681.5:004(075.8)

ББК 32.81я73

## Содержание

Введение	
1. Основные понятия и определения ЦД .....	8
1.1 Что такое цифровой двойник .....	8
1.2 Какими бывают цифровые двойники .....	8
1.3 Какие задачи решают цифровые двойники .....	9
1.4 Где применяют цифровые двойники .....	9
1.5 Процесс создания цифрового двойника .....	12
1.6 Перспективы цифровых двойников .....	15
2. Инжиниринговые инструменты для создания ЦД и их эволюция .....	22
3. ЦД и оптимизация изделия, аддитивные технологии .....	24
4. Технологии сбора и обработки данных для создания ЦД .....	25
5. Технологии математического моделирования и цифровых теней .....	28
6. Достоинства и требования сложности для реализации аналитических и математических моделей физико-механических процессов .....	29
7. ЦД, облака и периферийные вычисления .....	37
8. ЦД и новые человеко-машинные интерфейсы .....	39
9. Схема ЦД и роль составляющих технологий .....	43
10. ЦД как способ преодоления сложности инженерных систем .....	45
11. ЦД в энергетике .....	53
12. Моделирование цифрового двойника электродвигателя: повышение эффективности и производительности .....	57
13. ЦД в среде моделирования MARCS .....	64
14. Полунатурное моделирование с ЦД в CM MARCS .....	80
Заключение .....	84
Литература .....	85

## Введение

При исследовании термина и самих цифровых двойников (ЦД) необходимо остановиться на истории его возникновения. Проект NASA "Аполлон", развернутый в конце 1960-х годов, упоминается многими авторами как ранний предшественник концепции ЦД. Для предстоящей миссии были созданы два идентичных аппарата. Один из них был запущен в космос, а другой оставался на Земле для "зеркалирования" состояния космического корабля в рамках концепции ЦД. В описанном случае оба аппарата были "физическими двойниками". Позднее, вместе с развитием виртуальных моделей, инженеры пришли к практике прогнозирования поведения основного аппарата, используя математическое моделирование его свойств и поведения с помощью виртуальных моделей, что также является частью концепции ЦД.

В концепции цифрового двойника созданная виртуальная модель не утилизируется после создания материального объекта, а используется совместно с ним на всех этапах его жизненного цикла - при тестировании, доработке, эксплуатации и утилизации. Важно отметить, что связь между физическим и цифровым двойниками продолжается после создания материального объекта, что, в свою очередь, позволяет отслеживать изменение его характеристик и историю его обслуживания, а также предсказывать аномальное поведение и планировать возможное техобслуживание. Цифровой двойник не только решает задачи разработки продукта, но и поддержки его на всех этапах жизненного цикла. Например, при эксплуатации продукта можно собирать данные о его работе с помощью датчиков и использовать их для улучшения цифровой модели. Цифровой двойник на основе математических моделей может служить для диагностики проблем объекта и предсказания оптимальных циклов технического обслуживания [1].

Становление и развитие ЦД характеризуется рядом этапов. Они представлены на схеме (рис.1). *Первый этап* описывает период, когда

материальные объекты создавались без использования цифрового прототипа. *Второй этап* соответствует времени, когда проектирование искусственных объектов проводилось на основе цифровой модели, применяемой только на этапе изготовления объекта. *Третий этап* означает появление взаимодействия (обмена данными) между физическим и цифровым двойниками. *Четвертый этап* характеризуется приближением и «пересечением» физического и цифрового двойников, когда информационный обмен и обновление цифровой и физической моделей происходят практически в режиме реального времени.

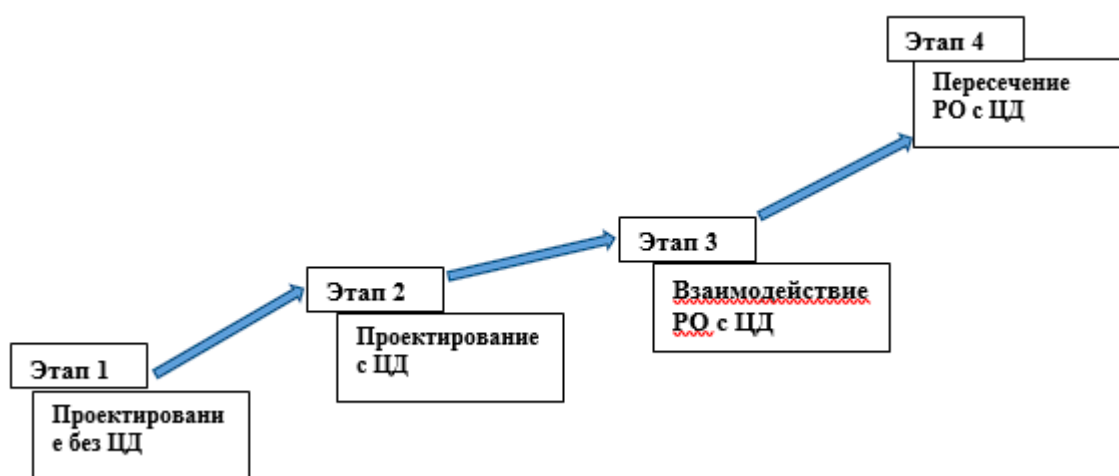


Рис. 1 – Этапы развития ЦД

Рассмотрим какие же отличительные признаки вкладывались в новое понятие ЦД?

Согласно разным источникам [2–7], можно выделить перечень следующих признаков:

- цифровой двойник является точной цифровой копией конкретного реального объекта, которая отражает его структуру, работоспособность, техническое состояние и условия эксплуатации, включая параметры, такие как пройденное расстояние, возникшие проблемы и историю техобслуживания и ремонта (физического двойника).

- ЦД основан на мультифизическом математическом моделировании различающихся по своей природе физических процессов, характеризующих свойства и поведение объекта;
- ЦД тесно связан с условиями, где функционирует соответствующий реальный объект. ЦД представляет собой модель, накапливающую информацию о данном объекте в процессе его эксплуатации в конкретных условиях. Для двух материально идентичных изделий, работающих в различных условиях, их ЦД будут отличаться.
- разработчики ЦД могут наблюдать за работой виртуального объекта для лучшего понимания того, каким образом возможно оптимизировать работу физического объекта;
- ЦД позволяет понять, как реальный объект (физический двойник) функционирует в реальном мире, и может дать прогноз о том, как он будет работать в будущем при условии своевременного обслуживания;
- ЦД позволяет собирать информацию о физическом объекте, а также, применяя средства предиктивной аналитики, прогнозировать его состояние, давая информацию о том, когда необходимо осуществлять профилактическое обслуживание.
- ЦД позволяет выявлять неполадки в работе средств удаленного обслуживания и исправлять их дистанционно;
- ЦД, созданные на основе моделирования физических процессов, дают возможность получить данные, которые нельзя получить напрямую с физического объекта. Они могут быть использованы в качестве инструмента для устранения неполадок в существующих изделиях и улучшения средств оптимизации производительности их будущих поколений.

Цифровой двойник согласно описанию, представленному в некоторых источниках, ограничивается только виртуальной частью, которая состоит из

"цифрового мастера" и "цифровой тени". "Цифровой мастер" содержит всю необходимую информацию, которая позволяет проектировать изделия определенной конфигурации с учетом физических свойств. "Цифровая тень", которая проецирует физический объект в виртуальное пространство, является набором данных, получаемых с датчиков, и модели, которые позволяют прогнозировать свойства объекта в пределах определенных ограничений. "Цифровой мастер" и "цифровая тень" вместе составляют виртуальную часть цифрового двойника.

## 1. Основные понятия и определения ЦД

### 1.1 Что такое цифровой двойник

Впервые концепцию цифрового двойника описал в 2002 году Майкл Гривс, профессор Мичиганского университета. В своей книге «Происхождение цифровых двойников» он разложил их на три основные части:

- физический продукт в реальном пространстве.
- виртуальный продукт в виртуальном пространстве.
- данные и информация, которые объединяют виртуальный и физический продукты.

Еще раз подчеркнем, что цифровой двойник нужен, чтобы смоделировать, что будет происходить с объектом- оригиналом в тех или иных условиях. Это помогает, во-первых, сэкономить время и средства (например, если речь идет о сложном и дорогостоящем оборудовании), во-вторых, найти рациональные решения его функционирования, а в-третьих — избежать вреда для людей и окружающей среды.

### 1.2 Какими бывают цифровые двойники

Прототип — представляет собой виртуальный аналог реального объекта, который содержит все данные для производства оригинала;

Экземпляр — содержит данные обо всех характеристиках и эксплуатации физического объекта, включая трехмерную модель, и действует параллельно с оригиналом;

Агрегированный двойник— вычислительная система из цифровых двойников и реальных объектов, которыми можно управлять из единого центра и обмениваться данными внутри.

К примеру, на Ближнем Востоке технология цифрового двойника позволила «собрать» 20 нефтеперерабатывающих и нефтедобывающих предприятий компании ADNOC в единый диспетчерский пункт и унифицировать все процессы.



Оптимальной погрешностью между работой цифрового двойника и его физического прототипа считают 5%.

### 1.3 Какие задачи решают цифровые двойники

Провести тестовый запуск процесса или производственной цепочки быстро и без существенных вложений.

Обнаружить проблему или уязвимость до того, как будет запущено производство или объект поступит в эксплуатацию.

Повысить эффективность процессов или систем, отследив все сбои еще до старта.

Снизить риски — в том числе финансовые, а также связанные с безопасностью для жизни и здоровья персонала.

Повысить конкурентоспособность и прибыльность бизнеса.

Строить долгосрочные прогнозы и планировать развитие компании или продукта на годы вперед.

Повысить лояльность клиентов за счет точного прогнозирования спроса и потребительских качеств продукта.

«Цифровые двойники позволяют реалистично моделировать не только сами объекты, но и процессы их строительства, эксплуатации в различных условиях. Сейчас они активно применяются для критической инфраструктуры компаний — подключенных промышленных активов, активно генерирующих данные — и могут использоваться на разных этапах жизненного цикла объекта».

### 1.4 Где применяют цифровые двойники

#### Добыча и переработка полезных ископаемых

Цифровые двойники помогают снизить риски при добыче и переработке нефти и газа. Это позволяет сохранить жизни сотрудников и избежать ущерба для окружающей среды, а также сэкономить огромные суммы.

На одном из европейских нефтеперерабатывающих предприятий система предикативной (прогнозной) аналитики Schneider Electric позволила предсказать сбой большого компрессора за 25 дней до того, как он случился. Это сэкономило компании несколько миллионов долларов.

### Крупное производство

Технология цифровых двойников позволяет создавать отдельные детали и воспроизводить целые производственные цепочки, проводя виртуальные испытания и предупреждая сбои в работе оборудования.

Корпорация Siemens использует цифровых двойников для разработки двигателей, систем коммуникаций и даже скоростных поездов

### Энергетика

Цифровые двойники применяют, чтобы оптимизировать работу электростанций, избежать сбоев в подаче электричества и рационально подойти к энергопотреблению.

Благодаря цифровым двойникам компания GE из США сэкономила более \$1,5 млрд для своих потребителей.

### ИТ-инфраструктура

Можно смоделировать как отдельное устройство или сервис, так и целую сеть, рассчитав предельные нагрузки и продумав защиту от киберугроз. Примером может служить сервис по созданию цифровых двойников на платформе Azure от Microsoft

### Строительство

С помощью цифровых двойников можно построить модель будущего здания или целого квартала и спрогнозировать, как оно впишется в среду, выдержит климатические условия и нагрузки на несущие конструкции. Так, например, при восстановлении Нотр-Дама использовали цифровой двойник этого собора.

### Дизайн

Виртуальные 3D-модели предметов интерьера или декора помогают представить, как будет выглядеть объект, нужно ли что-то изменить в его форме, цвете и деталях.

#### Ретейл

Цифровые двойники позволяют спрогнозировать загрузку торговых залов, перемещение клиентов и сотрудников, оптимальный уровень освещенности и температуру в них.

#### Транспорт и логистика

С помощью цифровых двойников можно оптимизировать маршруты транспорта, работу технических служб и пассажиропотоки.

Так, виртуальная система обработки багажа для крупного аэропорта позволила заранее просчитать, что понадобится дополнительная линия транспортировки для перераспределения потоков при внештатных ситуациях.

#### Образование

Цифровые модели помогают изучить физические объекты, в виде лабораторных установок и процессы в них, представленные в виртуальной среде, часто — с использованием виртуальной, дополненной и смешанной реальности.

#### Космическая отрасль

С помощью цифровых двойников разрабатывают, тестируют и запускают космические корабли и целые программы. Так, например, цифровой двойник «Аполлона-13» в 1970 году позволил инженерам и астронавтам на Земле спасти миссию во время аварии.

#### Медицина

Цифровые двойники пациентов помогают сканировать жизненные показатели в режиме онлайн, подбирать наиболее эффективное лечение и проводить операции и прогнозировать течение болезней.

## Спорт

Можно отработать тактику командной игры или провести индивидуальную тренировку на цифровом двойнике спортсмена, фиксируя его тренировочные нагрузки и восстановительные процедуры.

Цифровые симуляции используют также и для усовершенствования болидов «Формулы-1», рассчитывая идеальные показатели и технические характеристики для гоночных трасс.

## Урбанистика

Существуют цифровые двойники целых городов — например, Сингапура или российского Кронштадта. На них отслеживают транспортные потоки, работу коммуникаций, застройку, экологическую обстановку и энергопотребление, чтобы вовремя вносить важные изменения.

## Сельское хозяйство

Благодаря цифровым двойникам можно просчитать климатические условия и урожай, сделав земледелие более эффективным. Можно также построить имитационные модели процесса уборки урожая, оптимизируя логистические цепочки.

### 1.5 Процесс создания цифрового двойника

Существует несколько способов создания ЦД:

- графическая 3D-модель;
- модель на базе интернета вещей;
- интегрированные математические модели — такие как CAE-системы (Computer-aided engineering, решения для инженерного анализа, расчетов и симуляций) для инженерных расчетов; различные технологии

**Шаги по созданию модели цифрового двойника выглядят следующим образом:**

### Исследование объекта

Этот этап предшествует разработке только в том случае, если у цифрового двойника есть реальный прототип — например, работающее предприятие или система коммуникаций. Тогда разработчики составляют

детальную карту прототипа, воспроизводят все процессы и характеристики. При этом важно изучить объект в разных условиях.

### Моделирование цифровой копии объекта

Этот этап может быть первым, если реального прототипа еще нет и создание цифрового двойника ему предшествует. Например, в строительстве или дизайне, когда вначале создается цифровая 3D-модель, а уже потом — оригинал здания или другого объекта.

Для построения комплексной модели используются математические методы вычисления и анализа:

Метод конечных разностей и метод конечных элементов (FEA — Finite Element Analysis), позволяющий рассчитать эксплуатационную нагрузку. Его применяют, допустим, для расчета механики деформируемого твердого тела, теплообмена, гидродинамики и электродинамики.

FMEA-модели (Failure Mode and Effects Analysis, анализ видов и последствий отказов) необходимы для анализа надежности систем и выявления наиболее критических шагов производственных процессов.

CAD-модели (computer-aided design/drafting, средства автоматизированного проектирования) используются, чтобы рассчитать внешние характеристики и структуру объектов, материалов и процессов.

### Воплощение модели

Рассчитанную ранее архитектуру цифрового двойника переносят на специальные платформы — такие как Siemens или Dassault Systemes. Они объединяют математические модели, данные и интерфейс для управления цифровым двойником, превращая его в динамическую систему. Этот этап можно сравнить с трансформацией программного кода в программу или приложение с визуальным интерфейсом, который понятен любому пользователю.

### Тестирование основных процессов работы на цифровом двойнике

Главная цель этого этапа — спрогнозировать, как будет вести себя объект или система в обычном режиме и при внештатных ситуациях, чтобы

избежать поломок и перегрузки после запуска. Для этого к процессу подключают технических аналитиков, которые собирают большой массив данных в ходе испытаний, чтобы просчитать алгоритмы для любых возможных условий и ситуаций.

#### Запуск и наладка

Если предыдущий этап был проведен корректно, то в процессе работы реального прототипа можно избежать до 90% сбоев и поломок. Однако часть ситуаций все же не удастся спрогнозировать, и тогда их отслеживают уже на этапе запуска и наладки цифрового двойника.

#### Корректировка и развитие оригинального объекта или системы

Далее, инженеры продолжают работать с цифровым двойником как с реальным физическим объектом до тех пор, пока не будут отлажены все системы и процессы. По результатам этой работы в оригинальный объект вносят изменения, чтобы добиться его максимальной эффективности.


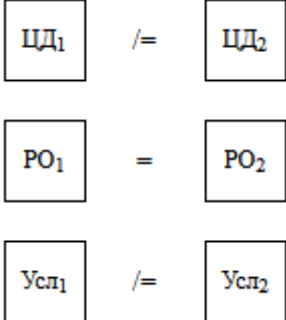
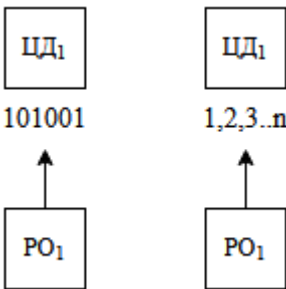

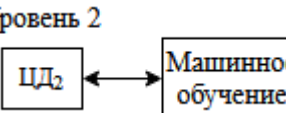
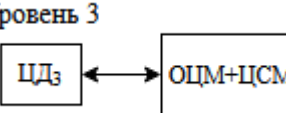
## 1.6 Перспективы цифровых двойников

По данным Gartner, 12% компаний, которые используют интернет вещей, также применяют и цифровые двойники, а 62% планируют это сделать. GE Digital в 2019 году называла цифру в 1,2 млн цифровых двойников в мире.

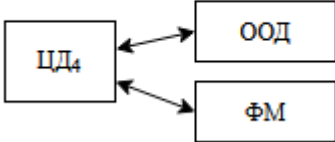
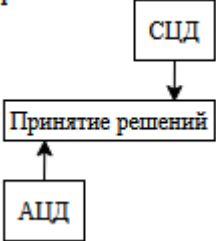
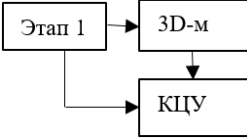
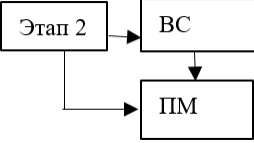
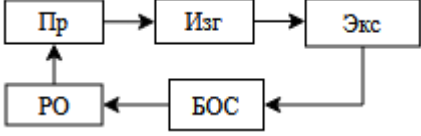
Зафиксируем основные принципы построения и функционирования ЦД в разных задачах и на разных этапах жизненного цикла создаваемых реальных объектов. Введем для этого лексикографические структуры, поясняющие основные понятия и термины, раскрывающие ЦД в форме словаря (табл. 1.1).

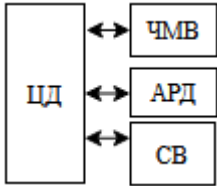

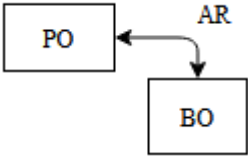
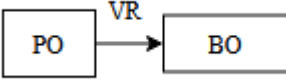
Таблица 1 – Лексико-графическая структура основных терминов и понятий ЦД

№	Компонент	Определение функции
1	<pre> graph LR     CD1[ЦД¹] &lt;--&gt; PO[РО]         </pre>	<p><b>Цифровой двойник (ЦД¹)</b> - это процесс взаимодействия физического продукта в реальном мире (РО), его цифровой копии в виртуальном мире и наличия информационной связи между ними, объединяющей виртуальное и материальное пространство.</p>
2	<pre> graph BT     PO[РО] --&gt; Str[Струк]     PO --&gt; Prz[Прз]     PO --&gt; TS[ТС]     Str --&gt; CD2[ЦД²]     Prz --&gt; CD2[ЦД²]     TS --&gt; CD2[ЦД²]         </pre>	<p><b>ЦД²</b> – это цифровая копия конкретного физического объекта, которая отражает структуру (Струк), производительность (Прз), техническое состояние (ТС) и характер рабочей миссии физического объекта</p>
3	<pre> graph LR     CMC[ЦМ U ЦТ] --&gt; VMCD[ВМЦД]         </pre>	<p><b>Виртуальная модель ЦД</b>, состоящая из цифровой модели (ЦМ) и цифровой тени (ЦТ)</p>
4	<pre> graph LR     CM[ЦМ] --&gt; L0UL1ULv[L₀ U L₁ U Lᵥ]         </pre>	<p><b>ЦМ – объединение 3-х уровней, составляющих ЦМ:</b> L<sub>0</sub> – объектного; L<sub>1</sub> - логического; L<sub>v</sub> – визуального.</p>
5	<pre> graph LR     PO[РО] --&gt; DO[ДО]     DO --&gt; CTPM[ЦТ U ПМ]         </pre>	<p><b>ЦТ - Цифровая тень</b>, которую физический объект «отбрасывает в виртуальное пространство», – это набор данных, получаемых с датчиков, и <b>прогнозная модель (ПМ)</b>, которая позволяет прогнозировать свойства объекта в определенных пределах.</p>

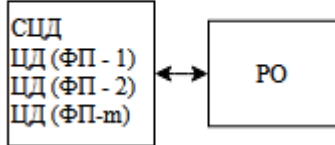
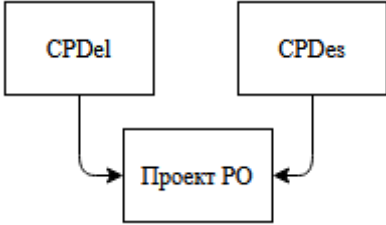
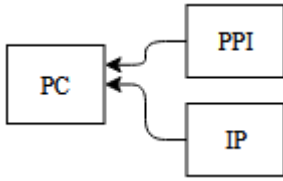
6	 <pre> graph LR     PO[РО] --&gt; КПВ[КПВ]     КПВ --&gt; ЦД[ЦД] </pre>	<p><b>Каналы и протоколы взаимодействия (КПВ)</b> — Для передачи данных между физическим (РО) и цифровым двойниками (ЦД) в реальном времени</p>
7	 <pre> graph TD     ЦД1[ЦД<sub>1</sub>] -- /= --&gt; ЦД2[ЦД<sub>2</sub>]     РО1[РО<sub>1</sub>] -- = --&gt; РО2[РО<sub>2</sub>]     Усл1[Усл<sub>1</sub>] -- /= --&gt; Усл2[Усл<sub>2</sub>] </pre>	<p><b>ЦД разных условий</b> У двух конструктивно одинаковых изделий (РО<sub>1</sub>=РО<sub>2</sub>) ЦД будут разными (ЦД<sub>1</sub>≠ЦД<sub>2</sub>), если они работают в разных условиях (Усл<sub>1</sub>≠Усл<sub>2</sub>).</p>
8	 <pre> graph TD     РО1[РО<sub>1</sub>] --&gt; ЦД1[ЦД<sub>1</sub>]     ЦД1 --&gt; ЦД1_101001[101001]     РО1 --&gt; ЦД1_123n[1,2,3..n]     ЦД1_123n --&gt; ЦД1 </pre>	<p><b>Элементы перехода на новый уровень интеграции</b> Их можно наблюдать в разных отраслевых решениях. В инженерных приложениях – это переход от дискретного взаимодействия модели с физическим объектом к непрерывному взаимодействию. Это переход от ситуации с долгим ожиданием результатов к ситуации, когда результаты с датчиков передаются в цифровой двойник и уточняют модель в реальном времени.</p>
9	 <pre> graph TD     ОЦД[ОЦД]     ЦД1[ЦД<sub>1</sub>]     СЦД[СЦД]     ЦД1 --&gt; СЦД     ЦД1 --&gt; СЦД </pre>	<p><b>Два типа ЦД:</b> операционные ЦД (Operational DT) и ЦД, основанные на математическом моделировании (Simulation DT). Обозначим ОЦД и СЦД соответственно.</p>
10	 <pre> graph TD     ЦД2[ЦД<sub>2</sub>] &lt;--&gt; МО[Машинное обучение] </pre>	<p><b>ЦД с машинным обучением</b> Позволяет применять машинное обучение с так называемыми контролируруемыми данными. Работая с контролируруемыми данными, алгоритмы машинного обучения могут выдавать прогнозы и определять основные индикаторы наступления прогнозируемого события.</p>
11	 <pre> graph TD     ЦД3[ЦД<sub>3</sub>] &lt;--&gt; ОЦМЦСМ[ОЦМ+ЦСМ] </pre>	<p><b>Операционные двойники, основанные на математическом моделировании</b> (Operational DT + Simulation DT). На этом этапе появляются решения, где возможности операционного цифрового двойника расширяются с помощью информации о физических процессах, полученной путем математического моделирования.</p>

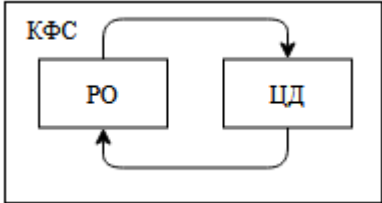
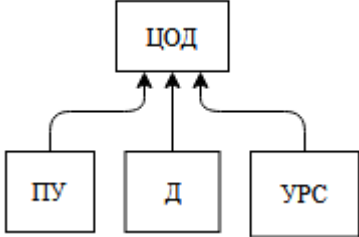


12	<p>Уровень 4</p>  <pre> graph LR     CD4[ЦД4] &lt;--&gt; OOD[ООД]     CD4 &lt;--&gt; FM[ФМ] </pre>	<p><b>ЦД с бизнес-моделями (DT with Business Models).</b></p> <p>Благодаря появлению цифровых двойников, комбинирующих возможности операционных двойников и двойников, основанных на математическом моделировании, инженерам стало намного проще оптимизировать работу изделий и продуктов, соединяя задачи по оптимизации операционной деятельности (ООД) объекта с финансовыми моделями.</p>
13	<p>Уровень 5</p>  <pre> graph TD     AICD[AIЦД] --&gt; PR[Принятие решений]     PR --&gt; SICD[СИЦД] </pre>	<p><b>Автономные ЦД Autonomous DT (AIЦД).</b> На этой стадии цифровой двойник эволюционирует в систему пооперационного принятия решений. Высшей стадией развития ЦД в концепции (рис. 1.6) является автономный цифровой двойник (также называемый «когнитивным двойником») (<b>Cognitive Digital Twin, CDT</b>) (<b>СИЦД</b>), который становится средством принятия решений и программного управления оборудованием/устройствами. ЦД совершенствует свой интеллект по мере обучения,</p>
		<p>Этапы развития</p>
14	<p>Этап 1</p>  <pre> graph TD     E1[Этап 1] --&gt; ZD[3D-м]     E1 --&gt; KCY[КЦУ] </pre>	<p><b>Первый этап (17 лет)</b> – период, когда появился сам термин ЦД. На этом временном отрезке развивались такие технологии, как 3D-моделирование и компьютерное цифровое управление (КЦУ).</p>
15	<p>Этап 2</p>  <pre> graph TD     E2[Этап 2] --&gt; VC[ВС]     E2 --&gt; PM[ПМ] </pre>	<p><b>На втором – более коротком этапе (11 лет),</b> выделяются такие технологии, как виртуальная сборка(ВС), моделирование на стадии до физического изготовления прототипа (проектная модель ПМ)</p>
16	 <pre> graph LR     Pr[Пр] --&gt; Izg[Изг]     Izg --&gt; Eks[Экс]     Eks --&gt; BOS[БОС]     BOS --&gt; PO[РО]     PO --&gt; Pr </pre>	<p><b>На третьем – еще более коротком этапе (2 года),</b> отмечены такие технологии, как «быстрая обратная связь (БОС) с объектом на этапе проектирования (Пр), изготовления (Изг) и эксплуатации (Экс)», «продукты с дополненными цифровыми сервисами».</p>

17		<p><b>На последнем – четвертом этапе</b>, который начался в 2017 г., отмечены такие новации, как «человеко-машинное взаимодействие (ЧМВ)», «автономная работа двойников (АРД)» и «самовосстановление (СВ)». Здесь также отмечены дополненная и виртуальная реальность, новые форматы человеко-машинного взаимодействия</p>
18		<p><b>Облачные сервисы</b>, или «облака», — это сеть мощных компьютеров — серверов, которые позволяют клиентам пользоваться своими ресурсами через интернет: хранить файлы и обмениваться ими, работать в онлайн-офисах, производить вычисления.</p> <p>В узком смысле облачные сервисы — это онлайн-программы, которые помогают организовать удаленную работу и решать бизнес-задачи.</p>
		<p><b>Дополненная реальность</b></p>
19		<p>Аббревиатура AR расшифровывается как Augmented Reality, что в переводе означает «Дополненная реальность». Суть технологии заключается в «дополнении» реального мира виртуальными объектами с помощью специальных устройств (AR-очков, шлемов). Вы могли сотни раз видеть такие в кино и сериалах типа «Черного зеркала».</p>
		<p><b>Виртуальная реальность</b></p>
20		<p>VR расшифровывается как Virtual Reality, что в переводе означает «Виртуальная реальность». Некоторые пользователи путают AR и VR или думают, что они подразумевают одну и ту же технологию, но это не так. AR дополняет вашу реальность, а VR полностью заменяет. Отличным примером VR является гейминг – все чаще выходят игры, разработанные для очков виртуальной реальности и вспомогательных систем, таких как HTC Vive, Oculus Rift или Valve Index. А также медицина, где VR активно используется как для обучения, так и для терапии психологических расстройств.</p>

21		<p><b>Конструктивная реальность</b> Помимо виртуальной реальности, различают также конструктивную реальность. В виртуальной реальности реальные люди взаимодействуют с виртуальной реальностью. В конструктивной реальности виртуальные люди (аватары реальных людей) взаимодействуют с виртуальной реальностью.</p>
22		<p><b>Смешанная реальность</b> В переводе – Mixed Reality (MR). Это смешанная реальность, которая совмещает в себе обе описанные выше технологии. Это может быть один гаджет, который попеременно работает как AR- или VR-шлем, или же устройство и ПО, которые совместно формируют такое пространство, в котором есть как элементы дополненной реальности, так и элементы виртуальной. Вариаций реализации MR много, так как эта технология не подразумевает какого-то четкого использования. Из существующих технологий MR можно выделить эксперимент Microsoft под название HoloLens и «софт» для него.</p>
		<p><b>Интегральный термин – Extended Reality (XR).</b> Это общее название для всего вышеперечисленного, оно включает в себя AR, VR и MR.</p>
23		<p><b>Технологии, которые ответственны за получение информации (ИТ)</b> от физического двойника об обработке этих данных и создании моделей, на них основанных. В частности, это технологии IoT, Big Data, ИИ и их эволюции</p>
24	<p>IoT - платформа</p> 	<p><b>IoT-платформа</b> должна обладать двумя главными признаками: во-первых, она должна быть реализована как программно-аппаратное обеспечение (ПАО), предназначенное для подключения и управления датчиками, контроллерами и другими внешними устройствами сбора данных, во-вторых, IoT-</p>

		платформа должна выполнять ряд пост-процессинговых и аналитических функций (ПиАФ), зависящих от специфики производственных задач, которые она призвана решать
25	<p>IoT - платформа</p> 	Область применения IoT-платформ <i>в промышленном секторе (сбор данных с датчиков оборудования и их анализ в реальном времени)</i> получила отдельное сокращенное название <b>ПоТ</b> . ЦД сложного изделия – это, как правило, совокупность двойников (СЦД) ряда физических подсистем. Вместо того чтобы связываться с каждой подсистемой отдельно, физический объект (например, станок) отправляет все данные своему цифровому двойнику. ЦД агрегирует и обрабатывает эти данные, и те подсистемы, которым требуется информация, подключаются непосредственно к ЦД, где последние могут получить доступ к данным.
26		<b>Инструменты совместной разработки и совместного проектирования продукта</b> (Collaborative Product Development CPDel), Collaborative Product Design (CPDes), помогающие нескольким организациям работать над совместным созданием продукта (Проект РО)
27		<b>Big Data</b> - обозначение структурированных (SD) и неструктурированных данных (NSD) огромных объемов и значительного многообразия, эффективно обрабатываемых горизонтально масштабируемыми программными инструментами
28		<b>Искусственный интеллект (ИИ)</b> – это способность компьютера обучаться, принимать решения и выполнять действия, свойственные человеческому интеллекту (PPI), изучает технологии, которые позволяют человеку писать «интеллектуальные» программы (IP) и учить компьютеры (PC) решать задачи самостоятельно

29	 <p>The diagram shows a large rectangular box labeled 'КФС' at the top left. Inside this box, there are two smaller rectangular boxes: 'РО' on the left and 'ЦД' on the right. A curved arrow points from 'РО' to 'ЦД', and another curved arrow points from 'ЦД' back to 'РО', forming a closed loop representing a feedback mechanism.</p>	<p><b>(Cyber-Physical System, CPS) киберфизическая система (КФС)</b> – это система, в которой интегрированы физические и цифровые объекты, при этом физические объекты влияют на цифровые, и одновременно встроенные цифровые объекты (компьютеры и сети) контролируют физические объекты с помощью контуров обратной связи.</p>
30	 <p>The diagram shows a central rectangular box at the top labeled 'ЦОД'. Below it, there are three rectangular boxes: 'ПУ' on the left, 'Д' in the middle, and 'УРС' on the right. Three arrows point upwards from each of these three boxes towards the 'ЦОД' box, indicating data flow from the sources to the central processing unit.</p>	<p><b>Edge computing (граничные или периферийные вычисления)</b> – это система обработки информации, где сбор и анализ данных проводится не в централизованной вычислительной среде, такой как ЦОД, а в тех местах, где происходит генерация потоков данных (панели управления, датчики, удаленные рабочие станции).</p>

## **2. Инжиниринговые инструменты для создания ЦД и их эволюция**

В 1986 году были созданы PDM/PLM-системы, в то время как CAD-системы находились в стадии активного развития. Рост популярности CAD-систем вел к увеличению объема и версионности CAD-файлов, что привело к созданию PDM (Product Data Management) систем - инструментов для управления комплексной информацией об изделии. PDM является частью концепции управления жизненным циклом продукта (PLM), которая содержит большой функционал. В конце 1980-х годов, PLM (вместе с ERP, SCM и CRM) стала неотъемлемой частью информационно-технологической структуры производственных предприятий, представляя собой бизнес-стратегию, направленную на поддержку жизненного цикла изделий компании. PLM объединяет все больше технологий и становится важным элементом для создания ЦД.

В конце 1980-х годов были разработаны первые системы компьютерного проектирования с возможностью параметризации - трехмерное твердотельное моделирование в составе Pro/Engineer от Parametric Technology Corporation и двумерное параметрическое моделирование в российской T-FLEX CAD компании Топ Системы. В 1989 году появилось параметрическое моделирование, которое позволяет изменять параметры модели и тем самым изменять конфигурацию детали. В дальнейшем, в 1990 году, была разработана технология мультидисциплинарной оптимизации проектирования (Multi-disciplinary Design Optimization, MDO), которая объединяет несколько дисциплин в одну оптимизационную задачу и позволяет получить решение, недоступное при последовательной оптимизации каждой дисциплины по отдельности. Например, компания Boeing использует мультидисциплинарные расчеты на базе уравнений аэродинамики, механики сплошной среды, теории управления и экономической оптимизации проекта.

В 2003 году появились инструменты для цифрового прототипирования для стадии обсуждения новых идей и концепт-дизайна. Технология параметрического проектирования позволяет с помощью изменения

параметров или геометрических соотношений проигрывать различные конструктивные схемы и избегать принципиальных ошибок.

В статье [9] представлена временная шкала прогресса инженеринговых технологий и соотношение этих инструментов с отдельными этапами проектирования (рис. 2).



Рис. 2 – Прогресс инженеринговых технологий

### 3. ЦД и оптимизация изделия, аддитивные технологии

Традиционная конструкторская школа предполагала подход к проектированию деталей и узлов, исходя из опыта и знания технологических возможностей оборудования (использующего, как правило, *субтрактивные методы обработки*), что и накладывало ограничения на форму конечного изделия. После того как распространение получили *аддитивные технологии*, ситуация изменилась, – появилась возможность производить изделия практически любой формы. *Субтрактивный производственный процесс* предполагает, что цельная заготовка приводится в нужную форму путем удаления части материала. Например, с помощью токарных, фрезерных и многоцелевых станков [10].

*Топологическая оптимизация* позволяет изменить традиционную геометрию на геометрию, специально адаптированную под определенную технологию [11]. И это может быть и традиционная технология (например, литье), и *аддитивный процесс*. Но именно аддитивные технологии делают процесс топологической оптимизации наиболее эффективным.

Аддитивные технологии развиваются, возникают все новые возможности математического моделирования и программирования свойств будущих физических изделий. Сравнительно недавно появились такие новые термины, как 4D- и 5



#### 4. Технологии сбора и обработки данных для создания ЦД

В прошлом разделе мы обсудили вопросы, касающиеся развития технологий проектирования и математического моделирования, которые фокусировались на стадии создания изделия. В этом разделе мы рассмотрим технологии, ответственные за сбор информации от физических объектов и обработку этих данных для создания моделей на их основе. Наиболее важные из этих технологий: IoT, Big Data, ИИ - развитие данных технологий будет обсуждаться здесь. Для оперативного отображения текущего состояния физического объекта необходимо установить датчики на этом объекте и обеспечить постоянный сбор данных. В 60-х годах были разработаны специальные комплексы измерительных приборов, состоящие из аналоговых датчиков и контроллеров, включая аналого-цифровые преобразователи (АЦП) и средства предварительной обработки. Такие контроллеры стали логически-программируемыми (ПЛК), что позволяет обрабатывать информацию прямо на контроллере и изменять алгоритмы обработки информации без изменения физической конструкции. Таким образом, процесс измерений и обработки информации стал более доступным. Контроллеры собирают аналоговые сигналы с разных датчиков, используя цифровые приемники и шины передачи данных. SCADA-системы используют промышленный Ethernet для сбора и обработки данных. Технология датчиков также эволюционировала, с появлением датчиков разных форм и размеров, способных измерять практически любую физическую величину. Эти технологии также подверглись оптимизации для улучшения их производительности, эффективности и снижения их стоимости.

С появлением новых протоколов интернета и технологий, включая RFID, Bluetooth и WiFi, а также удешевления стоимости элементов необходимых для сборки бытовых устройств, данные протоколы стали использоваться в бытовых устройствах повсеместно. Чтобы удовлетворить потребности в сборе и обработке данных, требовался унифицированный подход к их предоставлению. Появление программно-аппаратных платформ

промышленного интернета вещей IIoT (Industrial Internet of Things) являлся ответом на эти требования и предоставлял возможность собирать и хранить данные для непосредственных пользователей и приложений, использующих их в аналитических целях [12]. Изначально SCADA была существенной частью систем промышленного интернета вещей, но теперь она является подсистемой, которая собирает и хранит данные промышленных предприятий. Развитие этих платформ идет в сторону миграции в облака. Современные IoT платформы представляют собой совокупность IT-технологий, реализуемых в облаке. IoT является важной частью цифровой трансформации компаний, а предполагаемое количество подключенных устройств к интернету, к 2030 году, составит около 24 млрд со значительным увеличением годовой выручки до 1,5 трлн долларов.

Облачные платформы пользуются большим интересом из-за того, что им присущи значительно меньшие ограничения в вычислительных возможностях и объеме данных, способность обрабатывать и хранить разные модели данных и структуры, которые были заложены разработчиками. Это обусловлено тем, что в облачных платформах есть возможность поддерживать различные среды разработки и тестирования одновременно. В свою очередь, для того чтобы считаться IoT-платформой, она должна быть программно-аппаратным обеспечением, которое позволяет подключаться и управлять массивами датчиков, контроллеров и других устройств сбора данных, включая пост-процессинговые и аналитические функции. ЦД, построенный на базе IoT-платформы, способен принимать и обрабатывать огромные объемы данных от множества датчиков, обеспечивать масштабирование по требованию, долгосрочное хранение данных и реализовывать «умное» прогнозирование оптимальных графиков обслуживания оборудования для увеличения его срока службы. Применение IoT-платформ в промышленности, такое как сбор данных с датчиков оборудования и их анализ в режиме реального времени, имеет сокращенное название IIoT. Большинство современных IoT-платформ поддерживает аналитику в реальном времени. Кроме того, технологии IoT и

ЦД взаимодействуют друг друга, поскольку совершенствование систем ЦД помогает решать многие задачи, которые возникают внутри проектов IoT. Введение все большего количества взаимосвязанных устройств IoT делает системы сложнее в управлении, но применение ЦД помогает структурировать и упорядочить систему IoT. ЦД сложного изделия представляет собой совокупность двойников нескольких физических подсистем, которые агрегируются и обрабатываются в ЦД, куда имеют доступ другие подсистемы, которым необходима информация [13].

## 5. Технологии математического моделирования и цифровых теней

Выше было рассмотрен процесс совершенствования средств построения все более адекватных моделей создаваемых сложных изделий, а также эволюция технологий автоматизации сбора и анализа данных на ИТ-платформах *и формирования так называемых цифровых теней (совокупность данных с датчиков)*. В существенной мере объединение именно этих технологий определило создание решений класса ЦД.

После того как создан реальный объект, начинается его эксплуатация, и в процессе эксплуатации собираются данные с различного рода датчиков, формируются так называемые цифровые тени, полученные с помощью датчиков от реальной физической системы или ее цифрового двойника. Наличие цифровых теней позволяет более точно описывать поведение конкретного реального объекта и формировать прогнозы его поведения на основе цифровых двойников. Например, оценивать остаточный ресурс изделия. *Дополнительная информация, полученная на этапе эксплуатации, повышает уровень адекватности, то есть «обучает» цифровой двойник и позволяет в дальнейшем с его помощью прогнозировать уровень возможных повреждений или остаточный ресурс.*

## 6. Достоинства и требования сложности для реализации аналитических и математических моделей физико-механических процессов

Возможны случаи, когда разработка ЦД начинается с этапа моделирования физико-механических процессов (по такому пути идет большинство проектов подобного рода).

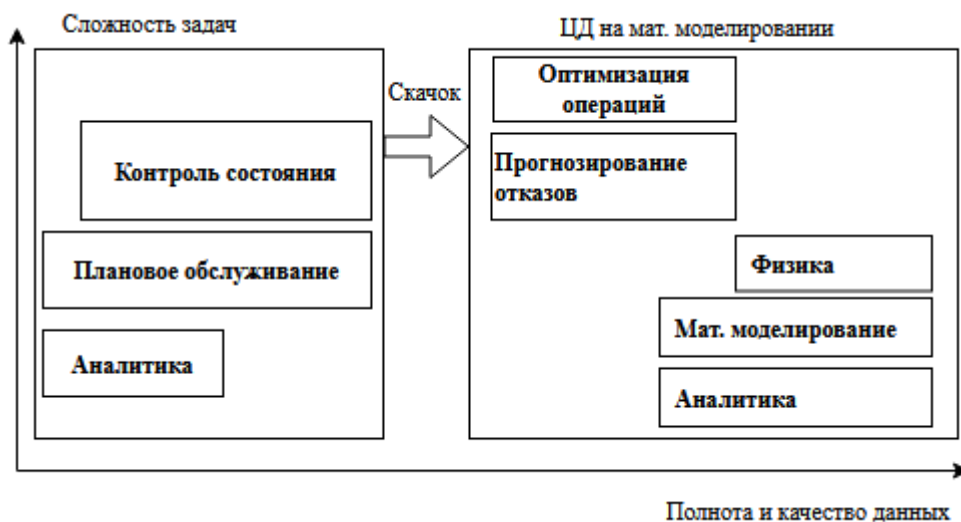


Рис. 3 – Проект с операционной аналитической моделью

Однако на практике встречаются ситуации, когда проект начинается с внедрения *операционной аналитической модели (модели, основанной на данных)*. Именно такой пример показан на рис. 3. Проект начинается с разработки аналитической системы, которая используется для решения задач невысокой сложности – планирования ремонтов и мониторинга состояния контролируемой системы. Для того чтобы решать более сложные задачи (такие, как прогнозирование отказов и анализ первопричин данных отказов), все равно требуется разработка математической модели, описывающей физико-механические процессы. Сочетание аналитической и математической модели позволяет решать на порядок более сложные задачи.

### *Модели на физических законах*

Достоинства:

- Модели строятся на физических законах, определяющих поведение объекта в широких границах;

- на основе моделирования физических процессов удается выявить глубинные причинно-следственные связи и важные закономерности в поведении конкретной системы;

- неопределенность контролируется входными данными и точностью моделирования;

- модель позволяет делать прогнозы в широких пределах, покрываемых моделью.

Требования / сложности:

- Требуются глубокие знания в области физических процессов, описывающих поведение изучаемого объекта;

- даже при больших вычислительных ресурсах требуется существенное время на расчет, что затрудняет использование модели в схемах, где необходима обратная связь в режиме реального времени;

- до начала моделирования должны быть известны все зависимости между входными и выходными данными.

### ***Аналитические подходы/машинное обучение***

Достоинства

- Модель создается только из данных, – не требуя от исследователя наличия глубоких знаний предметной области;

- обобщенный гибкий подход – обработка неоднородных потоков данных;

- модель совершенствуется с течением времени (reinforcement learning – обучение с подкреплением);

- хорошо выявляет взаимосвязи и шаблоны.

Требования / сложности

- Для создания модели необходимо наличие качественных обучающих данных;

- основа – это корреляции, а не причинно-следственные связи;

- низкий уровень интерпретируемости результатов (например, при глубоком обучении);

- методы аппроксимации, без уравнений математической физики процесса;
- предсказательные возможности быстро ухудшаются за пределами области действия обучающего набора;
- Трудно предсказать экстремальные/критические условия поведения моделируемого объекта при ограниченном числе наблюдений. Следует отметить, что на разных этапах создания цифровой модели объекта существует разный объем данных о поведении физического объекта (рис. 4).



Рис. 4 – Разный объем данных о поведении физического объекта

Следует отметить, что на разных этапах создания цифровой модели объекта существует разный объем данных о поведении физического объекта (рис. 4). На этапе «концепция» и «прототип» данных от реального объекта нет вообще, поскольку нет самого физического изделия, и данные об объекте могут быть получены только на основе моделирования физических процессов, определяющих создание и функционирование будущего изделия. По мере накопления данных об изделии, последние все в большей мере могут использоваться для построения аналитических моделей. *То есть «цифровая тень» появляется на этапе тестирования и эксплуатации готового изделия,* в то время как математическая модель на базе физических процессов может создаваться до этапа создания реального объекта и предсказывать его поведение в широких пределах при изменении краевых условий задачи численного моделирования.

*Только ЦД, основанный на моделировании физики процесса, может показать, где необходимо измерять тот или иной параметр, где функция может достигать экстремума, где будут критические зоны, что и где нужно измерять на разных этапах жизненного цикла изделия. А это означает, что до того, как устанавливать датчики, нужно промоделировать весь жизненный цикл изделия, увидеть критические зоны, посмотреть, где достигается максимум той или иной функции, после чего становится ясно, где именно должен быть поставлен датчик.*

*Математическое моделирование физических процессов в сочетании с моделями, основанными на данных, дает больше возможностей для прогнозирования, чем модели, основанные только на базе технологий машинного обучения. Моделирование, основанное на данных, как правило, ограничено лишь этапом эксплуатации изделия. Математические модели, основанные на физических процессах, более перспективны в задачах, отвечающих на вопрос «что, если?» и могут использоваться в неповторяющихся ситуациях, когда нет достаточных данных для применения статистических подходов [14].*

ЦД, основанный на данных (Analytics based DT), работает по схеме: датчики + IoT-платформа -> сбор данных -> аналитика (рис. 5, а- левая часть). В трактовке ANSYS – это подход «снизу-вверх». Создание двойника идет от экспериментальных данных, от IoT платформы, через обработку этих данных с помощью аналитических технологий, включая средства машинного обучения, и на базе полученной модели делается прогноз о состоянии оборудования в определенной перспективе. Напротив, ЦД, основанный на численном моделировании физических процессов (Simulation-Based DT), реализует схему «сверху-вниз». Подход «сверху-вниз» – это когда исследование идет от объекта, – процесс сводится к математическому моделированию, к численному решению дифференциальных уравнений (рис 5, б).



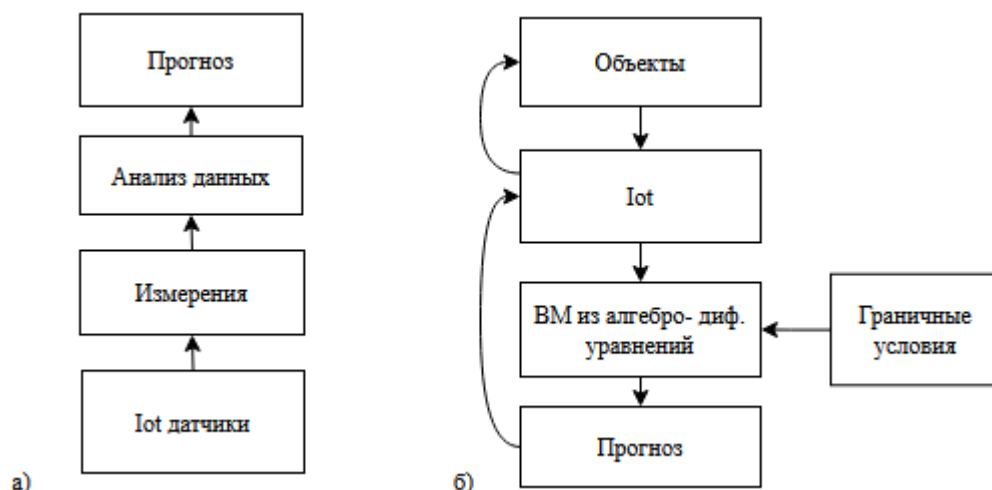


Рис. 5 – ЦД, основанный на данных (а) ЦД на математическом моделировании (б)

И, наконец, «гибридный ЦД» (Hybrid Digital Twin) работает по схеме: *математическое моделирование + датчики -> сбор данных -> IoT платформа -> аналитика.*

До сих пор говорилось о цифровых двойниках без обратной связи. То есть о таких двойниках, которые осуществляют *пассивный мониторинг* – собирают данные о состоянии объекта; данные обрабатываются, они доступны для анализа и могут быть переданы другим системам, например, другим ЦД или операторам. Такой вариант двойника относится к самому верхнему элементу в схеме (рис. 6). *Кратко это: К1 – выключен -> ЦД пассивного мониторинга.*



Рис. 6 – Варианты цифровых двойников с переключателями

Возможен также вариант, когда на основании получения оперативных данных и анализа архивных данных ЦД может выработать некоторые управляющие воздействия, например, сформировать сигнал о необходимости остановки системы. Это уже – так называемый интерактивный двойник, который предполагает некоторую степень управления физическим объектом. На рис. 6 это средний вариант. Кратко это: К1, К2- включены; К3 – выключен -> контролирующий ЦД.

И, наконец, *третий вариант подразумевает сочетание модели, основанной на данных, и математического моделирования физических процессов*, позволяющих прогнозировать управляющие действия для выбора оптимальной работы оборудования, например, настройки лопастей ветрогенератора при текущих параметрах состояния оборудования, скорости ветра и других условий, и передавать это управляющее воздействие на исполнительный элемент. Кратко это: К1, К3- включены; К2- выключен -> Прогнозирование через симуляцию.

В общем случае схему ЦД с обратной связью можно представить, как на рис. 7, где показан *ЦД, который осуществляет мониторинг и управление оборудованием* [15]. Говоря о ЦД с обратной связью, следует упомянуть концепцию киберфизической системы (Cyber-Physical System, CPS). Киберфизическая система – это система, в которой интегрированы физические и цифровые объекты, при этом физические объекты влияют на цифровые, и одновременно встроенные цифровые объекты (компьютеры и сети) контролируют физические объекты с помощью контуров обратной связи [16]. Говоря об этапах построения математической модели цифрового двойника, полезно также обратить внимание на подходы, приведенные в [17], которые предлагают рассматривать *четыре этапа в построении математической модели цифрового двойника: построение геометрической модели (Geometry model), модели физических процессов (Physical model), поведенческой модели (Behavior model) и модели, основанной на правилах (Rule based model)*.

Модели являются «вложенными» в том смысле, что геометрическая модель является базисом для последующих моделей, и каждая новая стадия дополняет возможности предыдущих. *Геометрическая модель* строится на основе САД-инструментария, *физическая модель описывает процессы*, определяющие состояние материалов изделия, на базе использования численных методов решения соответствующих дифференциальных уравнений. На этой стадии широко применяется метод конечных элементов.

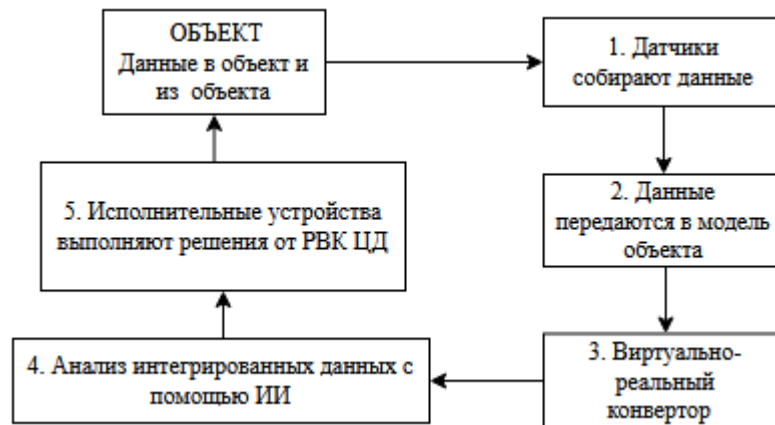


Рис. 7 – ЦД с мониторингом и управлением оборудованием

*Поведенческая модель описывает поведение многокомпонентных объектов*, описывает механизмы реагирования этих объектов на изменения (изменение состояния, изменение производительности) под воздействием определенных факторов (например, команд управления) или помех (например, воздействие внешней среды). На этом этапе используются методы моделирования, основанные на теории конечных автоматов, цепей Маркова, модели, основанные на онтологиях. *Модели, основанные на правилах*, оперируют набором правил, извлеченных из исторических данных, накопленных при измерении параметров поведения физического двойника (реального объекта). Данные в сочетании с правилами позволяют оптимизировать работу систем, используя алгоритмы машинного обучения, такие как нейронные сети.

Наиболее полное использование ЦД может быть при реализации замкнутой схемы (рис. 8). Эта схема является непрерывной: создается виртуальная модель, затем она дополняется данными от реального физического изделия, ЦД обнаруживает закономерности в работе изучаемого реального объекта (в том числе выявляются различного рода проблемные места), полученные закономерности закладываются в разработку новой версии изделия, вместе с которым появляется модифицированный ЦД, и далее процесс зацикливается.

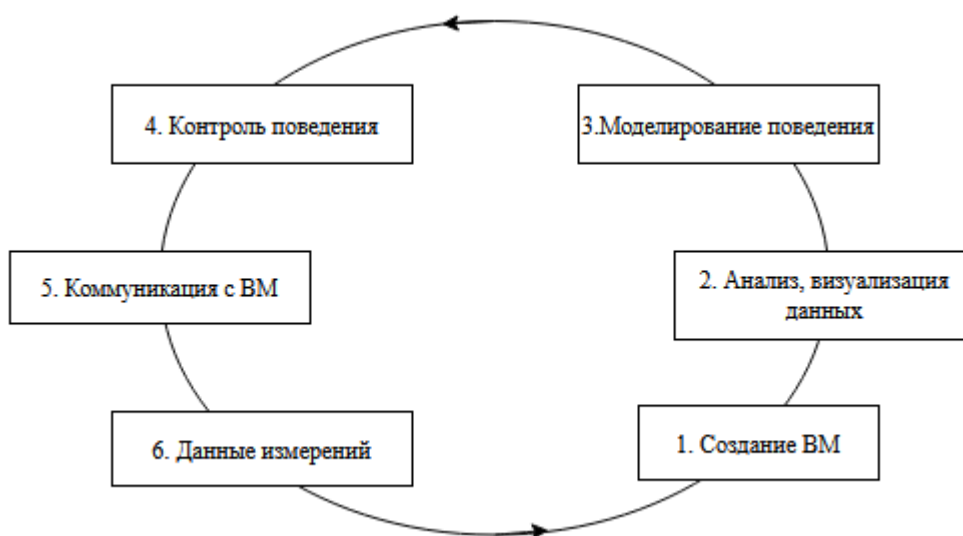


Рис. 8 – Модифицированный ЦД с циклической связью этапов

## 7. ЦД, облака и периферийные вычисления

Как было указано выше, в решениях ЦД могут фигурировать сложные объекты, порождающие огромные объемы данных. Из-за этого создание, поддержка и использование цифровых двойников требуют значительных затрат на обработку и хранение информации. Однако, облачные вычисления предоставляют доступ к инфраструктуре и инструментам моделирования по запросу, снижают стоимость ресурсов и освобождают пользователей от необходимости управления вычислительным оборудованием. Провайдеры могут предоставить не только огромные вычислительные ресурсы по требованию, но также доступ к инструментам математического моделирования и базам данных по предметной области. Польза от такой функциональности бывает особенно значительной в случае высокопроизводительных вычислений, требующих огромных вычислительных ресурсов, поскольку облачные технологии устраняют необходимость управления специализированным вычислительным оборудованием. Общая тенденция заключается в том, что облачные технологии положительно повлияли на экономическую выгодность ЦД. Кроме того, возможность объединения данных нескольких компаний, участвующих в создании цифровых двойников, значительно облегчила эту задачу.

В настоящее время существует противоположная тенденция - использование технологии Edge Computing, которая отвечает за первичную обработку данных и передачу агрегированной информации в облако для накопления, хранения и аналитической обработки в местах генерации потоков, таких как панели управления, датчики или удаленные рабочие станции, в отличие от централизованной вычислительной среды вроде ЦОД. Edge Computing особенно ценна в системах, где задержка критически важна, например, в беспилотных автомобилях, где автопилот в буквальном смысле должен принимать решения "на ходу". Технология Edge Computing осуществляет первичную обработку данных и передает агрегированную

информацию в облако для накопления, хранения и аналитической обработки. Периферийные вычисления экономят время и ресурсы, сокращают задержку, уменьшают нагрузку на сеть и центры обработки данных, и повышают безопасность, за счет уменьшения объема данных, передаваемых через Интернет. Edge Computing осуществляется в точках, близких к пользователю, и в приложениях, где требуется быстрота обработки данных в реальном времени.

Архитекторы решений стремятся найти оптимальный баланс между обработкой данных в облаке и на периферии. В промышленности и транспорте, где важна скорость реакции на изменения, периферийные вычисления являются эффективным выбором, где задержка передачи данных критична для управления. Решение этой проблемы - использование Цифровых Двойников, которые позволяют разделить логику приложения между облаком и периферией. ЦД является вторым уровнем распределенной архитектуры Интернета вещей и обеспечивает взаимодействие между устройствами на периферии и центром. Цифровые двойники предоставляют разработчикам удобный способ взаимодействия с объектами системы. Они обеспечивают локальное хранение данных, что позволяет быстро передавать информацию в отличие от облачных вычислений. Периферийные вычисления в технологии Edge Computing позволяют экономить время и ресурсы, сокращать задержку, уменьшать нагрузку на сеть и центры обработки данных, а также повышать безопасность [18].

## 8. ЦД и новые человеко-машинные интерфейсы

Система визуализации имеет важное значение для построения эффективных ЦД как на этапе проектирования и разработки будущего продукта, так и на этапе мониторинга работы готовых эксплуатируемых систем.

Переходя к описанию роли виртуальной и дополненной реальности, вкратце напомним содержание терминов. *Дополненная реальность (Augmented Reality, AR)* – это интерактивное восприятие среды реального мира, в которой объекты, находящиеся в реальном мире, уточняются (дополняются данными) с помощью компьютерной информации. Если дополненная реальность изменяет текущее восприятие реального мира, то виртуальная реальность полностью заменяет среду на имитацию. *Дополненная виртуальность (Augmented Virtuality, AV)* – это виртуальная реальность (Virtual Reality, VR), в которой присутствуют объекты из настоящего мира. Помимо виртуальной реальности, различают также *конструктивную реальность*. В виртуальной реальности реальные люди взаимодействуют с виртуальной реальностью. В конструктивной реальности виртуальные люди (аватары реальных людей) взаимодействуют с виртуальной реальностью. В 2016 г. Microsoft разработала *очки смешанной реальности Microsoft HoloLens*, использующие 64-разрядную операционную систему Windows Holographic, – устройство стоимостью около 3000 долл., которое автономно и не требует подключения к ПК, смартфону или игровой консоли. Голограммы выводятся в высоком разрешении, а звуки позиционируются в пространстве. Управлять очками можно при помощи жестов и голоса. Владельцы устройств имеют возможность использовать Skype и общаться с удаленными абонентами. Microsoft HoloLens – это мощный инструмент, который позволяет вывести визуализацию, предоставляемую цифровыми двойниками, на новый уровень, быстрее организовать процесс проектирования, согласования и мониторинга изучаемых объектов, решать более сложные задачи, снизить простои на производстве и сократить затраты. По утверждению Microsoft, основной

целевой аудиторией HoloLens являются бизнес-пользователи. *Microsoft приводит примеры*, когда сервисные инженеры используют HoloLens для удаленного доступа к экспертам при проведении полевых работ. Цифровые двойники с функциями VR и AR представляют новые возможности для обучения и совместной работы, особенно в экстремальных ситуациях, – например, техник, работающий в поле, может не иметь всех необходимых данных или навыков для быстрого принятия технологических решений. Еще один пример – решение, созданное в лаборатории «Industry 4.0 Collaboration Lab» Института управления информацией в области машиностроения (Information Management in Engineering, IME), Германия [19]. Там разработан ЦД фрезерного станка, который используется для оптимизации рабочих процессов в среде виртуальной реальности, что, по свидетельству разработчиков решения, позволяет увеличить производительность более чем на 20%.

Компания Controllab (Нидерланды) представила доклад («Как был создан ЦД в процессе *проектирования подъемника для лопастей ветрогенератора*»). Подъем лопасти для установки на ветрогенераторе, находящемся в море, – это весьма трудоемкая задача. Подъем лопасти краном, установленным на корабле, сопровождается не только качкой, но и ветром, который воздействует на лопасть, имеющую большую парусность. В проекте Controllab был создан ЦД подъемной установки, а также разработан тренажер с использованием VR на базе шлема Oculus, с помощью которого можно было отработать управление установкой в условиях, приближенных к реальным. Компании Comau и Ericsson продемонстрировали *цифровую сборочную линию на автомобильном заводе*, используя специальные очки для приложений виртуальной реальности. Проект позволял посетителям «погружаться» в процесс демонстрации сборочной линии, «перемещаться» по ней, отслеживая основные параметры процессов и машин. 5G-подключение позволяет получать массивный поток данных в реальном времени. Цифровая панель управления позволяет выявлять ситуации, которые могут привести к



замедлению или прерыванию процесса, предоставляя инструкции для решения проблемы. Анализ данных дает возможность оперативно предвидеть неисправности и определять, какой компонент должен быть отремонтирован или заменен, предлагая действия, которые необходимо предпринять для эффективного устранения проблем.

Способность визуализировать разрабатываемую систему и обмениваться информацией с заинтересованными сторонами на этапе проектирования позволяет не только осуществлять обмен визуальной информацией среди проектировщиков, но и привлекать будущих клиентов на самых ранних этапах проектирования системы, которые могут предоставить ценную обратную связь в момент, когда изменения все еще могут быть сделаны дешево. Маркетинговые визуальные прототипы продукта могут быть разработаны до появления физического прототипа, и продажи с помощью ЦД могут привлечь новых клиентов. Решения для смешанной реальности позволяют совершенно по-новому просматривать и взаимодействовать с данными. Весь жизненный цикл оборудования – проектирование, создание, обслуживание и устранение неполадок, становится значительно более производительным благодаря ЦД. Возникает возможность сравнить в виртуальном мире большое количество итераций виртуального проектирования, тестирования и перепроектирования, что происходит намного быстрее, чем в мире реальном. Можно сказать, что ЦД позволяют связывать мир физический и виртуальный, а приложения смешанной реальности позволяют переместить человека в мир виртуальный, чтобы работать с ЦД. Говоря о важности и перспективности систем AR и VR, следует отметить, что компьютерное зрение по распознаванию изображений во многих задачах превосходит человеческое. А кроме того, визуализировать в виртуальном пространстве можно не только видимые в физическом мире объекты и параметры. Сегодня средства VR позволяют воздействовать практически на все органы чувств человека (табл. 2) [20].

Таблица 2 – Средства VR

	<b>Человек</b>	<b>Человеко-машинный интерфейс</b>	<b>Система моделирования</b>	<b>Сеть</b>
<b>Облако</b>	Слух	Генерация звуков	3D-Имитация звуков	Локальная
	Зрение	Генерация полигонов	3D-Визуальная имитация	
	Тактильность	Имитация податливости	Физическая имитация	Глобальная
	Тактильность	Регистрация контакта	Физическая имитация	
	Речь	Обработка сигналов	Распознавание речи	

На сегодняшний день перечень, представленный на рисунке, *следует признать неполным*, – существуют уже отдельные устройства, которые позволяют *передавать по сети запахи*. Вернее, передается код, который на стороне клиента переводится в соответствующий запах путем смешивания в устройстве соответствующих компонентов в нужной пропорции, по такой схеме *можно передавать и вкус*. Кроме того, может имитироваться *воздействие на вестибулярный аппарат путем передачи различных ускорений* платформе, на которой находится человек-датчик.

## 9. Схема ЦД и роль составляющих технологий

Возникает вопрос, – какое место каждая из них занимает в структуре ЦД и как представить его структурную схему? Интересную схему взаимосвязи ключевых технологий, используемых для создания ЦД, представила компания РТС. Здесь показан физический и виртуальный мир как две стороны единого целого, и по границе двух миров, цифрового и физического, показаны технологии, которые осуществляют переход между ними. Так, например, 3D-печать создает физический объект как физическую копию цифрового, а виртуальная реальность из набора единиц и нулей создает виртуальную копию цифрового объекта, воспринимаемую человеком как физическую сущность. Это 3-х элементная модель цифрового двойника [21] (рис. 9).



Рис. 9 – 3-х элементная схема взаимосвязи ключевых технологий ЦД

Пятиэлементный ЦД в отличие от трехэлементного дополнительно содержит сервисный элемент и центральное хранилище информации, так называемый «единый источник истины» (рис. 10).

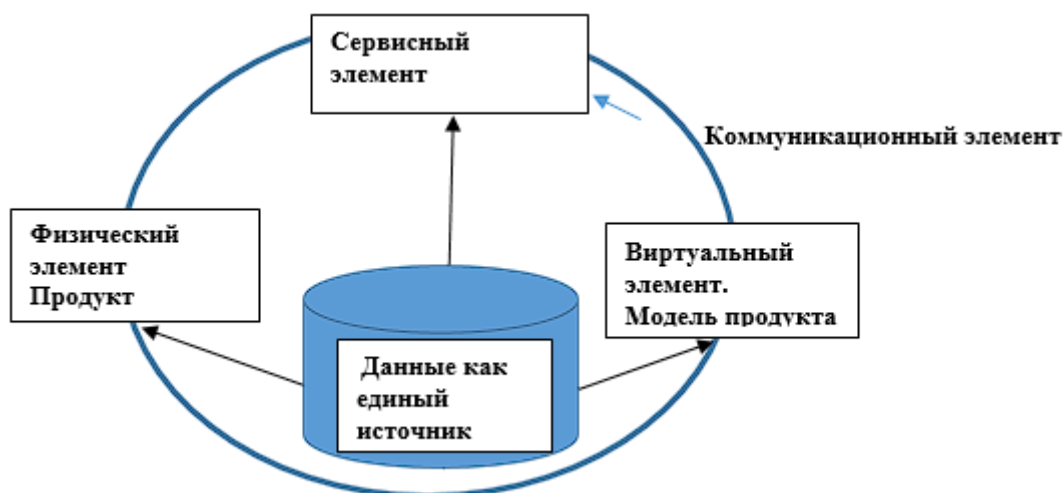


Рис. 10 – 5-ти элементная схема взаимосвязи ключевых технологий ЦД

## **10. ЦД как способ преодоления сложности инженерных систем**

Для того чтобы полнее раскрыть функции ЦД, следует посмотреть на данную технологию как на средство решения проблемы роста сложности многокомпонентных инженерных систем. Действительно, атомные станции, «умные» города, автономные транспортные средства, беспилотные летательные аппараты – это лишь отдельные примеры сложнейших систем, которые появились на наших глазах за очень короткое время. Инженерные системы становятся все более взаимосвязанными и взаимозависимыми, что приводит к потенциальному росту уязвимостей, которые все труднее просчитывать, предвидеть и планировать.

### **ЦД и концепция MBSE**

Концепция MBSE (Model Based System Engineering) исходит из того, что достижения в области цифрового моделирования должны помочь преодолевать вышеуказанную сложность, повысить эффективность новых и появляющихся вычислительных технологий для разработки все более сложных систем без снижения уровня их безопасности. Отметим, что рост сложности определялся не только ростом числа подсистем, но и ростом разнообразия технологий, на которых они основаны. Двести лет назад практически все рукотворные изделия были механическими, и их проектирование/моделирование осуществлялось на основе законов механики. Затем механические изделия сменили электромеханические, потом к ним добавились электронные компоненты, возникли бортовые компьютеры, для которых стало появляться все больше программного обеспечения, затем добавились механико-электронные системы с встроенным программным обеспечением, так называемые MESS-системы (Mechanical Electronic Software Systems). Программное обеспечение, внедренное в MESS-системы, стало со временем обращаться к внешним хранилищам данных.

Системы стали не только «умными», но и подключенными (MESS + Network). Отдельные подсистемы стали сами по себе сложными системами. Далее сложные системы стали связываться в системы систем, так, например,

бортовой компьютер автомобиля получил возможность связываться с системой спутников для обеспечения навигации (рис. 11), самолет связан со службами диспетчеризации, с аэропортом. Рост сложности можно изобразить следующей цепочкой: система механическая → электромеханическая → система, управляемая компьютером → подключенные сервисы → смарт продукт → интерактивное решение → «умные» системы.

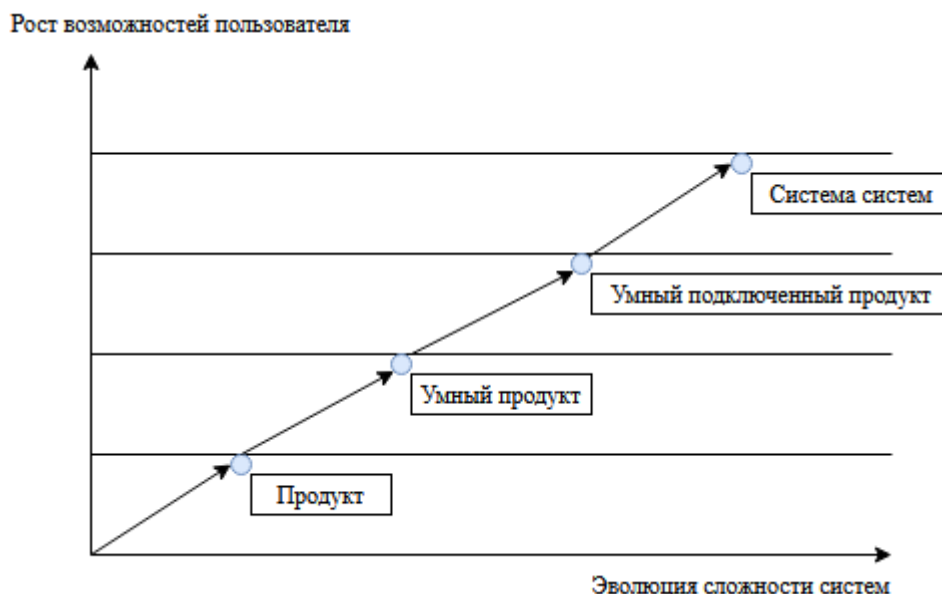


Рис. 11 – Цепочка роста сложности

Количественно сложность систем стали измерять с помощью индекса сложности CI (Complexity Index), который включает два параметра – число деталей в системе NOC (Number Of Components) и количество строк кода SLOC (Source Lines Of Code). Здесь не учитывается сложность систем с точки зрения протекающих в них процессов (т. е., с точки зрения возможности описания этих процессов). Преодоление роста сложности проектируемых систем невозможно без *современных подходов системной инженерии*. Можно сказать, что рост сложности изделий и способов организации деятельности по их созданию и привели к возникновению новой прикладной дисциплины – *системной инженерии*, позволяющей установить связь между стратегическими целями, конкретными задачами и измеримыми результатами инженерной деятельности по созданию систем различного назначения. Приведем еще несколько определений системной инженерии.

Согласно [22] – это «наука о создании крупных комплексных систем, которые соответствуют определенному набору экономических и технических требований». Системная инженерия применима ко всем этапам жизненного цикла, от разработки концепции до утилизации системы» [23].

Этапы *жизненного цикла системной инженерии* могут быть наглядно представлены с помощью так называемой V-модели (рис. 12), которая используется для определения единой процедуры разработки сложных систем.



Рис. 12 – Этапы жизненного цикла системной инженерии на V-модели

*V-диаграмма является моделью разработки систем* и используется для демонстрации разбиения этапов жизненного цикла системы на практики ее определения и воплощения (левая и правая ветви V-модели), каждая из которых в свою очередь разбивается на дополнительные подэтапы. Левая часть V-модели представляет декомпозицию требований заказчика на функции будущей системы, включает в себя архитектуру системы, проектирование подсистем, компонентов, а также изготовление и сборку. Правая часть отражает последовательность создания объекта гарантированной производительности, которая обеспечивается посредством тестирования компонентов, интеграции подсистем и проверки работоспособности интегрированной системы. Детализация проекта увеличивается при движении слева направо. Горизонтальные линии, показывающие, как результаты каждой из фаз разработки (на левой части диаграммы) влияют на этапы каждой из фаз тестирования (на правой части).

Системное проектирование на основе моделей – это применение моделирования для обеспечения реализации предъявляемых к системе требований на всех этапах жизненного цикла изделия. MBSE (Model Based System Engineering – системная инженерия на основе моделей) подразумевает концепцию непрерывного моделирования и переход на открытый обмен данными на всех этапах формирования изделия. Цифровой двойник опирается на наличие согласованного и непротиворечивого набора мультидисциплинарных и мультимасштабных моделей объекта на всех этапах жизненного цикла, то есть по сути, внедрение MBSE подхода – это один из необходимых этапов для построения ЦД-решения.

Согласно рис. 13, эволюция методов системной инженерии проходит 4 этапа. Первый – неформальное описание (чертежей на этом этапе еще не было – обходились эскизами и макетами). Второй – не полностью формальное описание, его нельзя формально проверить, оно предназначено для чтения и интерпретации людьми, а не компьютерами. Третий – модели-ориентированная системная инженерия, предусматривает использование формальных моделей, которые могут быть обработаны компьютером. На данном этапе применяют не только физические, но и логические модели, использующие аппарат дискретной математики и алгоритмические модели на языках программирования. Четвертый – это этап, на котором появляется упомянутый нами ранее генеративный дизайн, когда моделируется творческая практика (ТП) в процессе итерационного взаимодействия человеческого и компьютерного интеллекта.



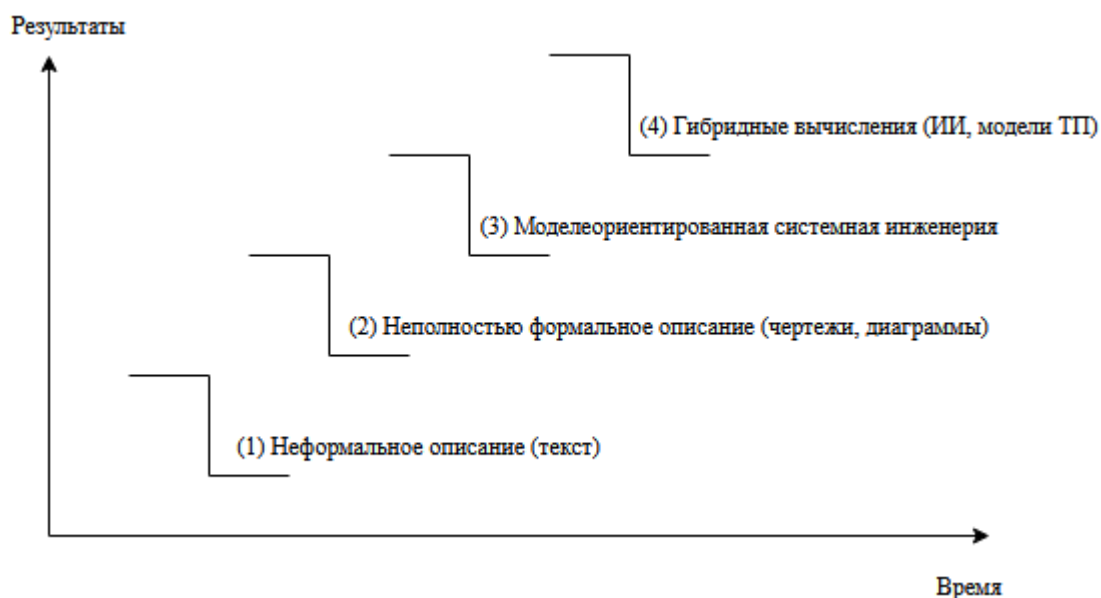


Рис. 13 – Эволюция методов системной инженерии

Совмещение процессов моделирования физических процессов и проектирования геометрии, о котором шла речь выше, – *это первый шаг в направлении цифровой непрерывности*. В основе концепции MBSE лежит идея создания единой модели проектируемой системы, объединяющей все характеристики и свойства системы в рамках одной модели. Эта модель *должна быть способна генерировать все документы, все свойства, все представления об изделии из этой объединенной модели, которая является «единым источником истины»*. Иными словами, изменения в одной системе должны автоматически отражаться в других, обеспечивая единую картину, «единую истину».

Как было отмечено ранее, сложные системы содержат множество взаимодействующих компонентов, которые требуют разных типов моделирования. Некоторые подсистемы целесообразно описывать на базе моделирования непрерывных физических процессов, другие – на базе моделирования дискретных событий. Моделирование может осуществляться в разных временных масштабах. Что еще раз подчеркивает *необходимость наличия интегрирующей платформы для организации взаимодействия между отдельными моделями*.

До внедрения концепции MBSE моделирование очень часто производилось разными малосвязанными командами, что приводило к длинным итерационным циклам согласования и долгим ожиданиям результатов моделирования. На базе единой модели процесс может быть организован намного быстрее за счет интеграции моделирования геометрии изделия, модели физических процессов, расчетов и оптимизации многокомпонентной конструкции.

О каких барьерах идет речь? Например, проект, созданный конструкторами, достигает стадии технологической проработки, и оказывается, что не все то, что задано конструкторами, может быть изготовлено технологами. То есть? после внесения требований технолога, проект требует уточнения и, возможно, перепроектирования. Решением проблемы является переход на процесс создания изделия с использованием концепции MBSE, *когда наличие единой модели позволяет проводить мультидисциплинарное мультимасштабное моделирование, позволяющее верифицировать работоспособность изделия на базе виртуальной модели,* которая развивается на всех этапах и служит для валидации процесса создания продукта при переходе с одного этапа на другой. Подобный подход позволяет оптимизировать параметры проектируемого изделия таким образом, чтобы они соответствовали требованиям заказчика. Цифровой двойник функционирует как связующий элемент, который помогает инженерам, а также и специалистам различных предметных областей (дисциплин) достичь общего понимания «миров» друг друга, разрушает барьеры между замкнутыми коллективами, работающими над своей проблематикой (механика, программное обеспечение, мехатроника, электроника и т. д). В основе концепции MBSE лежит идея создания единой модели проектируемой системы, объединяющей все характеристики и свойства системы в рамках одной модели. Эта модель должна быть способна генерировать все документы, все свойства, все представления об изделии из этой объединенной модели, которая является «единым источником истины». Иными словами, изменения

в одной системе должны автоматически отражаться в других, обеспечивая единую картину, «единую истину». Из данного «источника истины» конкретные представления для различных нужд могут генерироваться автоматически в любой момент времени, на любом этапе эволюции модели.

(рис. 14) [24]

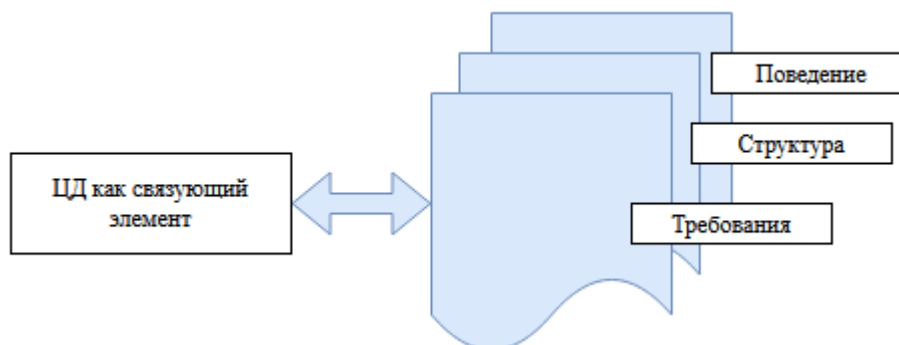


Рис. 14 – ЦД интегрирует доступную информацию об объекте по принципу «единый источник истины»

Разные авторы отмечают, что MBSE является центральной концепцией, на которой базируется построение ЦД, поэтому неслучайно авторы часто цитируемой статьи об архитектуре ЦД поместили инструменты MBSE и MBSE Knowledge Base (базу знаний MBSE) в центр схемы цифрового двойника [25] (рис. 15).

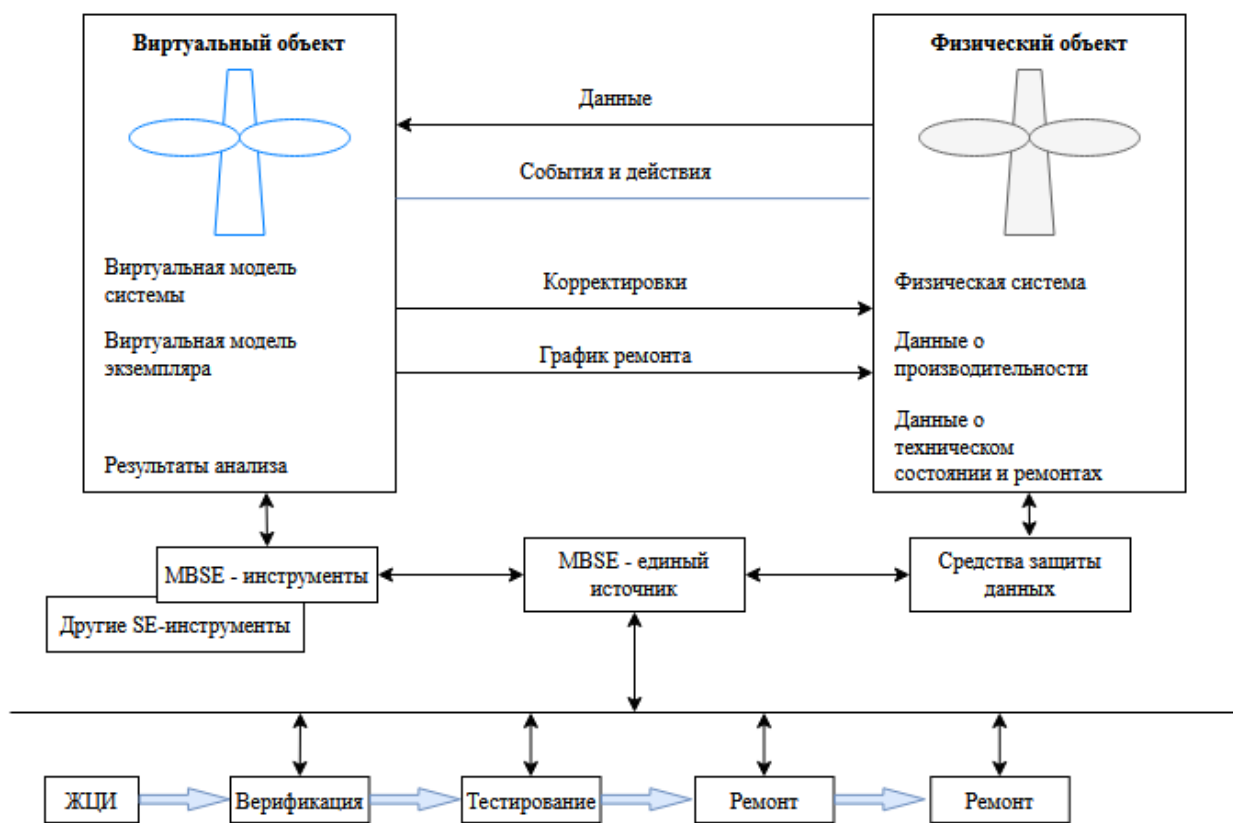


Рис. 15 – Цифровой двойник как связующий элемент

## 11. ЦД в энергетике

В июне 2018 г. ФСК ЕЭС (входит в ПАО «Россети») сообщила о начале поэтапного внедрения цифрового проектирования систем управления подстанциями с использованием типовых решений и перспективой создания цифровых двойников. Производство энергии, идет ли речь о сжигании топлива, или об атомной энергетике, или о возобновляемых источниках энергии, опирается на дорогостоящие сложные объекты инфраструктуры, требующие высокого уровня безопасности, к ним предъявляются высокие требования на стадии проектирования и обслуживания. То есть оборудование создается именно в тех условиях, в которых целесообразно и оправданно применение цифровых двойников. Крупнейшие компании создают специализированные решения класса ЦД для энергетического сектора [26]. В частности, компания General Electric разработала цифровой двойник, который выступает основой цифровой электростанции Digital Power Plant (рис. 16). Этот ЦД не только отображает операционную среду в цифровом виде, но и дает основу для более эффективного принятия решений на каждом уровне эксплуатации станции. Технология General Electric объединяет опыт в предметной области с аналитикой больших данных, обеспечивая снижение внеплановых простоев, более продуманные стратегии технического обслуживания, позволяет сбалансировать производство с учетом целого ряда факторов.

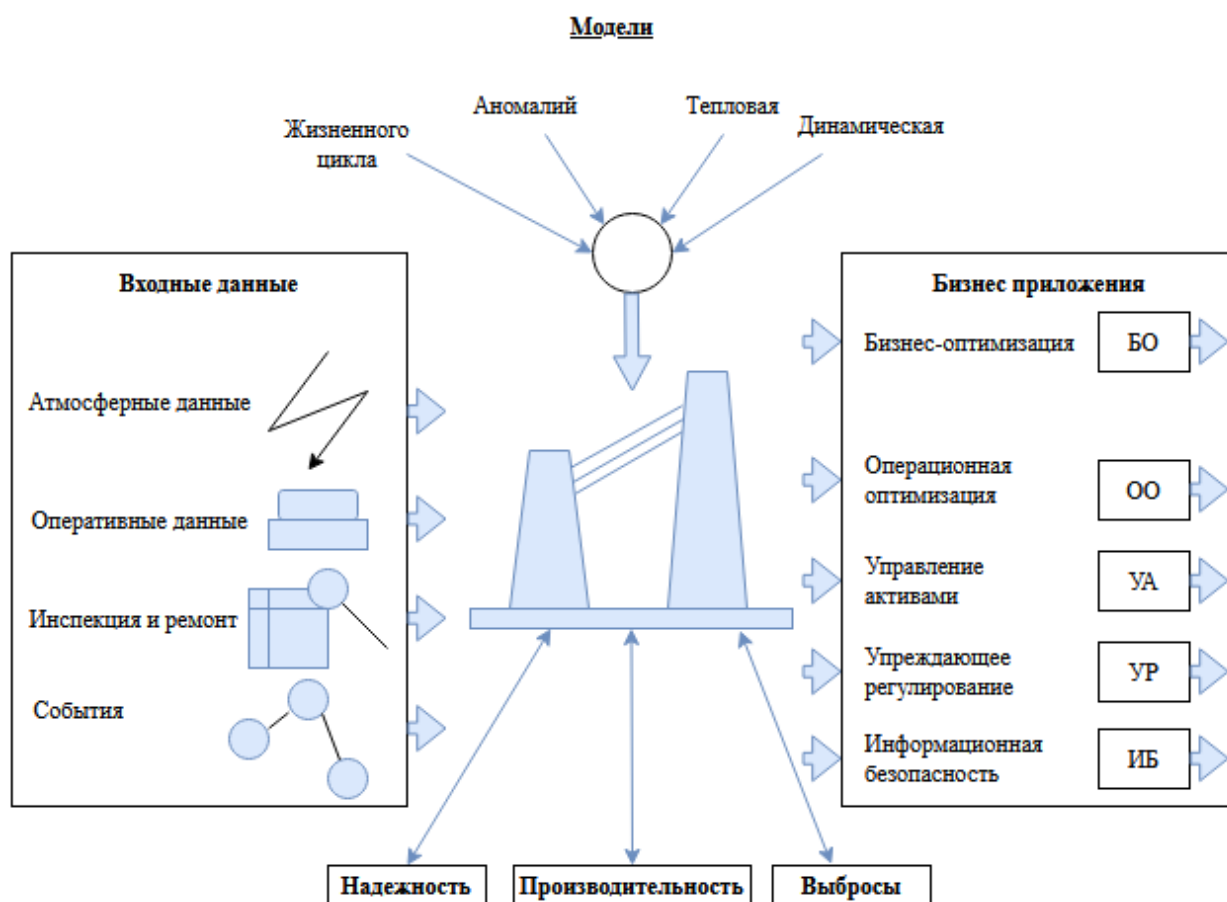


Рис. 16 – Цифровой двойник от компании General Electric

Бизнес-приложения, показанные на рис. 16, привязаны к ЦД и позволяют управлять параметрами эксплуатации электростанции, оперативно реагировать на меняющийся рынок, цены на топливо и погодные условия. Бизнес-приложения, предназначенные для повышения производительности, подразделяются на категории:

- «Бизнес-оптимизация» – снижает финансовые риски и оптимизирует прибыльность благодаря интеллектуальному прогнозированию и принятию более обоснованных бизнес-решений.

- «Операционная оптимизация» – обеспечивает прозрачность корпоративных данных в масштабах всей электростанции, а также обеспечивает целостное понимание операционных решений.

- «Управление производительностью активов» – преобразует данные в интеллектуальные решения на базе продвинутой аналитики и опыта в предметной области. Приложение создает единый источник данных для всех

активов производства электроэнергии, используя прогнозную аналитику, которая позволяет выявлять проблемы до их возникновения, способствует сокращению времени простоев и продлению ресурса активов.

– «Упреждающие регуляторы» – позволяют управлять работой электростанции, используя аналитические решения по управлению стабильностью энергосистемы, изменчивостью топлива и выбросами, обеспечивают соответствие надзорным требованиям и другим параметрам, чтобы снизить затраты и оптимизировать доход.

– «Информационная безопасность» – предназначена для оценки системных пробелов, выявления уязвимостей, защиты критических элементов инфраструктуры и обеспечения контроля в соответствии с правилами безопасности.

Цифровой двойник и бизнес-приложения работают на платформе Predix, которая является безопасной промышленной средой, разработанной для массового приема данных, исполнения аналитических моделей и управления машинными данными. ЦД станции состоит из совокупности моделей и, по сути, базируется на целом ряде цифровых двойников подсистем. Модель жизненного цикла (ЦД жизненного цикла, Lifing Digital Twin) позволяет оценить каждый объект на станции и то, как он будет стареть в процессе эксплуатации. Модель дает возможность прогнозировать характер напряженного состояния элементов оборудования, вероятность усталостного разрушения, степень окисления деталей и другие явления. На основании этой информации ЦД позволяет оценивать надежность работы каждого актива, всей системы в целом и оптимизировать обслуживание. Модель аномалий (ЦД аномалий, Anomaly Digital Twin) использует физические и основанные на данных прогностические модели для обнаружения сбоев, для улучшения управления режимами сбоев активов и сокращения незапланированных простоев. Используя методы слияния с моделями жизненного цикла, модели аномалий могут повысить точность кривых срока службы производственного оборудования и дополнительно персонализировать потребности в

обслуживании. Тепловая модель (тепловой ЦД, Thermal Digital Twin) определяет тепловую эффективность, мощность установки и прогноз выбросов, а также осуществляет моделирование всех параметров, которые могут повлиять на эти результаты. ЦД от компании General Electric объединяет ряд аналитических моделей элементов электростанции, которые отражают состояние объектов (производительность, износ элементов оборудования и т. п.) с помощью KPI, определяемых клиентами и бизнес-целями. Цифровые модели эмулируют поведение объекта при варьировании эксплуатационных параметров (состав топлива, температура окружающей среды, качество воздуха, влажность, рыночные цены). Технология ЦД позволяет решать задачи оптимизации по целому ряду параметров – производительность, износ, ремонтпригодность и т. п. (рис. 16). Модели в сочетании с данными, получаемыми с датчиков, дают возможность прогнозировать производительность станции, оценивать различные сценарии, возможные компромиссы и выбирать пути повышения эффективности. Во время эксплуатации установки цифровой двойник постоянно улучшает свои возможности по моделированию и отслеживанию состояния объектов. Внедрение ЦД позволяет проверять сценарии «что, если», принимать максимально обоснованные решения, ориентированные на бизнес-цели.



## 12. Моделирование цифрового двойника электродвигателя: повышение эффективности и производительности

Моделирование цифрового двойника электродвигателя является передовой технологией, что позволяет инженерам создавать виртуальную копию электродвигателя и моделировать его поведение в режиме реального времени. Такое моделирование позволяет инженерам анализировать и оптимизировать работу двигателя без необходимости создания физических прототипов. Используя передовые алгоритмы и анализ данных, цифровой двойник может точно прогнозировать работу двигателя в различных условиях эксплуатации, помогая выявить потенциальные проблемы и повысить эффективность. Эта технология произвела революцию в дизайне и процессе тестирования, экономя время и ресурсы, обеспечивая при этом оптимальную работу двигателя. Ниже на рис. 17 представлена структура сервопривода с редуктором в полной его сборке.



Рис. 17 – Структура сервопривода с редуктором

## **Определение и функциональность цифрового двойника электродвигателя**

Цифровой двойник электродвигателя является виртуальным аналогом его физического объекта-оригинала, например, созданный с использованием данных и моделей. Он охватывает как физические, так и поведенческие аспекты объекта, что обеспечивает всестороннее понимание его работоспособности и состояния. Интегрируя данные от датчиков, цифровой двойник может обеспечить аналитика данными о реальном поведении объекта, обеспечивая профилактическое обслуживание, обнаружение неисправностей и оптимизацию энергоэффективности.

Рассмотрим пример электродвигателя, чтобы лучше понять функциональность его цифрового двойника.

**Электрический двигатель** - важный компонент в различных промышленных сферах применения, и его производительность напрямую влияет на общую эффективность системы. С помощью цифрового двойника двигателя, инженеры могут контролировать его рабочие параметры, такие как температура, вибрация и потребляемая мощность. Анализируя эти данные через расширенную аналитику и алгоритмы машинного обучения, они могут обнаружить потенциальные неисправности или аномалии на ранней стадии и принять активные меры для предотвращения поломок и аварий.

Кроме того, цифровой двойник позволяет виртуальное моделирование и тестирование поведения двигателя в разных условиях эксплуатации. Инженеры могут моделировать различные сценарии и оценить работу двигателя, потребление им энергии, и различные стратегии контроля. Быстрое прототипирование и оптимизация конструкции двигателя приводит к повышенной его эффективности и сокращению времени разработки.

## **Сравнительный анализ цифрового двойника и имитационной модели**

В то время как цифровой двойник и имитационные модели имеют некоторые общие сходства, они служат разным целям и имеют различные

характеристики. Давайте сравним два подхода чтобы получить лучшее понимание. Сравнение представлено в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение цифрового двойника и имитационной модели

<b>Цифровой двойник</b>	<b>Имитационная модель</b>
Представляет конкретный физический актив или систему	Представляет собой обобщенную модель системы.
Собирает данные в реальном времени от датчиков для мониторинга и анализа.	Использует заранее определенные входные данные и предположения
Предоставляет представление о фактической производительности и состоянии актива.	Предлагает прогнозы на основе смоделированных сценариев.
Обеспечивает профилактическое обслуживание и мониторинг состояния.	Облегчает оптимизацию системы и виртуальное прототипирование.
Поддерживает мониторинг и контроль в режиме реального времени.	Основное внимание уделяется автономному анализу и проектированию.
Требуется непрерывная интеграция и синхронизация данных.	Полагается на predetermined входные данные и параметры.

Рассмотрим далее пример оптимизации энергоэффективности электродвигателя. Цифровой двойник будет предоставлять здесь данные о двигателе в режиме реального времени потребления энергии, что позволяет производить немедленные корректировки для контроля его параметров или условий эксплуатации. Но с другой стороны, имитационная модель потребует predetermined входы, такие, как технические характеристики двигателя и профили нагрузки, чтобы спрогнозировать его энергоэффективность при различных сценариях эксплуатации. Основные преимущества применения цифрового двойника представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Преимущества применения цифрового двойника

<b>Ключевые моменты</b>	<b>Описание</b>
Улучшенная эффективность	Цифровое двойное моделирование помогает оптимизировать работу двигателя, что приводит к повышению эффективности.
Экономия затрат и времени	Устраняя необходимость в физических прототипах, моделирование цифровых двойников экономит время и ресурсы.
Предиктивное обслуживание	Цифровой двойник может прогнозировать потенциальные проблемы, обеспечивая упреждающее обслуживание и сокращая время простоев.

Ключевые моменты	Описание
Оптимизация дизайна	Инженеры могут использовать моделирование для тестирования и оптимизации различных конфигураций конструкции для достижения максимальной производительности.
Мониторинг в режиме реального времени	Цифровой двойник позволяет отслеживать работу двигателя в режиме реального времени, обеспечивая быструю настройку и устранение неисправностей.

### **Преимущества использования цифрового двойника при моделировании электродвигателей**

Использование **цифровых двойников** в задачах по моделированию электродвигателей имеет несколько преимуществ. Во-первых, он обеспечивает виртуальную среду тестирования, где различные условия эксплуатации могут быть смоделированы без необходимости создания физических прототипов. Это экономит время и ресурсы, позволяя более быстрое построение и оптимизацию конструкции двигателя.

Во-вторых, цифровой двойник позволяет применить модельно-ориентированный дизайн и виртуальное прототипирование. Инженеры могут исследовать различные варианты дизайна и оценить их производительность прежде чем совершить физическую реализацию. Это снижает риск при дорогостоящих итерациях дизайна и гарантирует, что окончательная конструкция двигателя отвечает желаемым характеристикам.

Кроме того, цифровой двойник облегчает интеграцию с ним датчиков и мониторинг в режиме реального времени. Собирая и анализируя данные из нескольких датчиков, становится возможным получить представление о режиме работы мотора, его производительности и энергоэффективности. Эту информацию можно использовать для оптимизации стратегии контроля двигателя, повысить энергоэффективность и расширить срок службы двигателя.

### **Шаги по созданию модели цифрового двойника электродвигателя**

Создание цифрового двойника такого объекта как электродвигатель, может включать в себя несколько шагов, которые позволяют нам точно представить поведение этой физической системы в виртуальной среде.

1. **Определить систему:** Первый шаг состоит в том, чтобы четко определить систему, которую мы хотим смоделировать. В случае с электродвигателем нам необходимо идентифицировать его ключевые компоненты, такие, как ротор, статор и подшипники, а также соответствующие физические свойства и условия эксплуатации.

2. **Собрать данные:** Далее нам нужно собрать данные из физической системы. Это может включать в себя показания датчиков, технические данные о производительности, и другая важная информация. Чем больше данных у нас есть, тем точнее наш цифровой двойник будет.

3. **Разработать математические модели:** Как только мы имеем необходимые данные, то можем разработать математические модели, описывающие поведение системы. Эти модели могут основываться на физических законах, эмпирических данных или комбинация обоих. Например, мы можем использовать уравнения модели для представления характеристики крутящего момента электродвигателя.

4. **Реализовать модель:** После разработки математической модели, нам нужно реализовать их в среде моделирования. Это можно сделать с помощью программных средств, которые позволяют нам создавать

виртуальное представление системы и моделировать ее поведение, например, в среде моделирования MARC

5. Подтвердить модель: После реализации модели нам необходимо проверить её точность, сравнивая её предсказания с данными от реального объекта. Этот шаг помогает нам гарантировать, что цифровой двойник точно отражает поведение физической системы.

6. Уточнить и оптимизировать: Наконец, мы можем уточнить и оптимизировать цифровой двойник на основе информации, полученной от процесса проверки. Это может включать и корректировку параметров модели, улучшение точности математических уравнений или включение дополнительных источников данных.

Следуя этим шагам, мы можем создать цифровой двойник - модель электродвигателя, которая точно отображает поведение электродвигателя или любой другой сложной системы.

### 13. ЦД в среде моделирования МАРС

Термин ЦД используется в многочисленных статьях, книгах и в интернет-блогах. По мере развития виртуальных моделей, инженеры пришли к практике прогнозирования поведения основного аппарата или системы на базе математического моделирования его свойств и поведения с помощью цифровой модели. Кратко говоря, имеет место зеркальное отображение реального объекта в цифровую модель и синхронизация поведения построенной модели с этим объектом. Важно отметить, что ЦД не ограничивается задачами разработки объекта, а решает задачи поддержания его на всех стадиях жизненного цикла. Например, когда он выходит на стадию эксплуатации, параметры его работы могут быть собраны опросом соответствующих датчиков и использованы для улучшения цифровой модели. ЦД на базе высокоадекватной математической модели может использоваться для диагностики проблем с реальным объектом и прогнозировать оптимальные циклы его профилактического обслуживания.

В качестве объекта исследования в данной работе будут рассматриваться сложные технические управляемые системы (СТУС). Целью работы является исследование структуры ЦД в проекции метода многоуровневых компонентных цепей для сложных технических систем. В задачи проводимых исследований входит адаптация комплексной модели СТУС к особенностям структурных характеристик ЦД, как для каждого из слоев многоуровневой модели, так и для ее периферии, связанной с подготовкой, обработкой и регистрацией данных.

Рассмотрим здесь методику построения ЦД для сложных технических систем на основе метода многоуровневых компонентных цепей (МКЦ) [27-29].

Архитектура многоуровневой компонентной модели цепи и ее окружение приведены на рис. 18. Она впервые была предложена в работе [29] и является хорошей основой для построения ЦД, но требует дальнейшего развития и детализации. Цифровой двойник формируется в виде



компьютерной модели сложной технической управляемой системы, состоящей из трех взаимосвязанных уровней:

- объектный уровень, содержащий в себе компьютерную модель СТУС, ее вход-выходные переменные и переменные состояния участвующих в реализации алгоритма функционирования системы, с подключенными к ней моделями исполнительных и измерительных устройств;
- логический, который содержит имитационную модель алгоритма функционирования системы управления СТУС, а также блоки обработки данных;
- визуальный, на котором осуществляется визуализация данных, полученных с логического слоя, а также формирование задающих воздействий, представляющих собой команды пользовательского или интеллектуального управления.

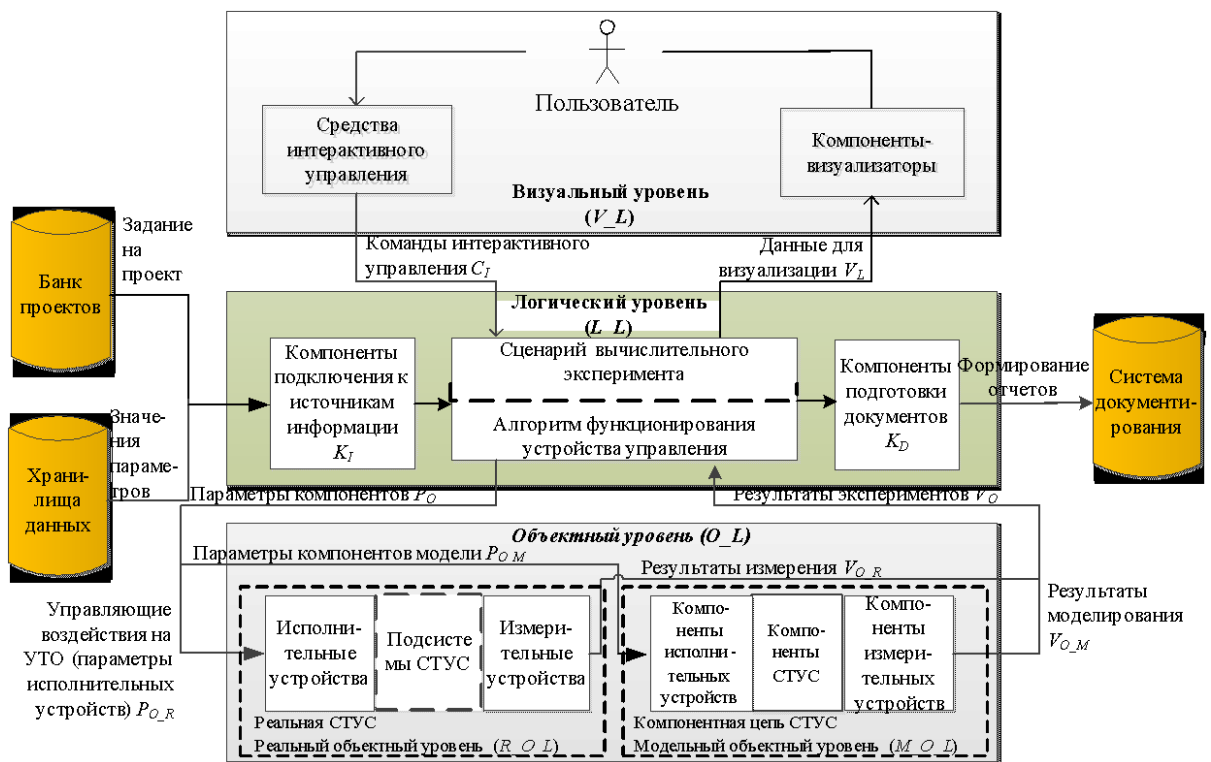


Рис. 18– Структура многоуровневой компонентной цепи СТУС

Рассмотрим более подробно структуру и функции каждого из уровней (слоев, применительно ко входному редактору), а также блоки входных и выходных данных ЦД.

В общем теоретико-множественном виде модель ЦД описывается формулой (1).

$$Mdt = (PE, VM, Ss, DD, CN), \quad (1)$$

где  $Mdt$  - модель ЦД,  $PE$  — физические объекты (СТУС),  $VM$  — виртуальные модели,  $Ss$  — сервисные связи,  $DD$  — данные цифрового двойника,  $CN$  — каналы и протоколы взаимодействия [29].

Рассмотрим последовательно каждую из составляющих этой модели, учитывая формализм (рис. 18).

### **Структура СТУС**

Введем понятие сложной технической управляемой системы (СТУС). Ее структура приведена на рис. 19. Она включает в себя хранилище данных, с помощью которого производится параметризация моделей компонентов системы, проектные схемы объектов, действующие факторы, а также она хранит прошлые, текущие и будущие (прогнозные) состояния ее характеристик. Объект может представлять собой сложную мультифизическую систему, из компонентов разной физической природы со скалярными и векторными связями компонентов. Например – это механические, электрические, гидравлические, тепловые и т. п. компоненты и потоки в их связях. элементы.

Состояния объекта делятся на внутренние и внешние, которые, в свою очередь делятся на измеряемые и управляемые. Измеряемые переменные опрашиваются и образуются с помощью датчиков, а на управляемые переменные непосредственно воздействуют исполнители. Состояния, соответствующие номинальным режимам функционирования, относят к классу целевых. В противном случае – состояния нецелевые. В подсистеме идентификации действует совокупность методов для построения математических моделей динамической системы по данным наблюдений, то есть измеряемых переменных. Формализованные методы

прогнозирования используют модели временных рядов, которые делятся на статистические (регрессия, авторегрессия) и структурные (метод нейронных сетей, цепи Маркова). Они используются для получения будущих состояний в поведении объекта.

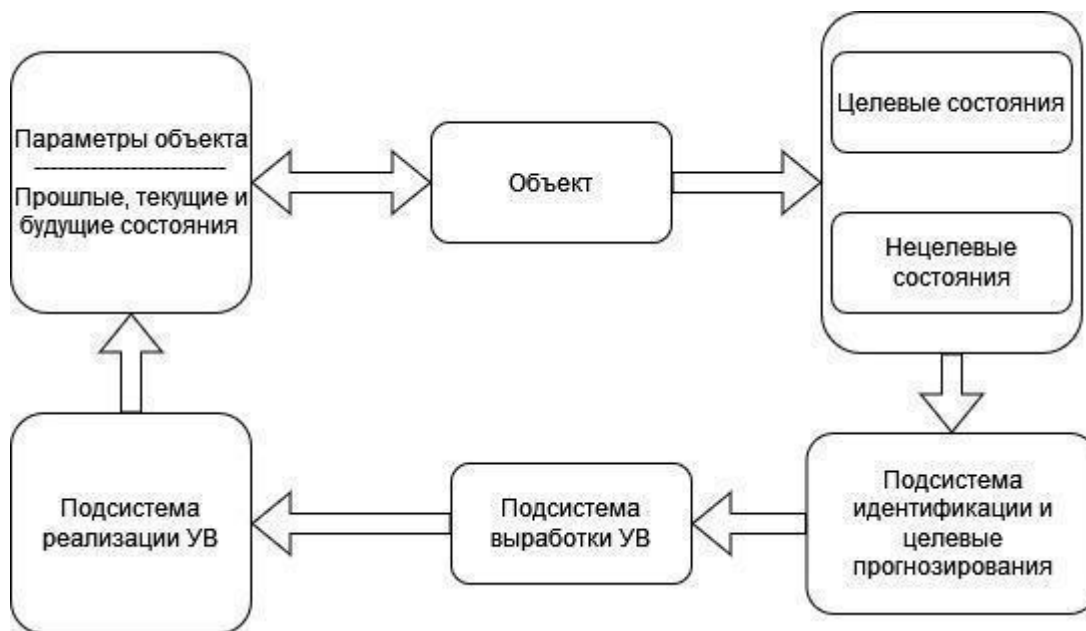


Рис. 19 – Структура СТУС

### Сбор и подготовка данных

Потребность в сборе и обработке данных вызвала необходимость масштабирования и унификации предоставления данных, чтобы выдавать их по запросу как от непосредственных пользователей, так и от приложений, использующих их в целях аналитической обработки. В связи с этим появился класс программно-аппаратных платформ промышленного интернета вещей IIoT (Industrial Internet of Things), причисляемых к компонентам IoT (рис. 20).



Рис. 20 – Структура данных на базе платформы IoT

Интернет вещей (Internet of Things, IoT) — это множество физических объектов, подключенных к интернету и обменивающихся данными. IoT-платформа имеет два главных признака: во-первых, она строится, как правило, на основе программно-аппаратного обеспечения, предназначенного для подключения и управления датчиками, контроллерами и другими платами сбора и подготовки данных от объектов  $PO_i$ . Эти объекты отображаются своими моделями в объектном слое компьютерной модели. Во-вторых, IoT-платформа должна выполнять постобработку, то есть, все то, что происходит после основных действий по построению изображения объекта или его компонента, а также построение аналитических функций, зависящих от специфики производственно-технических задач.

Согласно схеме (рис. 18), логический слой компьютерной модели (КМ), связан с базами хранения данных и с банком типовых проектов. Важным моментом здесь является автоматическая параметризация КМ исследуемых объектов. Основными преимуществами автоматической параметризации являются:

– высокая скорость (значительное сокращение затрат времени на процесс параметризации КМ);

– актуальность значений параметров (т.к. они извлекаются напрямую из баз данных или передаются с датчиков реального объекта).

Методика автоматической параметризации многоуровневых компьютерных моделей технических объектов позволит повысить адекватность компьютерных моделей и эффективность вычислительных экспериментов за счёт взаимодействия с различными источниками актуальных значений параметров, а также обеспечения возможности интерактивного циклического документирования результатов.

Математические и операционные модели оперируют здесь со следующими типами данных (рис. 21).



Рис. 21 – Основные типы данных в ЦД

Здесь литералы — явно заданные значения в коде программы — константы определенного типа, которые находятся в коде в момент запуска.

Теперь рассмотрим подробнее структуру и характер функционирования L-слоя, применительно к ЦД. Отдельно от остальной структуры L-слой может быть представлен схемой (рис. 22).

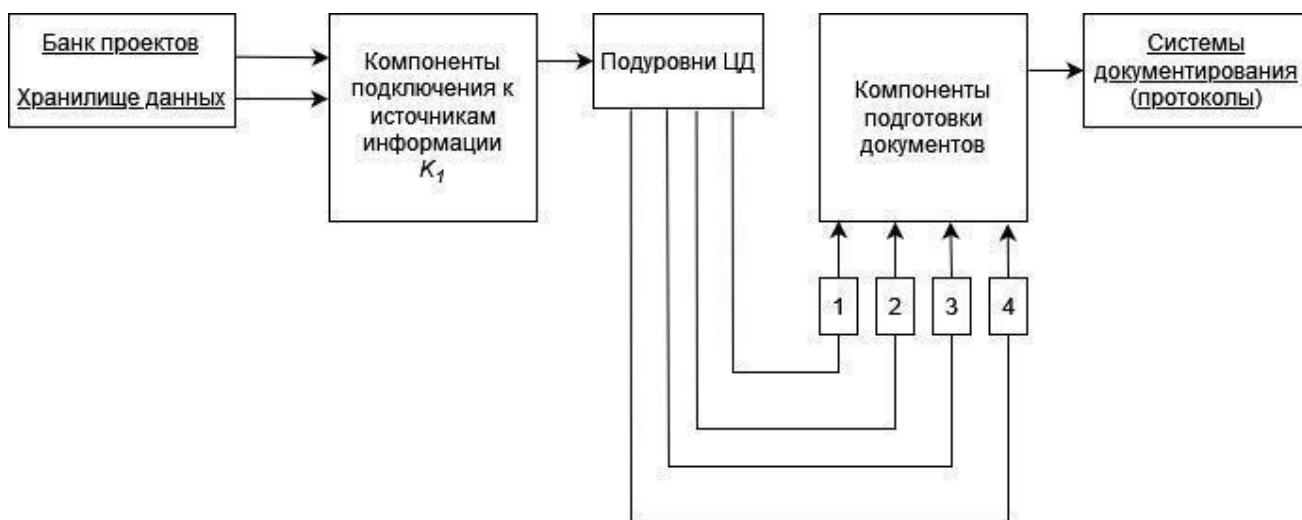


Рис. 22 – Структура логического слоя

Поясним конкретное содержание каждого из выделенных здесь подуровней:

1. Включает в себя два типа ЦД: операционные ЦД (Operational DT) или ЦД, основанные на математическом моделировании (Simulation DT);
2. Содержит операционные ЦД с событиями (Operational DT with Events) и работает с контролируемыми данными, алгоритмы машинного обучения могут выдавать прогнозы (Simulation DT);
3. Операционные ЦД, основанные на событийном и математическом моделировании (Operational DT + Simulation DT);
4. Автономные ЦД (Autonomous DT). Это «когнитивный двойник» (Cognitive Digital Twin, CDT). Данный ЦД эволюционирует в систему пооперационного принятия решений, и являет собой средства принятия решений и программного управления объектами.

Таким образом, логический слой многоуровневой компьютерной модели предназначен для селективной настройки на каждый из указанных выше уровней.

Данный слой содержит также методики расчета параметров, проектируемых или действующих устройств, программы параметрической оптимизации и анализа надежности, а также блоки обработки сигналов. Полученные на этом слое данные поступают в выходной редактор на

визуальный слой и в генератор отчетных форм.

### Объектный слой ЦД

Здесь рассмотрим структурно-функциональную схему ЦД для объектного слоя (рис. 23).

ЦД, основанный на численном моделировании физических процессов (Simulation-Based DT), реализует схему «сверху-вниз». Подход «сверху-вниз» – отображает ход информации от объекта. Процесс сводится к мультифизическому моделированию сложного управляемого объекта, путем построения и решения: а) численной модели, приводящей к численному решению дифференциальных уравнений в обыкновенных и частных производных реализуемую с учетом ограничений, заданных краевыми условиями для ее анализа; б) имитационной модели, использующей методы конечных и гибридных автоматов. При этом используются данные от реального объекта, наиболее существенные для поставленной задачи, которые дополняют математическую модель.

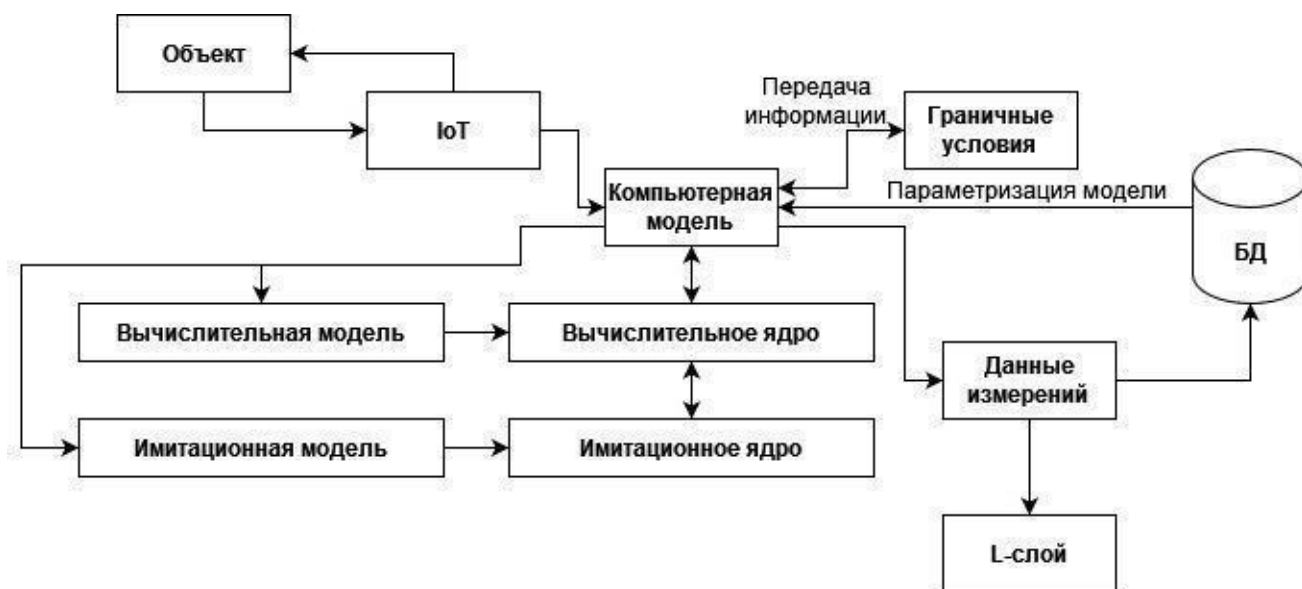


Рис. 23 – Схема ЦД для объектного слоя компонентной цепи

Компьютерная модель на схеме (рис. 23) строится на основе метода компонентных цепей(МКЦ) [27]. Дадим его основные понятия.

Компонентную цепь (КЦ) объекта будем рассматривать в общем виде как тройку объектов:

$$C = (K, B, N) \quad (3)$$

где  $K = (Ke, Km, Kp, Ks)$  – множество различных компонентов:

$Ke$  – элементарные компоненты,

$Kp$  – множество подцепей (компоненты с открытой внутренней структурой),

$Km$  – множество макрокомпонентов (с закрытой (автономной) структурой),

$Ks$  – множество структур (из компонентов, подцепей и макрокомпонентов):  $Ks = (Ke \cup Kp \cup Km)$

$B = (Bn, Bo) \in Bv$  – множество неориентированных или двусторонних ( $Bn$ ), и ориентированных ( $Bo$ ) связей компонентов, принадлежащих множеству векторных связей  $Bv(v = 1, 2 \dots m)$  – оно содержит в себе информационные  $B(1)$ , энергетические  $B(2)$  и многопоточные (векторные)  $B(m)$  связи.

$N$  – узлы объединения связей.

Математическая модель КЦ образуется объединением моделей компонентов вида (2-4) и уравнений топологических законов сохранения для потоковых переменных всех узлов КЦ за исключением базового.

Методом КЦ допускаются три типа уравнений относительно переменных связей компонента  $V^k = V_n^k \cup V_b^k$  :

- линейные  $\Phi(V^k) = c$ ;
- нелинейные  $f(V^k) = 0$ ;
- дифференциальные  $\frac{d(V^k)}{dt} = f_1(V^k, t)$ ,

где:

$$\Phi(V^k) = \sum_{i=1}^{n+m} a_i V_i^k = a_1 V_{n1}^k + a_2 V_{n2}^k + \dots + a_{n+1} V_{b1}^k + \dots + a_{n+m} V_{bm}^k$$



линейная форма относительно переменных связей  $V^k$ ;

$$\frac{d(V^k)}{dt} = \sum_{i=1}^{n+m} K_i \frac{dV_i^k}{dt} = K_1 \frac{dV_{n1}^k}{dt} + K_2 \frac{dV_{n2}^k}{dt} + \dots + K_{n+m} \frac{dV_{bm}^k}{dt}$$

линейная форма относительно производных от переменных связей по времени;

$f(V^k)$  – нелинейная функция;

$c$  – правая часть уравнения;

$K_1, K_2 \dots K_{n+m}$  – коэффициенты при производных;

$n, m$  – количество узлов и ветвей компонента соответственно.

В общем случае правая часть уравнения  $c$  и коэффициенты при производных  $K_i (i = 1, 2 \dots n + m)$ , являются функциями времени.

Уравнения в частных производных чаще всего могут быть аппроксимированы либо разностными сетками, либо методом конечных элементов.

Имитационная модель на схеме (рис. 22) строится также на основе метода компонентных цепей, но оперирует моделями из дискретных и гибридных [31] автоматов. Дискретные компоненты КЦ обычно представляются в форме конечных автоматов (рис. 24)

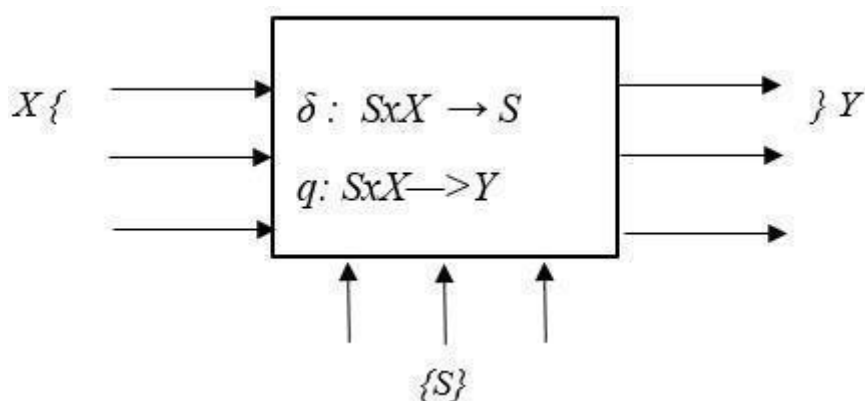


Рис. 24 – Представление конечного автомата

Обычно конечный автомат представляют в виде пятерки параметров  $M = (X, S, Y, \delta, q)$  где:

–  $X = \{x_0, x_1, \dots, x_n\}$  – конечное множество входных символов

(входной алфавит) автомата, из которого формируются строки, считываемые автоматом;

- $Y = \{y_0, y_1, \dots, y_m\}$  – допустимый список выходных символов (выходной алфавит);
- $S$  – множество внутренних состояний;
- $\delta$  – заданное отображение множества  $S \times X$  во множество  $S$  (функция переходов автомата в следующее состояние)  $q: S \times X \rightarrow S$ ;
- $S \times X \rightarrow Y$  – функция выхода.

Тем самым, конечный автомат математически описывается тремя множествами и двумя функциями. Действие его состоит в том, что он считывает последовательность входных символов (программу) и затем выдает последовательность выходных символов. Конечный автомат (рис. 23), входит в качестве вычислительной модели компонента в блок-схеме (рис. 21).

Гибридный автомат (ГА), согласно [31], задается следующим множеством компонент:

$$H = \{t, G, V, C, P, A, F\}$$

где  $G = \{S, s_0, E\}$  — ориентированный граф, вершины которого сопоставлены элементам множества дискретных состояний автомата  $S = \{s_i | i = 1 \dots m\}$ , а дуги — возможным переходам автомата из одного состояния в другое  $E: S \rightarrow S$ . Одно из состояний  $s_0$  является начальным;

$t \in TCR$  — независимая переменная, определяющая значение непрерывного времени;

$V = \{V_c, V_d\}$  — множество переменных, в том числе:  $V_c = \{v_i \in R | i = 1 \dots n_c\}$  — множество непрерывных переменных и  $V_d = \{v_i \in R \cup Z \cup B | i = 1 \dots n_d\}$  — множество дискретных переменных ( $B = \{false, true\}$  — множество логических значений);

$C = \{c_i: (t, V) \rightarrow V_c | i = 1 \dots k_c\}$  — множество непрерывных отображений;

$P = \{p_i(t, V) \in B | i = 1 \dots k_p\}$  — множество логических предикатов;

$\Phi = \{c_i: (t, V) \rightarrow M | t = 1 \dots k_a\}$  — множество мгновенных действий.

$F = \{F_c, F_p, F_a\}$  где  $F_c: C \rightarrow S$  — отображение, сопоставляющее множество непрерывных отображений множеству состояний (вершин графа),  $F_p: P \rightarrow E$  отображение, сопоставляющее множество предикатов множеству переходов (дуг графа),  $F_a: A \rightarrow E$  — отображение, сопоставляющее множество мгновенных действий множеству переходов (дуг графа).

Кроме математических непрерывных и дискретных моделей L-слой может содержать и операционные прогнозные модели. Сюда входят структурные модели прогнозирования, где функциональная зависимость между будущими и фактическими значениями временного ряда, а также внешними факторами задана структурно, например, в виде графа. Имитационное ядро системы МАРС оперирует и нейросетевыми моделями, относящимися к классу структурных моделей прогнозирования.

### **Визуальный слой (V-слой)**

С этим слоем непосредственно взаимодействует выходной графический редактор, предназначенный для визуализации временных и частотных характеристик, а также векторных и других диаграмм путем подключения соответствующих виртуальных приборов. Панель виртуальных измерительных и генерирующих приборов имеет многоканальный осциллограф, построитель частотных характеристик, мультиметр, прикладные анализаторы сигналов и ряд других, а также построители 3D –сцен, реализованные в подсистеме СВИП СМ МАРС. Создаются такие панели на основе задающих функциональных блоков виртуальных приборов, составленные из визуальных компонентов. С помощью них осуществляется задание параметров ВП на визуальном уровне его многоуровневой КЦ, значения которых передаются на её логический уровень, где осуществляется их обработка сценариями функционирования ВП с передачей ее результатов на объектный уровень. Типовая структура задающего ФБ и протекающий в нем информационный поток представлены на рисунке рис. 25.

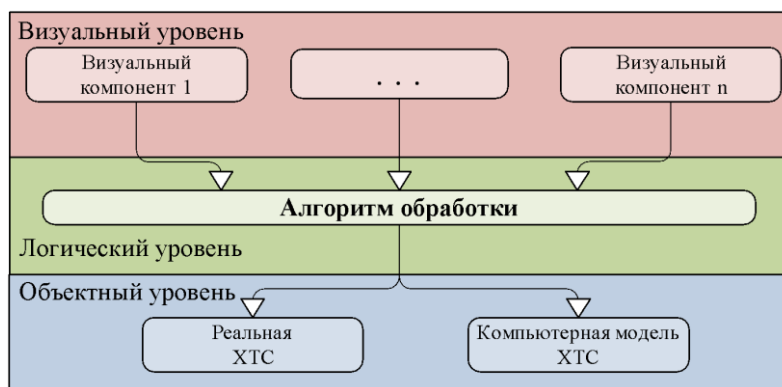


Рис. 25 – Структура задающего функционального блока

На рис. 26 приведена схема с виртуальными приборами – осциллографом и функциональным генератором. Визуальный слой содержит результаты расчета параметров проектируемых устройств, выходных данных программ параметрической оптимизации и нейросетевого моделирования, анализа надежности и блоков обработки сигналов. Поддерживает создание графиков и таблиц, введение пользовательских функций на основе интерактивной математической панели. Расчет введенных данных выполняет вычислитель и при необходимости он выполняет экспорт результатов в редактор отчетов.

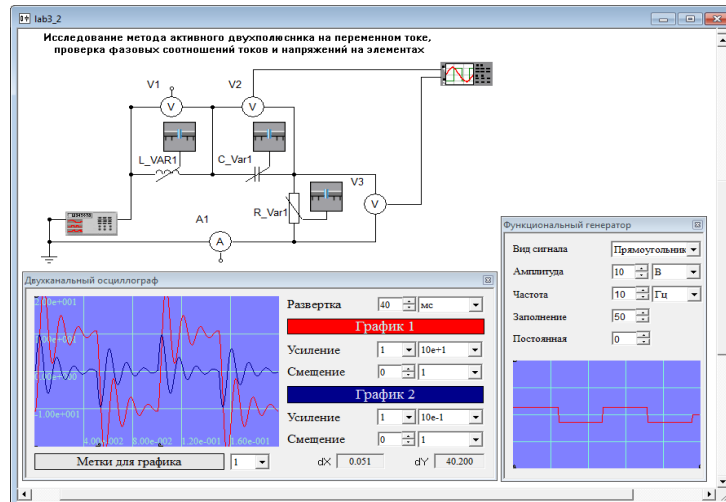


Рис. 26 – Схема колебательного контура с виртуальными приборами

Библиотека моделей компонентов – в данном аспекте БМК используется для выбора компонентов, входящих в конструктор технических документов (КТД), а также необходимые параметры этих компонентов.

Редактор отчетов позволяет выполнить импорт объектов (формул, графиков, схем, таблиц) из различных модулей в рабочий документ, сходный с MS Word, для предоставления отчетности о выполненной работе. Здесь же имеется возможность вносить текстовые пояснения пользователя о полученных результатах и отправлять результаты эксперимента на печать.

В СМ МАРС разрабатывается специализированное программное обеспечение, к которому относятся конструкторы технических документов (КТД). Они позволяют формировать структуру документа в удобном для пользователя графическом виде, а также автоматически формировать документы на основе имеющихся данных, представленных в виде числовых значений, текста, рисунков, таблиц и формул. Одной из сфер применения КТД является процесс формирования отчёта по выполненной лабораторной работе. Рассмотрим основные компоненты такого конструктора, с помощью которого и составляются технические отчеты, путем отображения в компонентную структуру числовых значений, текста, рисунков, таблиц и формул (рис. 27).



Рис. 27– Функциональная схема выходного редактора

### Конструктор технического документа

Любой технический документ можно представить в виде совокупности его структурных элементов (и связей между ними) (рис. 28)

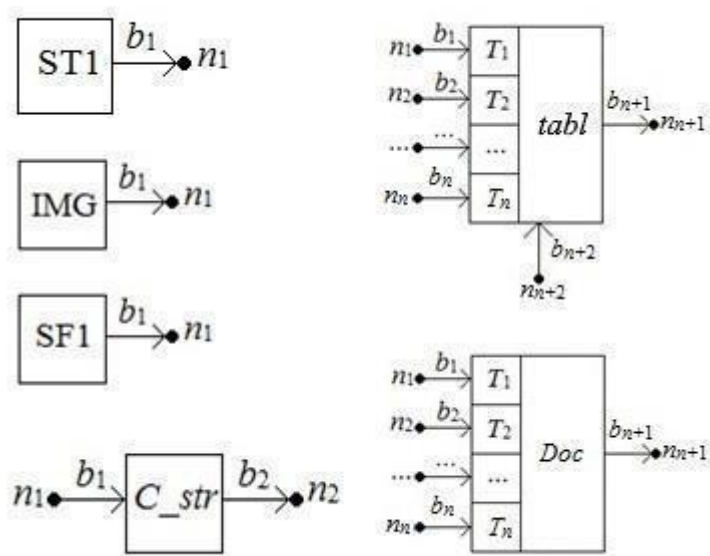


Рис. 28 – Структурные элементы генератора отчетных форм

На рис. 28:

- ST1 – источник текста;
- IMG – рисунок;
- SF1 – источник формул;
- tabl– таблица;

- C\_str – числовой интерпретатор;
- Doc-документ.

В зависимости от того какие компоненты структурных единиц отчета подключены ко входу документа, таков и будет его вид (рис. 29).

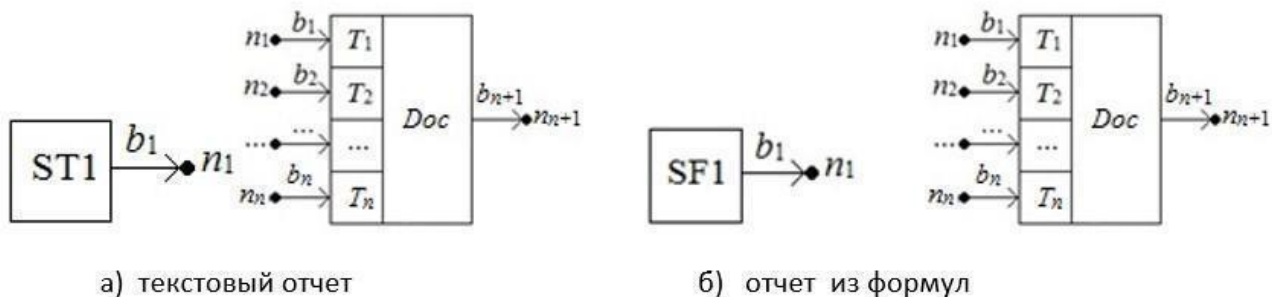


Рис. 29 – Примеры конструкций в генераторе отчетных форм

## 14. Полунатурное моделирование с ЦД в СМ МАРС

Рассмотрим сначала основные понятия и процессы применения полунатурного моделирования.

Полунатурное моделирование — это моделирование с реальной аппаратурой, при котором часть системы моделируется, а остальная часть является реальной. Применение такого метода моделирования становится необходимым в тех случаях, когда не удастся описать работу некоторых элементов системы математически. Например, при исследовании радиолокационных (РЛ) САУ летательных аппаратов в условиях помех процесс приема и передачи антенной отраженного сигнала трудно поддается математическому описанию. Поэтому приходится РЛ и другую аппаратуру, не поддающуюся математическому описанию, воспроизводить в натуре, а остальные звенья САУ — математически на ЭВМ. Естественно работа всей замкнутой схемы моделирования должна проходить в натуральном масштабе времени. Такое моделирование системы управления позволяет анализировать как всю систему в целом, так и отдельные ее элементы, исследовать влияния кинематики и динамики элементов реальной аппаратуры на работу САУ, несмотря на то, что их математическое описание отсутствует.

В процессе полунатурного моделирования удачно сочетаются достоинства математического и натурального моделирования и может быть достигнуто оптимальное взаимодействие между вычислительными и натурными экспериментами. В настоящее время методы полунатурного моделирования эффективно применяют при проектировании разнообразных автоматических управляющих систем.

Необходимость применения таких методов возникает, если:

- объект управления находится еще в стадии проектирования, а элементы устройства управления реально существуют;
- объект не может испытываться в лабораторных условиях;



— элементы устройства управления имеют нелинейные характеристики, трения, помехи, которые при составлении их уравнений не учитывались;

— проведение натуральных экспериментов по настройке устройства управления на объекте дорого или вообще недопустимо.

Для проведения полунатурного моделирования необходимо иметь сопрягающие устройства для связи модели (ЭВМ) с внешними реальными элементами.

Структура полунатурного моделирования системы управления представлена на рис. 30. Система включает также модель генератора возмущающих воздействий для выполнения имитационных экспериментов и устройство сопряжения с объектом (УСО), т.е. преобразующие элементы для связи модели объекта с реальной аппаратурой. Включение в схему моделирования дополнительных преобразующих элементов искажает результаты моделирования реального процесса. Поэтому основные свойства этих элементов должны быть учтены при обработке результатов моделирования или же при организации самого процесса моделирования. Например, если преобразующие элементы инерционны, то можно хотя бы частично скомпенсировать инерционность введением в модель объекта форсирующих звеньев.

Цель моделирования при проектировании САУ — выбор структуры и параметров отдельных устройств автоматической системы, отвечающих требованию выполняемых ею функций и заданным показателям качества ее работы. При выбранной структуре автоматической системы моделированием определяется лишь оптимальные значения параметров устройства управления, в наибольшей степени влияющих на заданные показатели качества.

Моделирование применяется также для исследования спроектированной автоматической системы с целью выяснения ее надежности, устойчивости, чувствительности и поведения при отказе тех или иных элементов, при различных (в том числе аварийных) возмущающих и задающих воздействиях.

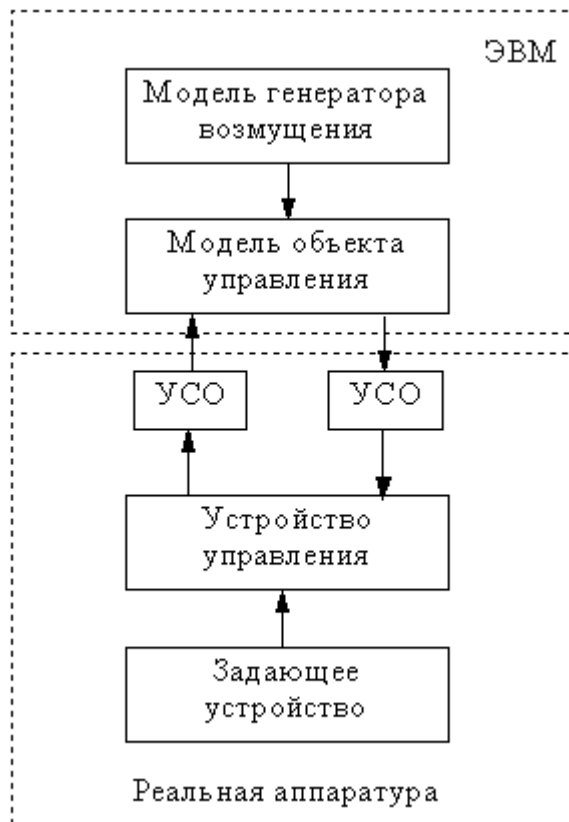


Рис. 30 – Схема полунатурного моделирования

Важным элементом этой схемы являются элементы УСО. Один из вариантов такого устройства приведен на рис.31.

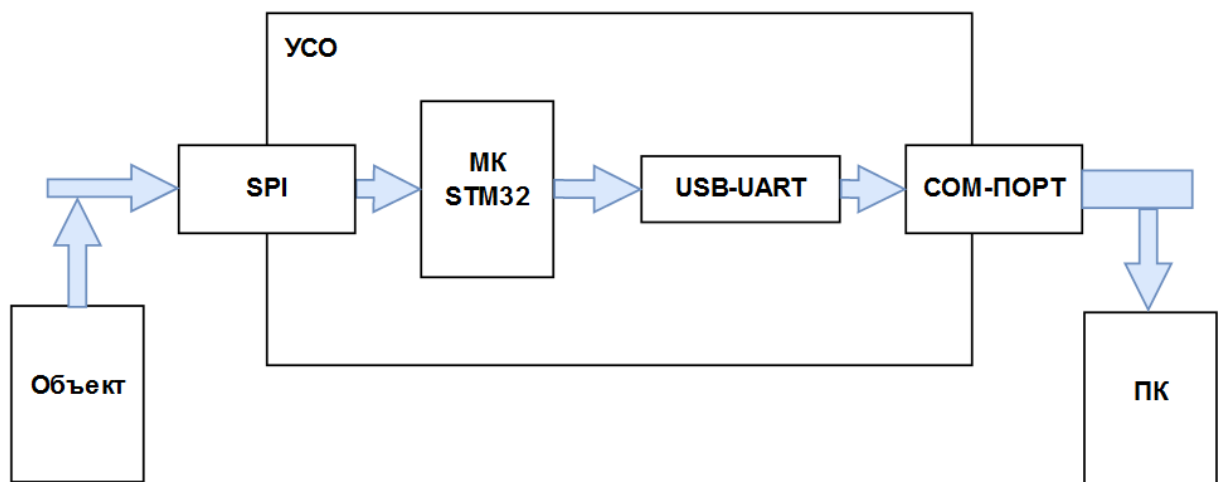


Рис. 31 – Структура элемента УСО

Здесь предполагается, что элемент УСО имеет на входе некоторый последовательный интерфейс (типа SPI), с которого поступают сигналы от датчиков на объекте, далее следует микроконтроллер с АЦП и через шину USB-UART сигналы поступают на COM-порт персонального компьютера PC.

Можно рассмотреть использование ЦД на примере схемы полунатурного моделирования, в задачи которой входит определение параметров модели, позволяющие добиться ее адекватности объекту (рис. 32). В дальнейшем такая модель может играть роль цифрового двойника в полунатурном моделировании.

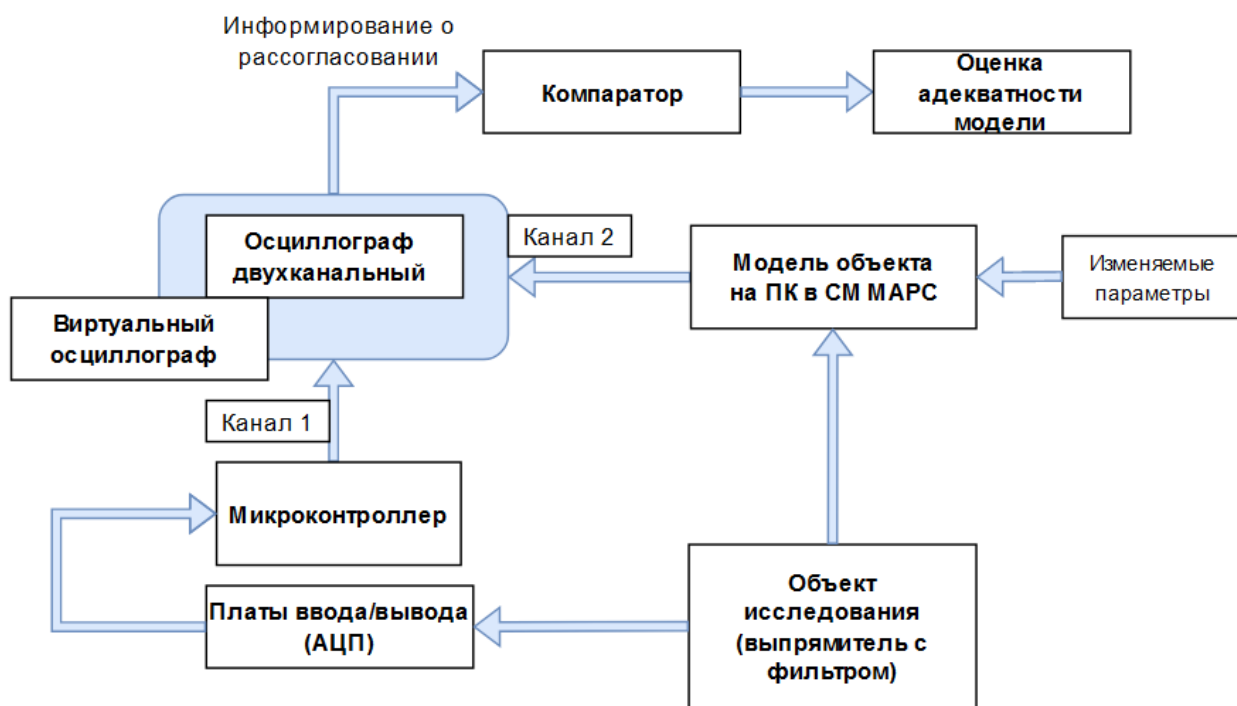


Рис. 32 – Схема идентификации модели для достижения ее адекватности

**Объект** - выпрямитель с фильтром – схема, в которой имеются компоненты с изменяемыми параметрами и выходными характеристиками;

**Модель объекта**- модель объекта управления, строится на базе СИМ МАРС;

С помощью **плат вывода данных (АЦП)** идет передача кодов в микроконтроллер непосредственно от объекта;

**Микроконтроллер** - может быть построен на базе МК STM 32;

**С технической точки зрения:** это 2-х канальная система с сигналами от объекта (канал 1) и с изменяемыми сигналами из модели (канал 2). Сигналы от обоих каналов поступают на осциллограф и компаратор, в результате чего появляется возможность оценить ошибку рассогласования между ними и далее минимизировать ее с помощью оптимизационных процедур.

## Заключение

Учебное пособие "Цифровые двойники" позволяет изучить основные принципы построения цифровых двойников. В пособии представлена история и этапы развития цифровых двойников, рассмотрены основные термины и дано их лексикографическое представление, даны технологии развития ЦД и применения в СТУС, способы их взаимодействия с источниками данных, а также рассмотрена реализация цифрового двойника в СМ МАРС и системах полунатурного моделирования. В пособии рассмотрены следующие темы:

- основные понятия и определения ЦД;
- инжиниринговые инструменты для создания ЦД и их эволюция;
- ЦД и оптимизация изделия, аддитивные технологии;
- технологии математического моделирования и цифровых теней;
- достоинства и требования сложности для реализации аналитических и математических моделей физико-механических процессов;
- ЦД, облака и периферийные вычисления;
- ЦД и новые человеко-машинные интерфейсы;
- схема ЦД и роль составляющих технологий;
- ЦД как способ преодоления сложности инженерных систем;
- ЦД в энергетике;
- моделирование цифрового двойника электродвигателя;
- ЦД в среде моделирования МАРС;
- полунатурное моделирование.

В результате изучения данного учебного пособия студенты получают теоретические знания, необходимые для активного внедрения цифровых двойников в сложные технические управляемые системы.

## Литература

1. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт./Научный редактор профессор Боровков А. – Издание первое, исправленное и дополненное. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с.
2. The New Age of Manufacturing: Digital Twin Technology & IoT [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.seebo.com/digitaltwin-technology/> (дата обращения: 28.05.2020).
3. The intelligent product driven supply chain. Conference Paper, November 2002 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/3996498\\_The\\_intelligent\\_product\\_driven\\_supply\\_chain](https://www.researchgate.net/publication/3996498_The_intelligent_product_driven_supply_chain) (дата обращения: 28.05.2020).
4. K. Hribernik, T. Wuest, K.D. Thoben Towards product avatars representing Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on, 2 (3), (2005), pp.
5. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-38756-7\\_4](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-38756-7_4) (дата обращения: 28.05.2020).
6. Modern manufacturing's triple play: Digitaltwins, analytics and the internet of things [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://expectexceptional.economist.com/digital-twins-analytics-internetof-things.html> (дата обращения: 28.05.2020).
7. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles. Conference Paper · April 2012 Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/268478543\\_The\\_digital\\_twin\\_paradigm\\_for\\_future\\_NASA\\_and\\_US\\_air\\_force\\_vehicles](https://www.researchgate.net/publication/268478543_The_digital_twin_paradigm_for_future_NASA_and_US_air_force_vehicles) (дата обращения: 28.05.2020)
8. The history of PLM, from configuration management to cloudbased connectivity and the IoT) [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://www.designnews.com/design-hardware-software/briefhistory-plm> (дата обращения: 28.05.2020).

9. Боровков А.И., Гамзикова А.А., Кукушкин К.В., Рябов Ю.А. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности. Краткий доклад (сентябрь 2019 года) – СПб.: ПОЛИТЕХПРЕСС, 2019. – 62 с.

10. Инженеры РФ и США будут вместе искать оптимальное применение современных технологий [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://tass.ru/obrazovanie/3829154> (дата обращения: 28.05.2020).

11. T. Mukherjee, T. DebRoy. A digital twin for rapid qualification of 3D printed metallic components, [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352940718304931?via%3Dihub> (дата обращения: 28.05.2020).

12. Elizabeth Dukes. The Cost of IoT Sensors Is Dropping Fast, 11 September 2018 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ioffi.com/blog/cost-of-iot-sensors#CurRqfCiU93DhRD1.99> (дата обращения: 28.05.2020)

13. Digital Twins: a European perspective [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docplayer.net/153190669-Digital-twins-a-european-perspec> (дата обращения: 28.05.2020)

14. The Evolution of Digital Twins for Asset Operators. Part 2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elementanalytics.com/blog/digital-twin-blog-part-2> (дата обращения: 28.05.2020).

15. Digital Twin [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.wipro.com/process-and-industrial-manufacturing/digital-twin/> (дата обращения: 28.05.2020).

16. Cyber Physical Systems: Design Challenges [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4519604> (дата обращения: 28.05.2020).

17. Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing Fei Tao, Meng Zhang, Published in IEEE Access, 2017

[Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.semanticscholar.org/paper/Digital-Twin-Shop-Floor%3A-A-NewShop-Floor-Paradigm-Tao-Zhang/8b77cd55a39c4c8c87f8a6a6572\\_078e247630829](https://www.semanticscholar.org/paper/Digital-Twin-Shop-Floor%3A-A-NewShop-Floor-Paradigm-Tao-Zhang/8b77cd55a39c4c8c87f8a6a6572_078e247630829) (дата обращения: 28.05.2020)

18. Improving edge computing using the power of digital twin technology [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.challenge.org/insights/digital-twin-edge-computing/> (дата обращения: 28.05.2020).

19. Fraunhofer VisIT (Industrial IoT – Digital Twin) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/81711/visIT\\_1\\_Industrial%20IoT\\_web.pdf?command=downloadContent&filename=visIT\\_1\\_Industrial%20IoT\\_web.pdf](https://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/81711/visIT_1_Industrial%20IoT_web.pdf?command=downloadContent&filename=visIT_1_Industrial%20IoT_web.pdf) (дата обращения: 28.05.2020)

20. Virtual Reality: Scientific and Technological Challenges [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nar.edu/read/4761/chapter/12#248> (дата обращения: 28.05.2020)

21. Digital twin machine learning differentiator in oil and gas IoT [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.geoilandgas.com/software-solutions/industrial-internet/digital-twin-machinelearningdifferentiator-oil-and-gas-iiot> (дата обращения: 28.05.2020)

22. Системная инженерия. Ссылки и документы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mellarius.ru/systems-engineering> (дата обращения: 28.05.2020).

23. Report From Icas Workshop On Complex Systems Integration In Aeronautics, Susan X. Ying, Commercial Aircraft Corporation of China [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mitre.org/publications/systems-engineering-guide/systems-engineeringguide/the-evolution> (дата обращения: 28.05.2020).

24. Connecting SysML with PLM/ALM, CAD, Simulation, Requirements, and Project Management Tools [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=aHr5wVRXvMc> (дата обращения: 28.05.2020).

25. Leveraging Digital Twin Technology in Model – Based Systems Engineering [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2079-8954/7/1/7> (дата обращения: 28.05.2020)

26. Цифровые двойники и цифровые тени в высокотехнологичной промышленности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://4science.ru/articles/Cifrovie-dvoyniki-i-cifrovie-teni-v-visokotehnologichnoi-promishlennosti> (Дата обращения: 28.05.2020).

27. В.М. Дмитриев, А.В. Шутенков, Т.Н. Зайченко, МАРС- среда моделирования технических устройств и систем Т.В. Ганджа – Томск, В-Спектр, 2011

28. В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа, В.В. Ганджа, Ю.И. Мальцев. СВИП – СИСТЕМА ВИРТУАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ И ПРИБОРОВ. В-Спектр, Томск, 2014.

29. В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа. Среда многоуровневого компьютерного моделирования химико-технологических систем. Изд-во Томского государственного университета. Томск, 2017.

30. Игорь Б. Шубинский, Хендрик Шебе, Ефим Н. Розенберг. О функциональной безопасности сложной технической системы управления с цифровыми двойниками.

31. Ю. Б. Колесов Ю. Б. Сениченков. Моделирование систем. Объектно-ориентированный подход. Учебное пособие. — СПб.: БХВ-Петербург, 2012. — 192 с.: ил.