

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

---

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

---

*В.Л. Баденко, В.В. Барсков, В.К. Ядыкин*

ОСНОВЫ модельно-ориентированного  
системного инжиниринга

Учебное пособие

Санкт-Петербург  
2025

УДК 004.9

*Баденко В.Л., Барсков В.В., Ядыкин В.К.* **Основы модельно-ориентированного системного инжиниринга.** – СПб., 2025. – 230 с.

Модельно-ориентированный системный инжиниринг (Model Based System Engineering – MBSE) – современный этап развития системной инженерии. Цель реализации методологии MBSE состоит в том, чтобы создать единую, унифицированную модель целевой системы («единый источник истины»), из которой могли бы быть сформированы все документы и представления об объекте. В современном мире MBSE становится эффективным инструментом по реализации сложных промышленных объектов. В настоящем пособии изложены основы модельно-ориентированного системного инжиниринга, которые являются передовым современным подходом к управлению реализацией сложных инженерных проектов в том числе в цифровом виде.

Пособие предназначено для всех обучающихся, интересующимся современными инженерными методами цифровой трансформации предприятий.

Ил. 58. Библиогр.: 119 назв.

## **Сокращения и обозначения**

DE – цифровая инженерия (Digital Engineering)

INCOSE – International Council on Systems Engineering (Международный совет по системной инженерии)

LKA – удержание полосы движения

MBCPSE – киберфизическая системная инженерия на основе моделей

MBSE – model based system engineering (модельно-ориентированный системный инжиниринг)

SE – Systems Engineering (системная инженерия)

SysML – язык системного моделирования

UML – унифицированный язык моделирования

ЖЦ – жизненный цикл

ЗС – заинтересованные стороны

ИИ – искусственный интеллект.

КФС – киберфизическая система

MBVC – матрица взаимного влияния сущностей

ПО – программное обеспечение

ПП – промышленное предприятие

СППР – система поддержки принятия решений

ЦД – цифровой двойник (Digital Twin, DT)

## Оглавление

Введение.....	5
1 Введение в системную инженерию.....	10
1.1 Теория систем и системный подход. ....	10
1.2 Методы и инструменты инжиниринга искусственных систем....	20
1.3 Принципы системной инженерии .....	32
1.4 Системная инженерия и информация об объектах .....	41
1.5 Системы деятельности и композиции системно-ориентированных приёмов .....	47
1.6 Системная инженерия и цифровая трансформация промышленности. Цифровое мышление. ....	55
2 Природа систем и представление систем с помощью моделей .....	61
2.1 Типы систем. Циклическая и иерархическая природа систем. ....	61
2.2 Основные сущности для представления систем: требования, функции, компоненты.....	75
2.3 Модельно-ориентированный подход в представлении систем....	83
2.4 Типология моделей в инжиниринге технических систем. Метамоделирование.....	88
3. Архитектурные модели системы.....	94
3.1 Опорная архитектурная модель.....	94
3.2 Системные архитектурные модели. Атрибутирование архитектуры. ....	100
3.3 Матрицы взаимного влияния сущностей .....	107
4 Методология модельно-ориентированного системного инжиниринга .....	115

4.1 Основные компоненты методологии модельно-ориентированного системного инжиниринга .....	115
4.2 Методы формирования и управления потребностями в системе и требованиями к ней .....	122
4.3 Задачи модельно-ориентированного анализа и синтеза системы .....	130
4.4 Опорный алгоритм модельно-ориентированного системного инжиниринга.....	141
5. Стандарты системной инженерии .....	146
5.1 Стандарты системной инженерии в мире .....	146
5.2 Стандарты системной инженерии в России.....	151
6 Применение модельно-ориентированного системного инжиниринга .....	161
6.1 Ключевые понятия системного моделирования предприятия... ..	161
6.2 Формирование системной архитектуры предприятия (функциональной, логической, физической). Примеры. ....	173
6.3 Формализация взаимосвязи физического, киберфизического и бизнес слоев в системной модели. ....	181
6.4 Модельно-ориентированный системный инжиниринг и цифровая трансформация .....	196
Заключение .....	217
Литература .....	219

## Введение

Целью данного пособия является формирование и совершенствование у читателей профессиональных компетенций, связанных с методическим обеспечением и поддержкой процессов создания цифрового представления вновь создаваемых и существующих инженерных объектов, рассматриваемых как системы, на основе применения методологии модельно-ориентированного системного инжиниринга (Model-Based System Engineering – MBSE). Такие компетенции позволят методически поддержать новейшие тренды в инжиниринге, связанные с переходом при принятии решений от документно-ориентированного подхода к модельно-ориентированному подходу, на основе построения комплексной информационной модели объекта, единой для всех стадий жизненного цикла. Данное пособие позволит закрыть потребности в базовых знаниях в прорывном направлении новейшего инжиниринга, основанном на комплексном применении системного, архитектурного, математического и компьютерного моделирования. Содержание пособия отвечает современным трендам в направлении развития, консолидации и применения новых модельно-ориентированных системных и компьютерных подходов для решения актуальных задач цифровой трансформации промышленности.

Актуальность настоящего пособия определяется тем, что наблюдается экспоненциальный рост разработок в области инструментов инжиниринга [1, 2], а также нового поколения соответствующего программного обеспечения [3]. При этом существующие продукты еще далеки от удовлетворения всех потребностей инженеров [4]. Растущее понимание в необходимости расширения внедрения новых цифровых технологий, в частности цифровых двойников, активно формирует новые методы и инструменты цифрового системного инжиниринга, которые позволяют обеспечить должный уровень адекватности, чтобы говорить о формировании цифрового двойника [5, 6].

Рост масштабов и усложнение способов организации деятельности по созданию инженерных объектов, повышение степени ответственности за ее

результаты, быстрое возрастание сложности возникающих при этом научных, технических и управленческих проблем привели к появлению в середине XX века новой прикладной системной методологии – системной инженерии (Systems Engineering – SE). В современных разработках зарубежных специалистов системная инженерия рассматривается как комплексный, мульти-дисциплинарный подход к созданию и эксплуатации сложных систем. Системная инженерия признается в качестве фундамента, на основе которого можно обеспечить и гарантированно поддерживать надежную и устойчивую связь между миссией системы, стратегическими целями, конкретными задачами и измеримыми результатами инженерной деятельности. Недаром один из видных зарубежных специалистов по системной инженерии Дерек Хитчинс (Derek K. Hitchins) назвал системную инженерию системной методологией XXI века.

Практическое применение методов системной инженерии при разработке адекватных цифровых представлений, существующих сложных технических объектов, показал, что при этом используются разные модели – вербальные, онтологические, экспертные, архитектурные, математические, цифровые, интеллектуальные, которые результативно дополняют друг друга, и поэтому надо формировать методы и инструменты, чтобы системно и быстро совмещать это множество моделей [7]. Как ответ на эти вызовы возникла и стала развиваться идея модельно-ориентированного системного инжиниринга (Model Based System Engineering – MBSE) [8], позволяющего совмещать и использовать в инжиниринге «все» типы моделей. Согласно MBSE подходу опорную структуру моделей системного инжиниринга можно упорядочить по принципу последовательности разработки [8, 9]: онтологические модели → архитектурные модели → параметризованные архитектурные модели → математические модели → компьютерные модели. В этой цепочке каждый последующий тип моделей гармонизирован с предыдущими, наследует и дополняет их новыми дополнительными свойствами и характеристиками. Таким образом, проекты разработки цифровых представлений сложных

технический систем на базе MBSE стартуют с формирования онтологии предметной области, которые представляют собой структурированный атрибутированный справочник основных определений и понятий, которые используются для создания архитектурных системных моделей целевых объектов. Архитектурные системные модели представляют собой описания иерархически структурированных системных сущностей (требований, функций, компонентов и процессов) в унифицированной форме, а также матриц связанностей этих сущностей [1, 2, 8, 9]. В формировании нового индустриального уклада Индустрия 4.0 [1] ключевую роль сыграла системная инженерия, которая, как уже отмечалось, представляет собой междисциплинарный комплексный подход к созданию и эксплуатации сложных технических объектов, который охватывает все этапы жизненного цикла (ЖЦ) проекта и позволяет формализовать сложные взаимодействия и взаимовлияния объектов и субъектов для удовлетворения потребностей всех заинтересованных сторон (ЗС) [2]. В настоящее время наибольшие успехи системный инжиниринг демонстрирует в аэрокосмической отрасли, чему, в частности, посвящены соответствующие учебные программы, развиваемые, например, в Московском Физико-техническом институте – национальном исследовательском университете (МФТИ) [3-5]. Будущим инженерам полезно ориентироваться в системной инженерии при реализации современных проектов сложных технических систем.

Итак, на современном этапе развития системного инжиниринга мы говорим о его развитии на новом уровне и говорим о модельно-ориентированной системной инженерии – MBSE. Существует международная организация – Международный совет по системной инженерии (International Council on Systems Engineering – INCOSE), которая является некоммерческой организацией, ставящая своей целью развитие системной инженерии, разработку стандартов для неё и профессиональный рост системных инженеров. Согласно INCOSE, MBSE представляет собой формализованное применение моделирования для поддержки системных требований,

проектирования, анализа, верификации и валидации, начиная с этапа концептуального проектирования на протяжении всей разработки и более поздних фаз ЖЦ [6, 7]. При этом INCOSE описывает текущее состояние MBSE как следующее: "Системная инженерия на основе моделей набирает популярность как способ преодоления ограничений подходов, основанных на документах, но все еще находится на ранней стадии зрелости, аналогичной началу развития САПР". MBSE – это технический подход к системной инженерии, который фокусируется на создании и использовании моделей предметной области в качестве основного средства обмена информацией. Иными словами, используется модельно-ориентированный подход в противоположность более традиционному документно-ориентированному подходу.

Квалификация инженеров, в рамках которой представлено изложение пособия, определяется действующими профессиональными стандартами и квалификационными справочниками в разделе «Требования к квалификации», где определены необходимые для выполнения должностных обязанностей уровень профессиональной подготовки работника, удостоверяемый документами об образовании, а также требования к стажу работы. В первую очередь речь идет о двух профессиональных стандартах – Профессиональный стандарт «Специалист по цифровому проектированию объектов использования атомной энергии» (регистрационный № 1314), утв. приказом Минтруда от 15.06.2020 №328н и Профессиональный стандарт «Системный инженер проектов сооружения объектов использования атомной энергии» (регистрационный № 1419), утв. приказом Минтруда от 18.03.2021 №138н. В результате изучения пособия читатель сможет усовершенствовать и приобрести профессиональные компетенции и усовершенствовать общепрофессиональные компетенции, включая следующие:

- Методическое обеспечение предварительной оценки возможности реализации проекта в соответствии с ожиданиями и потребностями заказчика

- Методическое сопровождение внедрения процессов реализации проекта в течение всего жизненного цикла проекта
- Проектировать структуру взаимодействия участников проекта
- Создавать процессное описание деятельности по управлению проектом в различных нотациях/стандартах
- Систематизировать информацию из множественных источников для разработки методики передачи информации по проекту
- Использовать различные методы и способы верификации процессов управления проектом
- Определять алгоритм обмена данными в рамках единого информационного пространства проекта
- Проектировать атрибутированную архитектуру целевой системы

Содержание пособия основана на фундаментальных работах [1-21], которые излагаются в максимально доступной форме.

Предназначено студентам, аспирантам и инженерам технических специальностей для освоения методов и инструментов новейшего системного инжиниринга – MBSE.

# 1 Введение в системную инженерию

## 1.1 Теория систем и системный подход.

Вселенная, окружающий нас мир природы даны нам как данность. Российский мыслитель Владимир Вернадский понимал её как ноосфэру (антропосферу, сферу разума) – сферу взаимодействия общества и природы, в границах которой разумная человеческая деятельность становится определяющим фактором развития [22, 23]. Владимир Вернадский – выдающийся ученый, мыслитель и общественный деятель. Создатель научных школ и науки биогеохимии, один из представителей космизма. Учение о биосфере и ноосфере сложилось в результате проведенного Вернадским глубокого анализа всех явлений жизни в их взаимной связи между собой. Концепция биосферы и ноосферы представляет итог всего научного творчества ученого, его мировоззрение. Она служит научным фундаментом в разработке ряда современных глобальных проблем, и прежде всего проблем окружающей человека среды и разумного использования природных богатств биосферы. Т.о. следует изучать взаимоотношения человека и окружающей среды, роль разума в развитии биосферы и концепцию ноосферы как сферы взаимодействия общества и природы.

Справочники иногда сообщают, что понятие «ноосфера» было предложено профессором математики Сорбонны Эдуардом Леруа, который трактовал её как «мыслящую» оболочку, формируемую человеческим сознанием. Э. Леруа подчёркивал, что пришёл к этой идее совместно со своим другом – геологом и католическим философом Пьером Тейяром де Шарденом. При этом Леруа и Шарден основывались на лекциях по геохимии, которые в 1922–1923 годах читал в Сорбонне Владимир Вернадский.

В теории искусственных систем ноосфера понимается как рукотворная часть природного мира – мир, искусственно созданный человеком, рассматривается как дополнение и изменение части Вселенной. Предметом

рассмотрения настоящего пособия являются разнообразные искусственные системы (системы систем), охватывающие обобщённые продукты (ценностные результаты деятельности) и обобщённые предприятия (субъектные системы экономической деятельности, создающие и использующие обобщённые продукты) в составе Ноосферы.

Инжиниринг – творческое применение научных методов и принципов: к проектированию и разработке искусственных объектов, создаваемых человеком: зданий (сооружений), машин, аппаратов, производственных процессов и методов их использования, отдельно или в комбинации, к созданию и эксплуатации, прогнозам поведения всего этого в конкретных условиях(окружении) [2].

Восприятие объектов окружающего мира субъективно и привязано к наблюдателю или к сообществу наблюдателей и пользователей объектов, которых в дальнейшем будем именовать «заинтересованные стороны» (ЗС), т.е. это субъекты, наблюдающие/организующие наблюдение и описывающие объект «извне» и «изнутри». Такой субъект выделяет в окружающем мире предметную область – часть окружающего мира, представляющего для него интерес, которую будем также называть «домен». Объект наблюдения может иметь внешнее представление, внутреннее представление, полное представление.

Объекты, представимые как дробные сущности и одновременно в совокупности, обладающие целостностью, понимаются как системы. Классик системного анализа Л. Бергаланфи понимал, что система – это совокупность элементов, находящихся во взаимодействии. Современное определение системы как целостного множества взаимосвязанных компонентов (элементов) немного отличается от исходного. Система – это представление объекта как целостной совокупности взаимодействующих между собой его компонентов. Это целостное объединение обеспечивает новое качество (эмерджентность): метафорически это так: « $1+1>2$ ». То есть, каждая система обладает некоторой идентифицируемой целостностью и рассматривается как

целостный композитный объект, обладающий свойством эмерджентности – когда целое больше, чем сумма составных частей. Это «больше» формируется связями составных частей.

В ГОСТ Р 57193-2016 «Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла систем.» дается следующее определение: система (system) – это комбинация взаимодействующих элементов, организованных для достижения одной или нескольких поставленных целей. Система может рассматриваться как какой-то продукт или как предоставляемые услуги, обеспечивающие этот продукт. На практике, интерпретация данного термина зачастую уточняется с помощью ассоциативного существительного, например система самолета. В некоторых случаях слово система может заменяться контекстно зависимым синонимом, например самолет, хотя это может впоследствии затруднить восприятие системных принципов.

В нормативной документации Министерства обороны США был определен ряд ключевых понятий, вошедших, с небольшими изменениями, во все последующие нормативно-технические документы по системной инженерии:

1. Система – интегрированная совокупность персонала, продуктов и процессов, обладающая способностью к удовлетворению установленных потребностей или достижению целей.

2. Элемент системы – базовая структурная составляющая, входящая в состав системы и удовлетворяющая одному или нескольким требованиям, связанным с нижележащими уровнями функциональной архитектуры.

3. Ключевые функции – жизненно важные работы, способности или действия, которые должны быть реализованы для того, чтобы система могла гарантированно обеспечить удовлетворение потребностей клиента на протяжении полного жизненного цикла системы.

Более академическое определение принимает, что система (σύστημα «целое, составленное из частей; соединение») – это множество элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, которое образует

определённую целостность, единство. Применение понятия «система» реализует базовый принцип изучения и представления сложных объектов – принцип редукции. Редукция сводит представление сложного объекта к совокупности представления более простых объектов и их связей. С применением редукции удастся последовательно раскладывать и анализировать на доступном уровне сложности системы, недоступные для прямого анализа и моделирования. Редукция позволяет преодолевать барьер сложности в описании объектов.

Можно сказать, что сегодня применительно к искусственным объектам различия между теорией систем, системным анализом, теорией систем из систем и т.д. все больше стираются, и специалисты отчетливо прослеживают тренд на интеграцию как общих, так и прикладных объектно-ориентированных системных методологий в единую методологию искусственных систем.

Компонента системы – это любая ее часть (совокупность элементов), вступающая в определенное отношение с другими ее частями. Подсистема – это такая часть системы, которая сама может быть образована из компонент, и обладает свойством целостности. Подсистему можно рассматривать как меньшую систему в системе более высокого порядка. Понятие элемента соответствует понятию конечного, неделимого. Элемент – это предел членения в рамках данного качества системы. Он не состоит из компонент и представляет собой неделимый элементарный носитель некоторого качества (свойства) системы. Таким образом, исходным для выделения понятия «элемент» является то качество представления системы, для которого ищутся элементарные его носители. Наблюдатель характеризует устройство системы как специального объекта наблюдения посредством:

- присвоения системе имени;
- задания характеристических сущностей системы и их связанностей;
- качественных и количественных характеристик сущностей;
- компонентов системы и их связей;

- связей системы с внешней средой.

Одним из ключевых вопросов теории систем стало рассмотрение систем во взаимосвязи с внешней средой. Как пример, принятие такого подхода сильнейшим образом повлияло на эволюцию способов выбора стратегии деятельности предприятий, где возникло понимание необходимости состыковки внутренней и внешней среды организации. Достаточно напомнить знаменитый метод SWOT-анализа [24]. Это дихотомии по основанию «хорошо-плохо» компонентов внешней и внутренней среды предприятия: Strengths – сильные стороны предприятия; Weaknesses – слабые стороны предприятия; Opportunities – возможности предприятия во внешней среде; Threats – угрозы для предприятия во внешней среде.

Рукотворные объекты рассматриваются как искусственно созданные системы, обладающие ценностью, значимостью для кого-либо, которые также являются ЗС. В этом их кардинальное отличие от природных объектов, возникших и существующих без какого-либо замысла. Предназначение рукотворного, искусственного объекта является основой его целостности. Понятие целостности восходит к Аристотелю, который утверждал, что целое больше суммы составляющих его частей. В современном представлении понятие целостности означает, что свойства системы не выводятся только из свойств ее элементов, и что целое обладает новыми интегративными свойствами, возникающими в результате взаимодействия элементов, и что эти свойства сохраняются в рамках существования системы. Таким образом, понятие целого отражает связи объектов, при наличии которых так или иначе их совокупность может быть выделена как явление нового порядка, способное к сохранению своей качественной определенности при данных условиях.

Если искусственно созданный объект обладает ценностью, значит, есть и замысел создания его ценности. Если есть замысел – есть субъект или субъекты – носители замысла, называемые ЗС, представления о целях деятельности и возможны оценки того, как действовать для воплощения замысла.

Свойство «иметь ценность» – отличительное и универсальное свойство искусственно созданных систем. Наличие присущих всем системам свойств позволяет формировать универсальные представления об искусственных системах и универсальную методологию их создания и применения. В этом контексте для самых разных искусственных объектов предполагаются примерно такие типовые действия: выдвинуть и понять идею – спроектировать объект – создать объект – применить объект – модернизировать или утилизировать объект. Таким образом значительная часть рукотворных объектов – это некие обобщённые продукты – технические системы, программное обеспечение, услуги, сервисы и т.д.

Комплексная деятельность по проектированию, созданию и эксплуатации продуктов в течение их ЖЦ называют системным инжинирингом, а значимые части этой деятельности, детализированные до исполнения элементов и работ – инжинирингом той или иной сферы (ракетно-космическим инжинирингом, строительным инжинирингом, промышленным инжинирингом и т.д.). Если продукты предназначены для экономического обмена, то они понимаются как товар, и с ними работают менеджеры.

Предприятия рассматриваются как субъекты экономической деятельности, создающие и обменивающие ценность в целях получения экономических выгод, измеряемых с использованием стоимостей. Это ещё одна универсальная уже экономическая характеристика систем.

Совокупность свойств искусственной системы, обуславливающих её пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с её предназначением, требованиями, называют качеством. Для обобщенных продуктов – это качество продукта, а для обобщенных предприятий – это качество менеджмента или качество системы деятельности. Наличие характеристик качества также является общим свойством искусственных систем.

Системная инженерия – это междисциплинарный подход и средство, позволяющее реализовать успешные системы. Успешные системы должны

удовлетворять потребности своих клиентов, пользователей и других ЗС (stakeholders). Некоторые ключевые элементы системной инженерии показаны на рисунке 1 и включают в себя:

- Принципы и концепции, характеризующие систему, где система представляет собой взаимодействующую комбинацию элементов системы, которые достигают определенной цели (целей). Система взаимодействует со своей средой, которая может включать в себя другие системы, пользователей и природную среду. Системные элементы, составляющие систему, могут включать аппаратное обеспечение, программное обеспечение, встроенное ПО, людей, информацию, методы, средства, услуги и другие вспомогательные элементы.

- Системный инженер (Systems Engineer) – это человек или должность, поддерживающая этот междисциплинарный подход. В частности, системный инженер часто помогает выявить и преобразовать потребности ЗС в спецификации, которые могут быть реализованы командой разработчиков системы.

- Чтобы помочь реализовать успешные системы, системный инженер поддерживает ряд процессов жизненного цикла, начиная с ранних этапов концептуального проектирования и продолжаясь на протяжении всего жизненного цикла системы через ее производство, развертывание, использование и утилизацию. Системный инженер должен проанализировать, определить, спроектировать и проверить систему, чтобы гарантировать, что ее функциональные, интерфейсные, эксплуатационные, физические и другие качественные характеристики, а также стоимость сбалансированы для удовлетворения потребностей ЗС системы.

- Системный инженер помогает обеспечить совместимость элементов системы для достижения общих целей и, в конечном итоге, удовлетворения потребностей клиентов и других ЗС, которые будут приобретать и использовать систему.

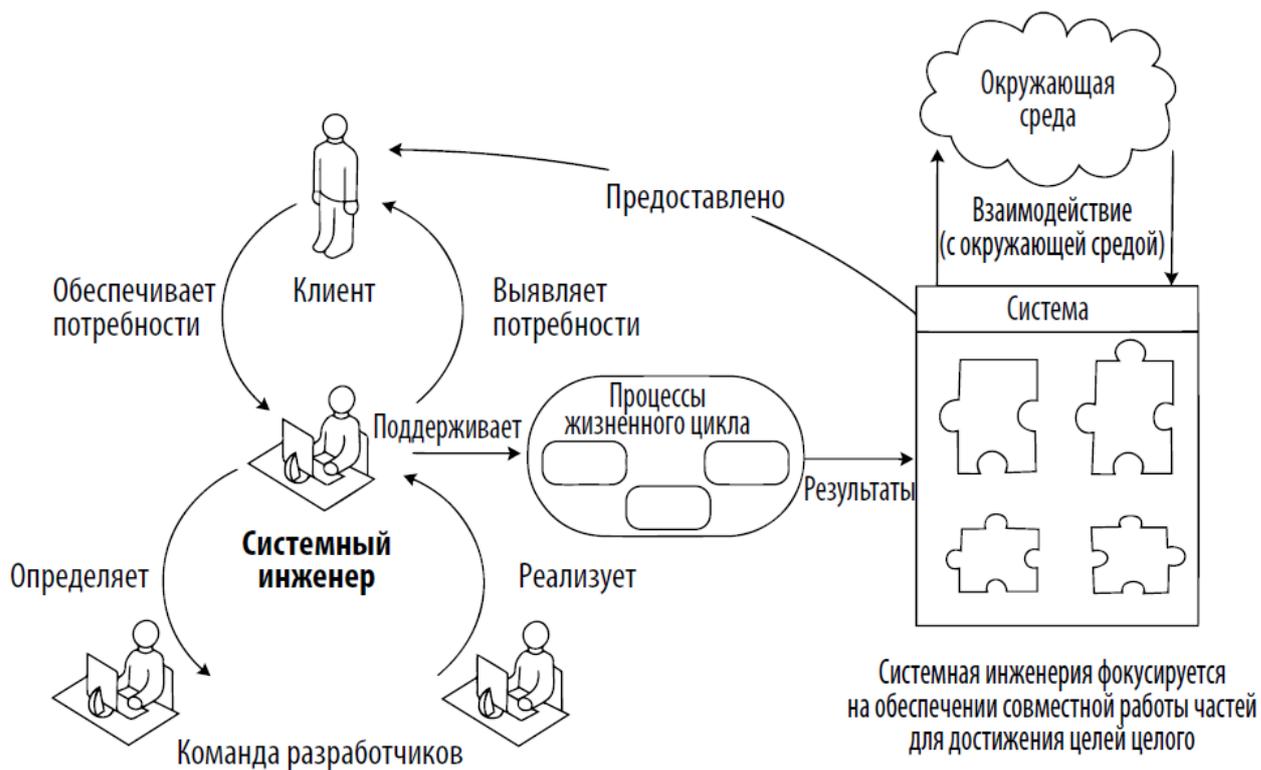


Рис.1 – Ключевые элементы системной инженерии.

Итак, роль системного инженера заключается в определении системных требований, ограничений, распределении полномочий, поведения исполнителей и структурных характеристик системы для удовлетворения потребностей клиентов – ЗС.

Инженерная система – это техническая или социотехническая система, являющаяся субъектом ЖЦ системной инженерии (System engineering – SE). Это система, спроектированная или адаптированная для взаимодействия с ожидаемой эксплуатационной средой для достижения одной или нескольких намеченных целей при соблюдении применимых ограничений. Поскольку областью SE являются инженерные системы, большая часть литературы по SE предполагает это в своей терминологии. Таким образом, при обсуждении SE «архитектура системы» будет относиться к архитектуре проектируемой системы (например, космического корабля), а не к архитектуре природной системы за ее пределами (например, Солнечной системы). Фактически, архитектура космического корабля будет охватывать более широкий

системный контекст, включая внешние факторы, такие как изменения силы тяжести и внешнего давления воздуха, а также то, как они влияют на технические и человеческие элементы космического корабля. Таким образом, термин «архитектура системы» более правильно относится к контексту спроектированной системы.

SE включает в себя не все, что связано с проектированием и управлением инженерной системой. Деятельность может быть частью среды SE, но, за исключением конкретного управления функцией SE, не считается частью SE. Примеры включают построение систем, производство, финансирование и общее управление. Это отражено в определении системной инженерии Международного совета по системной инженерии (INCOSE) как «междисциплинарный и интегративный подход, обеспечивающий успешную реализацию, использование и вывод из эксплуатации инженерных систем, используя системные принципы и концепции, а также научные, технологические и управленческие методы». Хотя SE может обеспечивать возможность реализации успешной системы, если деятельность, выходящая за рамки SE, например производство, плохо управляется и выполняется, SE не может гарантировать успешную реализацию.

Диаграмма Венна предоставляет удобный способ определить сферу применения SE в области проектирования и управления. На рисунке 2 показана взаимосвязь между SE, внедрением системы и управлением проектом/системой.

Рисунок 2 отражает, что такие действия, как анализ альтернативных методов производства, тестирования и эксплуатации, являются частью функций планирования и анализа SE. Такие виды деятельности, как заказ и установка оборудования производственной линии, а также его использование в производстве, несмотря на то, что они по-прежнему важны для окружающей среды SE, находятся за пределами SE. Обратите внимание, что, как показано на рисунке 2, проектирование внедрения системы также включает в себя

аспекты реализации системы, связанные с производством программного обеспечения (ПО). Таким образом, разработка ПО не считается подвидом SE.



**Рис. 2** – Взаимосвязь трех дисциплин - Системной инженерии, реализации систем (system implementation), и Управления проектами/системами (project/systems management)

Итак, повторим, системная инженерия (SE) – это междисциплинарный и интегрированный подход, обеспечивающий успешную реализацию, использование и вывод из эксплуатации инженерных систем с использованием системных принципов и концепций, а также научных, технологических и управленческих методов.

Предметная область, объекты предметной области – это выделенные части окружающего мира, представляющие интерес для наблюдателя. Выделение предметной области, исследование объектов, разработка целевых

систем – один из ключевых методов представления, изучения и преобразования окружающего мира.

Предметная область (домен) SE характеризуется:

- составом идентифицируемых и учитываемых объектов;
- связями объектов;
- учитываемыми характеристическими сущностями объектов;
- качественными характеристиками объектов и характеризующих их сущностей;
- количественными характеристиками объектов и сущностей;
- учитываемыми связями между объектами, сущностями, качественными и количественными характеристиками предметной области.

Системы характеризуются:

- составом компонентов;
- целостностью;
- учитываемым представлением внешней среды;
- связями компонентов между собой и с внешней средой;
- характеристическими сущностями компонентов и внешней среды;
- качественными характеристиками компонентов и внешней среды;
- количественными характеристиками компонентов и внешней среды;
- учитываемыми связями между учитываемыми компонентами, сущностями, качественными и количественными характеристиками, учитываемыми связями с другими объектами предметной области.

## 1.2 Методы и инструменты инжиниринга искусственных систем

Эволюцию методов и инструментов инжиниринга искусственных систем может быть упорядочена по принципу вложенности (матрёшки) – последующие представления опираются и используют предыдущие.

**Инжиниринг/Engineering**, – это совокупность прикладных приёмов по созданию и применению новых продуктов (технических изделий, организационно-технических систем) в отраслях (предметных областях). Как

сфера экономической деятельности возник в Великобритании около 190 лет назад, когда впервые стали продаваться услуги инженеров (вначале единоличных, а затем и групп инженеров, объединенных в инженерные компании). Инжиниринг сфокусирован на:

- на устройстве продукта – какое предназначение и из чего состоит продукт;
- процессах создания и применения продукта – каковы процессы ЖЦ продукта.

SE обеспечивает гармонизированные обобщённые правила и приемы инжиниринга разных предметных областей. Искусственные системы обладают специфическими, отличающими их от природных систем характеристиками, такими как ценность/предназначение, стоимость, качество (соответствие требованиям) и др. Некоторые такие системы обладают даже искусственным интеллектом. Наличие общих свойств позволяет формировать единую теорию искусственных систем. В мировой практике наблюдается тренд к консолидации разнообразных системно-ориентированных научных и инжиниринговых методологий анализа, синтеза, создания и применения искусственных систем, таких как теория систем, системный анализ, методы прикладного моделирования, прикладные теории систем разного типа.

Общие методы и инструменты выделения, исследования, создания и применения искусственных систем – предмет рассмотрения теории искусственных систем применительно к таким объектам, как продукты, предприятия и их разнообразным композициям. Первое известное использование термина «системная инженерия» было в марте 1950 года в презентации Лондонскому королевскому обществу Мервином Дж. Келли, тогдашним исполнительным вице-президентом Bell Telephone Laboratories. Стенограмма презентации Келли под названием «Телефонные лаборатории Bell – пример института творческих технологий» была опубликована в журнале Proceedings of the Royal Society позже в том же году. В нем Келли обсуждал прогресс Bell Labs за первую половину двадцатого века. Он заявил,

что организация «выросла в размерах и повзрослела по масштабам и характеру своей работы в период быстрого расширения исследований в области физических наук». Далее он описал организацию их работы. Первой организационной рубрикой были «Исследования и фундаментальные разработки». Вторым был «Системный инжиниринг», имеющий тот же уровень важности, что и отделы исследований и разработок. Келли описал ответственность организации системного проектирования как «...определение проектов развития новых конкретных систем и объектов – их эксплуатационных и экономических целей и общего технического плана, которому необходимо следовать».

Артур Холл, который также работал в Bell Telephone Laboratories, в 1962 году читал один из первых курсов системной инженерии в Массачусетском технологическом институте. В своей книге «Методология системной инженерии» (1962) Холл выделил пять черт идеального системного инженера:

1. близость к системам
2. способность к рассуждениям
3. креативность
4. легкость в человеческих отношениях
5. возможность самовыражения

Он также писал: «Системная инженерия наиболее эффективно рассматривается как процесс, который начинается с обнаружения проблемы и продолжается через определение проблемы, планирование и проектирование системы, производства или другого раздела реализации, ее использования и, наконец, до ее завершения». Более того, системная инженерия – это не только вопрос инструментов, это тщательная координация процесса, инструментов и людей».

Национальный совет по системной инженерии (NCOSE) возник из-за потребности в формально подготовленных системных инженерах в США. Встречи представителей промышленности и научных кругов начались в 1989 году и продолжались до 1991 года. В состав группы вошли представители

промышленности и Министерства обороны США, TRW, Lockheed, Martin Marietta, MacDonnell Douglas, Aerospace Corp, Bechtel, TI, Boeing, Unisys, IBM и многих других. В 1989 году Брайан Мар возглавил создание Международного совета по системной инженерии и признан отцом INCOSE. В 1995 году был опубликован «Справочник по системному проектированию НАСА» (NASA/SP-6105), призванный донести фундаментальные концепции и методы системного проектирования до персонала Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА). Наконец, версия 1 INCOSE Справочник по системному проектированию впервые появился в 1997 году.

В настоящее время INCOSE рассматривает актуальные проблемы, и на основе этого дает обзор вероятной природы систем будущего [1, 6, 20]. Это формирует контекст, в котором будет применяться SE, и дает отправную точку для рассмотрения того, как должна будет развиваться SE.

Будущие системы должны будут реагировать на постоянно растущий и разнообразный спектр социальных потребностей, чтобы создавать ценность. ЖЦ отдельных инженерных систем, возможно, по-прежнему должны отвечать определенным потребностям ЗС, а также ограничениям времени и затрат клиента. Однако они также станут частью более масштабного синхронизированного ответа на стратегические цели предприятия и/или социальные проблемы. ЖЦ систем должны быть приведены в соответствие с глобальными тенденциями в промышленности, экономике и обществе, что, в свою очередь, будет влиять на потребности и ожидания системы.

Будущие системы должны будут использовать постоянно растущий объем технологических инноваций, одновременно защищая от непредвиденных последствий. Чтобы удовлетворить потребности ЗС, продукты и услуги инженерных систем должны стать более интеллектуальными, самоорганизующимися, устойчивыми, ресурсо-эффективными, надежными и безопасными. Эти будущие системы должны будут разрабатываться развивающейся и разнообразной рабочей силой,

которая, обладая все более совершенными инструментами, сможет внедрять инновации и реагировать на давление конкуренции.

Существующие вызовы меняют роль программного обеспечения (ПО) и людей в инженерных системах. Область знаний «Системная инженерия и программная инженерия» рассматривает возрастающую роль ПО в инженерных системах и его влияние на SE. В частности, учитывается растущая важность киберфизических систем, в которых технологии, ПО и люди играют одинаково важную роль в принятии инженерных системных решений. Это требует подхода SE, способного понять влияние различных типов технологий, и особенно ограничений и возможностей ПО и человеческого фактора, на все аспекты ЖЦ инженерной системы. Все эти проблемы и ответы SE на них делают еще более важным продолжение перехода SE к дисциплине, основанной на моделях.

Традиционный инжиниринг в основном ориентирован на компоненты и является «нейтральным» по своему интеллектуальному содержанию. Основные законы и уравнения, такие как закон Ома, закон Гука, законы Ньютона, уравнения Максвелла, уравнения Навье-Стокса, сборники алгоритмов сортировки и поиска Кнута и закон человеческого движения Фиттса, относятся к описанию процессов и явлений. Эти законы не рассматривают вопросы, связанные тем, процессы и явления способствует реализации ценностных ожиданий ЗС.

Напротив, SE является более целостным, чем ориентированным на компоненты подходом. SE ориентирован на ценности ЗС и на производственную деятельность в своем интеллектуальном содержании. Реализация успешных систем требует обсуждения с ЗС относительной ценности альтернативных реализаций, а также организации компонентов и людей в систему, которая удовлетворяет часто противоречивым ценностным ожиданиям ЗС. К ЗС, которые имеют решающее значение для успеха системы, относятся спонсоры, владельцы активов, пользователи, операторы,

специалисты по обслуживанию, производители, а также органы регулирования безопасности и загрязнения.

Инженерные дисциплины, переплетающиеся с SE, включают разработку ПО (SwE), учет человеческого фактора и промышленную инженерию. SwE и SE – это не просто родственные дисциплины, они тесно переплетены. Большая часть функциональности коммерческих и государственных систем сейчас реализована в ПО, а ПО играет заметную или доминирующую роль в дифференциации конкурирующих систем на рынке. ПО обычно занимает видное место в современных системных архитектурах и часто является «клеем» для интеграции сложных системных компонентов.

SE также тесно переплетается с двумя нетехническими дисциплинами: техническим менеджментом и закупками, поэтому закупки часто входят в компетенцию системного инженера. Специалисты по закупкам используют SE для определения объема и общих требований к закупаемой системе. Затем они готовят запросы на предложения и описания работ, определяют критерии оценки и разрабатывают процессы выбора поставщиков. После того, как ведущий поставщик выбран, они принимают решение о вариантах заключения контракта, которые включают платежи, проверки, аудиты, поощрительные выплаты, критерии приемки, процедуры и характер результатов. Наконец, они отслеживают ход выполнения планов (в том числе планов по SE), а также согласовывают и выполняют изменения и корректирующие действия. Многие из этих видов деятельности представляют собой специальные дисциплины в области закупок.

Согласно современным словарям и справочникам, целевой системой (System-of-Interest, SoI) называют систему которая представляет интерес для ЗС интерес – это объект их внимания и рассмотрения.

Как уже указывалось, искусственные системы обычно являются результатом деятельности человека и противопоставляются естественным (природным системам). Результатом функционирования искусственных систем являются обобщённые продукты, представляющие собой ценностные

результаты деятельности. Также искусственными системами являются и обобщённые предприятия – субъектные системы экономической деятельности, создающие и использующие обобщённые продукты в составе ноосферы. Искусственные системы обладают специфическими, отличающими их от природных систем характеристиками, такими как ценность/предназначение, стоимость, качество (соответствие требованиям) и др. Некоторые такие системы обладают даже искусственным интеллектом. Наличие общих свойств позволяет формировать единую теорию искусственных систем. Искусственные системы обладают целостностью, ценностью, стоимостью, качеством, конкурентоспособностью. Искусственные системы проходят свои ЖЦ (разработка, применение, модернизация или утилизация) и являются целевыми системами для специфических заинтересованных сторон.

Физическая система – это такое множество взаимосвязанных элементов, отделённых от окружающей среды, что взаимодействуют с ней, как целое. Взаимодействие физической системы с окружением, а также связь между отдельными составляющими физической системы реализуется с помощью фундаментальных физических взаимодействий (гравитация, электромагнитное взаимодействие, сильное взаимодействие, слабое взаимодействие) или взаимодействий, которые сводятся к фундаментальным (трение, упругость, вес и др.). Выделение конкретной физической системы из окружения зависит от конкретных прикладных целей.

Киберфизическая система (Cyber-Physical System, CFS) представляет собой систему, включающую интеграцию с физическими сущностями и целевыми объектами любого вида киберсущностей, обеспечивающих сбор и обработку данных о целевых объектах, моделирование, доведение до целевых объектов сформированной информации и воздействий.

В общем случае предметная область SE может включать целевые физические и киберфизические системы разной направленности – технические, экономические, управленческие, инфраструктурные и т.д.

Вселенная, окружающий мир, природа и её законы являются для человека данностью и учитываются как «объективно существующие» возможности и ограничения. Человек погружен в окружающий его мир, по шагам его познаёт, расширяет понимание его устройства и законов его существования.

Наряду с этим человек создает через деятельность в окружающем мире ещё один – искусственный, рукотворный мир. В каждый момент времени искусственный мир, создаваемый человеком, имеет некие предельные границы, погружен в окружающий мир и становится, по мере создания, его частью. Рукотворный мир создаётся человеком целенаправленно при учёте существующих возможностей и ограничений. Накопление практик и познание способов деятельности человека позволяет выявить устойчивые закономерности того, как устроены рукотворные объекты и как устроена деятельность по их созданию и применению.

Методология SE направлена на формирование структурированных представлений об устройстве и результатах деятельности – предприятиях и продуктах как искусственно созданных объектов, о прикладных методах и инструментах их создания и применения. Под инжинирингом иногда понимают деятельность по моделированию, проектированию, созданию, применению и модернизации искусственных объектов. SE упорядоченно рассматривает ЖЦ искусственных объектов – от момента возникновения идей новых объектов до их создания, применения и утилизации в составе цикла – исследование, проектирование, создание, применение. Предметом рассмотрения SE являются содержательные формы существования рукотворного объекта и процессы, приводящие к трансформации его состояний на протяжении ЖЦ [21, 25].

Первоначально подход SE применялся к обобщённым продуктам и услугам, техническим и информационным системам, затем стали переноситься и на обобщенные предприятия. Ключевой особенностью обобщенных продуктов является то, что последовательно реализуемые

состояния их ЖЦ осуществляются постольку, поскольку результаты процессов представляют для кого-либо ценность. Наличие у продуктов предназначения и субъектных создателей, понимаемых как обобщенные предприятия, выделяет их из природных систем, придаёт им целостность по предназначению, позволяет выстроить унифицированную методологию их создания и применения как рукотворных систем.

Предприятия тоже являются рукотворными объектами. Их особенностью является то, что они включают человека и проявляют субъектность при ведении деятельности. Такие системы еще называют активными системами. Предназначение предприятий в существующих правовых, экономических и других условиях деятельности состоит в создании, обусловленных их предназначением, ценности и стоимости, организации и исполнении для этого необходимых процессов деятельности. Субъектные участники деятельности в составе обобщённых предприятий – само предприятие, его подразделения и сотрудники – ориентируются на исполнение установленных для предприятия требований и целей.

ЗС могут иметь разные позиции, интересы и представления об искусственном объекте, идентифицируют и устанавливают требования на разных этапах жизненного цикла продуктов. Для задания ценности искусственных объектов применяются такие характеристики, как метрики, меры, шкалы, показатели оценки ценности. При учете экономической перспективы оценки ценности объектов дополняются стоимостными характеристиками – метриками и мерами, шкалами и показателями оценки стоимости. Таким образом, в первом приближении оценки результатов деятельности предприятий представляются в форме ценностных и стоимостных качественных и количественных показателей и показывают степень соответствия заданным требованиям в части:

- результативности – степени достижения намеченных целей, результатов;
- эффективности – сопоставления результатов и затрат на их получение;

- качества – степени достижения требований, предъявляемых к искусственному объекту.

Термин «системная практика» относится ко всем интеллектуальным и практическим усилиям по созданию целостных решений сегодняшних сложных системных проблем. Практика определяется как «преобразование идеи в действие» и предполагает, что лучший целостный подход к данной сложной задаче может потребовать интеграции соответствующей теории и соответствующей практики из широкого спектра источников. Системная практика требует совместной работы многих сообществ. Чтобы работать вместе, мы должны сначала общаться; и чтобы общаться, мы должны сначала соединиться.

INCOSE разработала структуру системной практики. Системное мышление является основным интегративным элементом структуры. Оно связывает основы, теории и представления системной науки вместе с жестким, мягким и прагматичным подходами системной практики. В системной практике, как и в любой практической дисциплине, опирающейся на науку, существует постоянное взаимодействие между теориями и практикой: теория информирует практику, а результаты практики информируют теорию. Системное мышление – это постоянная деятельность по оценке системного контекста и управлению соответствующей адаптацией на протяжении всего цикла практики [6].

Интегрированная системная наука имеет очень широкую сферу применения и сгруппирован в три обширные области:

- Теоретическая база (основания), которые помогают систематизировать знания и способствуют обучению и открытиям. В это направление входят: метатеории, методологии, онтология, эпистемология (философско-методологическая дисциплина, в которой исследуется научное знание, его строение, структура, функционирование и развитие), аксиология (философская дисциплина, исследующая категорию ценностей как смыслообразующих оснований человеческого бытия, задающих

направленность и мотивированность человеческой жизни), праксиология (теория эффективного действия), телеология (онтологическое объяснение развития в мире с помощью конечных, целевых причин), семиотика (или семиология – общая теория, исследующая свойства знаков и знаковых систем, наука о коммуникативных системах и знаках, используемых в процессе общения) и семиозис (процесс порождения и функционирования знаков), теория категорий (раздел математики, изучающий свойства отношений между математическими объектами, не зависящие от внутренней структуры объектов) и др.

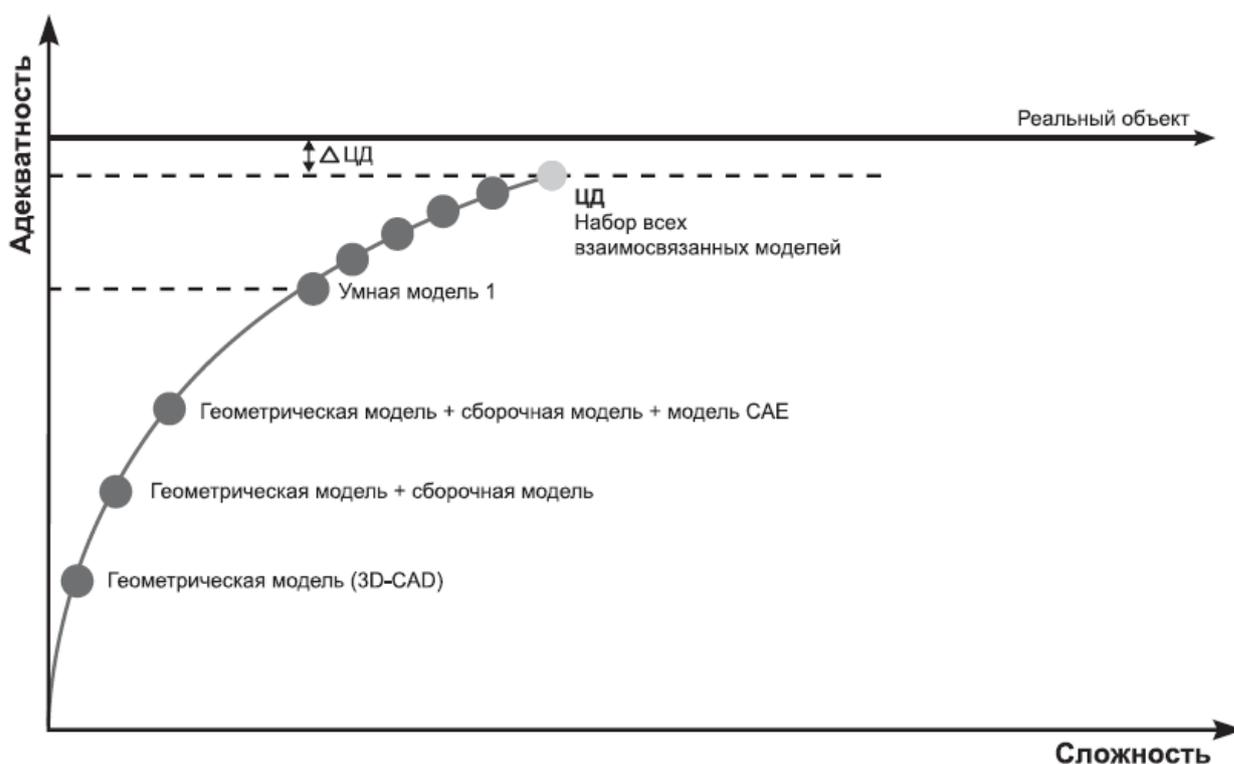
- Теории, относящиеся к системам, которые абстрагируются от областей и специальностей, чтобы быть универсально применимыми: общая теория систем, системная патология, сложность, опережающие системы, кибернетика, аутопоэзис (самопостроение, самовоспроизводство, репликацию живых существ, в том числе человека, которые отличаются тем, что их организация порождает в качестве продукта их самих без разделения на производителя и продукт), живые системы, наука об общем дизайне, теория организации и т.д.

Набор представления и соответствующие теории описывают, исследуют, анализируют и делают прогнозы относительно систем и их более широких контекстов, будь то с точки зрения моделей, динамики, сетей, клеточных автоматов, жизненных циклов, очередей, графов, насыщенных изображений, повествований, игр, мультиагентного моделирования и т.д.

Цифровая инженерия — это фундаментальное изменение в том, как люди работают и действуют.

Компьютерный инжиниринг – это область инженерии, которая занимается разработкой, созданием и управлением компьютерными системами и приложениями, включая в первую очередь моделирование процессов и явлений. Он также включает в себя создание операционных систем, разработку программного обеспечения, создание и развёртывание баз данных, проектирование и управление компьютерными сетями, а также

создание компьютерных чипов и другой электронной продукции. При этом чем более совершенными являются средства математического моделирования, чем более комплексно удастся подойти к описанию задачи, тем более точную модель удастся получить. Это соображение наглядно иллюстрирует рисунок, который в своих лекциях приводит профессор А. И. Боровков [26].



**Рис. 3.** – Этапы формирования цифровой модели, лежащей в основе Цифрового двойника (ЦД). Источник: лекция проф. А.И. Боровкова

Модели искусственных систем в машиностроении проходят в своем развитии несколько этапов: геометрическая модель, геометрическая плюс сборочная, затем добавляется модель инженерного анализа CAE, на определенном этапе формируются так называемые «умные математические модели», обладающие высоким уровнем адекватности реальному материалу, объекту или процессу. Согласно определению, А.И. Боровкова «умные» модели агрегируют в себе все знания, которые применяются при проектировании, производстве и эксплуатации изделия/продукта/конструкции/машины/установки/технической или

киберфизической системы. Для создания «умных» математических моделей необходимы ключевые компетенции разработчиков; кастомизация (способность оперативно реагировать на запросы заказчика и менять облик и состав систем под эти запросы); системный инжиниринг (способность держать в поле зрения всю систему и все ее взаимодействующие компоненты); многоуровневая матрица целевых показателей и ресурсных ограничений, содержащая десятки тысяч целевых показателей и требований, предъявляемых к продукту (временных, финансовых, технологических, производственных и т. д.); валидация «умных» моделей, обеспечивающая описание с высоким уровнем точности результатов физических и натуральных испытаний, и специализированный бизнес-процесс – «цифровая сертификация», которая направлена на обеспечение прохождения с первого раза всего комплекса натуральных, сертификационных, рейтинговых и прочих испытаний. При этом профессор А. И. Боровков выделяет два типа цифровых двойников – цифровые двойники объекта/продукта (Digital Twin, DT-1) и цифровые двойники производства (Digital Twin, DT-2), которые в основе своей имеют «умную» модель, учитывающую особенности конкретного производства.

Согласно ГОСТ Р 57700.37-2021, цифровой двойник изделия (ЦД) это система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями. При этом цифровой двойник разрабатывается и применяется на всех стадиях ЖЦ изделия. При создании и применении цифрового двойника изделия участникам процессов ЖЦ (по ГОСТ Р 56135) рекомендуется применять программно-технологическую платформу цифровых двойников.

### 1.3 Принципы системной инженерии

В общем случае, «принцип» – это фундаментальная идея или правило, которое может служить руководством для принятия решения или совершения

действия. Принципы могут принимать форму предписаний, убеждений, концепций, предположений или идей. Принципы могут варьироваться от полностью эвристических (выведенных из опыта, интуиции, убеждений или соглашений) до полностью научных (выведенных из научных теорий или моделей). Принципы встречаются в каждой сфере человеческой деятельности, поэтому у нас есть, например, принципы, относящиеся к этике, эстетике, экономике, политике, науке, технике, сельскому хозяйству и т. д.

Т.е. каждая дисциплина имеет набор основополагающих принципов, которые фундаментально ее характеризуют. Знания и практика дисциплины явно или неявно вытекают из ее принципов. Например, один из принципов физики заключается в том, что скорость света постоянна. Этот конкретный принцип был подтвержден бесчисленное количество раз на практике и широко признан как принцип работы Вселенной. Один общий экономический принцип заключается в том, что «Каждый выбор имеет альтернативную стоимость». Другой принцип – принцип предложения, который гласит: «Количество поставляемого товара увеличивается по мере роста рыночной цены и падает по мере падения цены». Как правило, дисциплины не имеют одного авторитетного полного набора принципов. Разные авторы подчеркивают разные аспекты дисциплины в принципах, которые они определяют и объясняют. По мере развития областей появляются новые принципы, а старые принципы могут измениться. Например, теория относительности Эйнштейна показала, что принципы, лежащие в основе ньютоновской физики, не совсем верны. Тем не менее, большую часть времени они по-прежнему чрезвычайно ценны.

Появление набора принципов системной инженерии произошло за последние 30 лет в рамках этой дисциплины. Развитие этих принципов происходит из многих источников, включая эвристику, системную инженерию, эвристику (т. е. основанную на опыте), социологию, физические науки и математику. Группа действий по принципам системной инженерии INCOSE (SEPAT) рассмотрела различные источники системных принципов и

принципов системной инженерии, выявленных в литературе за этот период. Благодаря систематическому исследованию специалистами рабочей группы INCOSE по принципам системной инженерии, удалось сформулировать набор из 15 принципов и 3 гипотез, изложенных в публикации [15].

**ПРИНЦИП 1:** SE в приложении специфична для потребностей ЗС, пространства решений, итоговых системных решений и контекста на протяжении всего жизненного цикла системы.

Это первое и основополагающее утверждение SE. Рассматриваемая сложная техническая система и среда ее функционирования определяют конкретные реализации подходов SE. Требуется балансировка физических моделей, логики, а также социальных и когнитивных отношений (контекста), которые являются основополагающими для конкретной системы. Существенным для этого является понимание миссии или использования рассматриваемой системы, сформулированных в виде целей. Этот принцип фиксирует, что любое применение SE учитывает конкретные потребности пользователя/заказчика системы и организационные характеристики при разработке или эксплуатации. Методы SE будут и должны различаться по акценту и применению в зависимости от характера рассматриваемой системы, его физической среды приложения и его контекста.

**ПРИНЦИП 2:** SE имеет целостное системное представление, которое включает элементы системы и их взаимодействия между собой, обеспечивающие функционирование системы и системную среду.

В физическом, логическом и структурном смысле система не является единым механическим, электрическим или химическим объектом (например, это не отдельный стержень, проволока или химическое вещество); он охватывает набор взаимодействующих сходных (например, механических) или разнородных (например, механических, электрических, химических) элементов или подсистем, обеспечивающих возможности, недоступные по отдельности. Системный инженер ориентируется на взаимодействие этих подсистем не как инженер-конструктор, сосредоточенный на деталях, а как

компетентный интегратор. Взаимодействия компонентов системы, происходящие одновременно при эксплуатации системы, составляют основу архитектуры логической системы. Эти системные взаимодействия, в том числе взаимодействия с системной средой, могут влиять на проектирование так же сильно, как и сами функции подсистемы, и в сочетании могут потенциально создавать неожиданные реакции системы. Системный инженер должен понимать и управлять этими реакциями в контексте всей системы, а не только в контексте компонентов.

ПРИНЦИП 3: SE влияет и находится под влиянием внутренних и внешних ресурсов, политических, экономических, социальных, технологических, экологических и правовых факторов.

ПРИНЦИП 4: И политика, и закон должны быть правильно поняты, чтобы не ограничивать чрезмерно или недостаточно внедрение системы.

ПРИНЦИП 5: Реальная система является совершенным представлением системы.

Этот принцип представляет собой формулировку идеи, давно поддерживаемой разработчиками статистического моделирования. Модели представляют различные аспекты системы, но единственным полным или совершенным представлением системы является сама система. Это особенно верно для кибер-физических систем [27, 28] и других недетерминированных систем, где подходы к моделированию недетерминированных системных реакций четко не определены. При моделировании системы модель системы состоит из нескольких моделей процессов и явлений, характерных для этой системы, и каждая модель является приближением к реальности.

ПРИНЦИП 6: В центре внимания SE находится все более глубокое понимание взаимодействий, чувствительности и поведения системы, потребностей ЗС и среды функционирования системы.

Системные инженеры вырабатывают требования по мере разработки системы. Таким образом, по мере того как системные инженеры определяют требования миссии (часть понимания контекста миссии) с начала разработки,

они постепенно дополняют и определяют системные требования. Требования являются функцией выбора проектного решения, сделанного и осознанного постепенно на протяжении фазы ЖЦ – разработки. Это также относится к стоимости и срокам, особенно для новых систем, где разработка или эксплуатация приводят к неожиданным изменениям. Точно так же системные инженеры разрабатывают модели для прогнозирования возможностей системы, а затем совершенствуют эти модели по мере получения опыта тестирования и эксплуатации. Системные модели становятся более точными по мере продвижения проектирования, и системный инженер должен управлять взаимодействием между зрелостью проекта подсистемы и зрелостью модели системы в целом. Эти системные модели становятся основой системных операций [29]. Если системные инженеры не поддерживают системную основу, то может быть утрачено понимание того, почему были определены определенные процедуры или спецификации.

Подпринцип 6(a): Контекст миссии определяется на основе понимания потребностей и ограничений ЗС.

Подпринцип 6(b): Требования и модели отражают понимание системы.

Подпринцип 6(c): Требования – это конкретные, согласованные предпочтения внутри развивающейся организации.

Подпринцип 6(d): Требования и дизайн системы постепенно уточняются по ходу разработки.

Подпринцип 6(e): Моделирование систем должно учитывать системные взаимодействия и связи.

Подпринцип 6(f): SE достигает понимания всех системных функций и взаимодействий в операционной среде.

Подпринцип 6(g): SE позволяет понять ценность системы для ЗС.

Подпринцип 6(h): Понимание системы ухудшается во время эксплуатации, если понимание системы не поддерживается.

ПРИНЦИП 7: SE учитывает изменяющиеся потребности ЗС в течение ЖЦ системы.

ПРИНЦИП 8: SE удовлетворяет потребности ЗС с учетом бюджета, ресурсов и технических потребностей, а также других ожиданий и ограничений.

Подпринцип 8(a): SE ищет наилучший баланс функций и взаимодействий в рамках системного бюджета, расписания, технических и других ожиданий и ограничений.

ПРИНЦИП 9: Решения по системному проектированию принимаются в условиях неопределенности с учетом риска.

ПРИНЦИП 10: Качество решений зависит от знаний о системе и взаимодействующих подсистемах, присутствующих в процессе принятия решений.

ПРИНЦИП 11: SE охватывает весь ЖЦ системы.

SE применяется не только на этапе разработки, но также и на остальных этапах ЖЦ, включая эксплуатацию и вывод из эксплуатации. Организационные отношения и цели меняются по мере того, как система проходит через фазы ЖЦ, но SE продолжает интегрировать системные функции и системные дисциплины на всех этапах ЖЦ системы. Т.е. по мере того, как система проходит свой ЖЦ, потребности в SE меняются.

Подпринцип 11(a): SE поддерживает понимание системы.

Подпринцип 11(b): SE определяет контекст миссии (системное приложение).

Подпринцип 11(c): SE моделирует систему.

SE разрабатывает и поддерживает модели системного уровня, чтобы помочь в проектировании и анализе системы, а также обеспечить необходимую системную основу для планов и процедур эксплуатации и обслуживания.

Подпринцип 11(d): SE проектирует и анализирует систему.

Подпринцип 11(e): SE тестирует систему.

Подпринцип 11(f): SE поддерживает производство системы.

Подпринцип 11(g): SE поддерживает эксплуатацию, техническое обслуживание и вывод из эксплуатации.

ПРИНЦИП 12: Сложные системы проектируются сложными организациями.

Сложность заключается не только в системе, но и в организации (организациях), разрабатывающей и эксплуатирующей сложные системы. Таким образом, системные инженеры должны иметь дело как со сложностью системы, так и со сложностью организации разработки и эксплуатации.

ПРИНЦИП 13: SE эффективно объединяет инженерные и научные дисциплины.

Дисциплина SE является отдельной инженерной дисциплиной, но также зависит от других инженерных, научных и социальных дисциплин. SE стремится интегрировать и объединить эти другие дисциплины выразительным и понятным образом, чтобы создать адекватное представление системы на протяжении всего ее ЖЦ. Взаимодействие дисциплин находится в центре внимания SE. Целью является базовое понимание каждой дисциплины с подробным пониманием их взаимодействия. Это включает в себя различные аспекты организационной интеграции. Системный инженер должен осознавать организационные и социологические факторы, влияющие на разработку и эксплуатацию системы. Системный инженер должен также «спроектировать» эти отношения.

ПРИНЦИП 14: SE отвечает за управление взаимодействием дисциплин внутри организации.

Системные инженеры несут ответственность за понимание того, как организационная структура и культура влияют на поток информации о системе. Системный инженер обеспечивает надлежащее взаимодействие между инженерными дисциплинами, поскольку они отвечают за определенные функции системы. Точно так же на этапе эксплуатации дисциплины должны работать вместе, чтобы обеспечить согласованную и предсказуемую работу и техническое обслуживание системы. Создание схемы

соответствующего информационного потока помогает понять, как этот поток происходит внутри организации. При выявлении трудностей системный инженер должен обсудить с руководством проекта и организационным (линейным) руководством потенциальные изменения для улучшения. В некоторых сложных ситуациях может помочь корректировка процессов системного проектирования. Некоторые улучшения/изменения могут потребовать организационных изменений со стороны руководителя проекта или линейного руководства. Однако, эти изменения могут решить одну проблему и способствовать появлению других в сложных организациях. Системный инженер должен оценивать каждое изменение и стремиться к наилучшему балансу применения процессов системной инженерии с проектными и линейными организационными структурами.

**ПРИНЦИП 15:** SE основана на наборе теорий среднего уровня.

Существует много типов систем, которые просто классифицируются как физические системы, логические системы, социальные системы или их комбинации. Поскольку нет ни единой теории физики, ни единой теории логики, ни единой теории социологии, то нет и единой теории SE. Вместо этого SE исходит из набора теорий среднего уровня, которые составляют основу системы и инженерии системы. Набор теорий среднего уровня обеспечивает системному инженеру полную основу для понимания системы. Приложение будет специфичным для каждой системы (теории, необходимые для кибер-физических систем, сильно отличаются от тех, что необходимы для постройки корабля). Эта структура учитывает эти различия и позволяет системному инженеру включать теории, необходимые для понимания как системы, так и организации, разрабатывающей или эксплуатирующей систему. Системному инженеру не нужны специальные знания для разработки каждого компонента системы; системный инженер является экспертом в том, как интегрировать эти компоненты в предполагаемую систему. Это требует широкого понимания нескольких дисциплин, а не глубокого понимания только одной. Системный инженер должен четко общаться между

инженерными дисциплинами, для инженера-оптика это частота падающего света, а для инженера-механика, работающего с той же системой, это означает угловую скорость вращения компонента. Системные инженеры должны переводить терминологию, а не пытаться навязать общность между инженерными дисциплинами.

ПОДПРИНЦИП 15(a): SE имеет основу в теории систем [30].

ПОДПРИНЦИП 15(b): SE имеет физическую/логическую основу, специфичную для системы.

ПОДПРИНЦИП 15(c): SE имеет математическую основу.

ПОДПРИНЦИП 15(d): SE имеет социологическую основу, специфичную для организации.

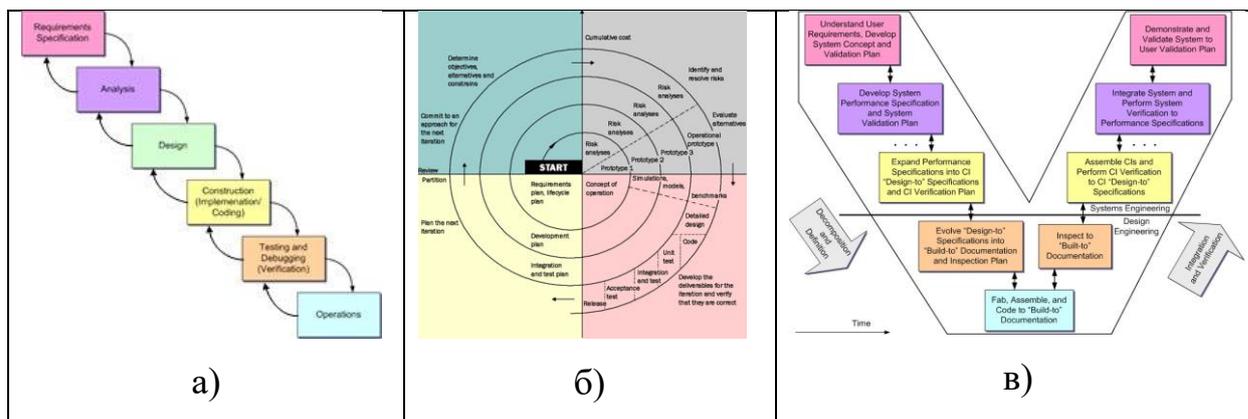
Принципы SE представляют собой форму руководящих предложений, которые обеспечивают руководство по применению процессов системной инженерии и основу для развития системной инженерии. SE имеет множество видов руководящих предложений, которые можно классифицировать по их источникам, например, эвристика (полученная из практического опыта), конвенции (полученные из социальных соглашений), ценности (полученные из культурных точек зрения) и модели (основанные на теоретических механизмах). Хотя все они поддерживают целенаправленное суждение или действие в контексте, они могут сильно различаться по объему, полномочиям и предоставляемым возможностям. Все они могут быть усовершенствованы, и по мере взросления они расширяют свои возможности, авторитет и возможности, а набор становится более компактным. Ключевой момент в их эволюции наступает с пониманием того, почему они работают, и в этот момент они становятся принципами. Истоки принципов могут быть связаны с их обозначением как «эвристические принципы», «социальные принципы», «культурные принципы» и «научные принципы», хотя на практике обычно достаточно просто сослаться на принципы. Принципы SE вытекают из принципов различного происхождения, обеспечивая разнообразный набор трансцендентных принципов, основанных как на практике, так и на теории.

Таким образом, тип системы, контекст, в котором система разрабатывается и эксплуатируется, или фаза ЖЦ не определяют строго принципы SE. Принципы SE выходят за рамки этих системных характеристик и формируют мировоззрение этой дисциплины. Принципы – это не инструкции «как делать», воплощенные в процессах, а обеспечивающие руководство при принятии решений при применении процессов системного проектирования. Принципы должны иметь прочную справочную основу, подкрепленную литературой, или широко принятые на практике, т.е. эвристическую основу, (имея в виду, что этот успех должен превосходить характеристики системы, упомянутые выше), или и то, и другое. Принципы сфокусированы, кратки и ясны в хорошо структурированных формулировках.

#### 1.4 Системная инженерия и информация об объектах

Методология SE тесно связана с понятиями жизненного цикла (ЖЦ). Модель ЖЦ состоит из этапов ЖЦ, которые обычно включают стадии концепции, реализации, производства, поддержки, использования и вывода из эксплуатации.

Ряд моделей разработки ЖЦ был создан и применен к крупномасштабным проектам разработки систем и ПО, используемым в правительстве, промышленности и научных кругах, но большинство из них основано на одной из трех основополагающих моделей. Модель Ройса – водопада [31], Бёма – спиральная модель [32], а также Форсберга и Муга – «Модель Ви» (Vee) [33]. Графическое изображение каждой из этих моделей разработки ЖЦ схематично показано на рисунке 4 [6, 11].



**Рис. 4** – основополагающие модели развития жизненного цикла: (а) Водопад, (б) Спираль, (с) «V-образная» (Vee).

Существует большое количество литературы, описывающей каждую из этих моделей. Поэтому подробное описание каждого из них здесь не приводится. Достаточно сказать, что вариации водопадной и спиральной моделей для поддержки структурированной, а также итеративной и поэтапной разработки широко использовались в проектах разработки программного обеспечения, в то время как модель «Vee» и модифицированные версии «Vee» широко применялись в области системной инженерии и разработки систем.

Помимо признания существования таких основных моделей разработки ЖЦ, они также могут служить метамоделями для разработки ЖЦ конкретной системы. Другими словами, они предоставляют шаблоны разработки ЖЦ, на основе которых строятся планы для конкретного проекта или предметной области в рамках общей методологии SE. Процесс SE – это модель процесса, которая определяет основные действия («ЧТО?»), которые необходимо выполнить для внедрения системной инженерии. Процессы SE связаны с фазами в модели ЖЦ, поскольку процесс обычно начинается на ранней стадии ЖЦ системы, как правило, в самом начале проекта; однако в некоторых случаях процесс SE может также начинаться в середине ЖЦ.

Итак, ЖЦ представляет собой ценность для ЗС и решение проблем, в виде набора этапов ЖЦ, с помощью которых можно изучать и решать проблемы, а также управлять ресурсами. Процессы ЖЦ: системы мероприятий, направленных на создание и обмен знаниями, связанными с

системным подходом, которые могут быть использованы для продвижения целостного подхода на протяжении всего ЖЦ (рис. 5).

Хотя основная деятельность в области SE заключается в определении системы, ЗС должны учитывать все аспекты ЖЦ. Чем лучше ЗС понимают действия, которые выполняют системные инженеры, тем лучше ЗС знают, что запрашивать, как это запрашивать, сколько за это платить и как оценивать качество и ценность результатов системной инженерии. Короче говоря, ЗС должны понять, как системные инженеры участвуют в реализации спроектированных систем, что приводит к продуктам, услугам, предприятиям и системам систем.



**Рис. 5** – Управление жизненным циклом

Анализ общего вида контекста любого потенциального применения ЖЦ инженерной системы позволяет выделить четыре общих случая для рассматриваемой системы, которые могут быть в центре внимания ЖЦ:

- Система, ориентированная на технологии, встроенная в один или несколько интегрированных продуктов.
- Интегрированная многофункциональная система продуктов, используемая непосредственно для оказания услуги.

- Включающая система обслуживания, поддерживающая несколько систем обслуживания.

- Система обслуживания, созданная и поддерживаемая для непосредственной реализации возможностей.

Так, контекст ЖЦ продуктовых систем будет описывать систему, ориентированную на технологию, а также связанные с ней продукты, людей и услуги, с которыми эта система должна взаимодействовать. Люди, связанные с продуктовой системой на протяжении ее жизни (например, операторы, специалисты по сопровождению, производители и т. д.), находятся вне системы продукта, поскольку они не поставляются как часть продукта. Однако для разработки успешного продукта важно полностью понимать его человеческие интерфейсы и влияние как часть контекста. Контекст продукта также будет определять системы обслуживания, в которых он будет развернут, чтобы помочь предоставить необходимые возможности предприятию-покупателю.

В ЖЦ продукта этот более широкий контекст определяет фиксированные и согласованные отношения, в которых должна действовать система, а также влияние окружающей среды, в рамках которой должен осуществляться ЖЦ. Это дает разработчику продукта свободу выбирать решения в этом контексте и гарантировать, что этот выбор вписывается в более широкий контекст и не нарушает его.

Большинство системных инженеров являются практиками, применяющими процессы и методы, которые разрабатывались и развивались на протяжении десятилетий. SE – это прагматичный подход, по сути своей междисциплинарный, но специализированный. Системные инженеры обычно работают в определенной области, используя процессы и методы, которые адаптированы к уникальным проблемам, ограничениям, рискам и возможностям их области. Эти процессы и методы развивались, чтобы захватить знания экспертов в области относительно наилучшего подхода к применению SE в конкретной области.

Конкретные области, в которых используются и адаптируются системные подходы, включают:

- Технологические продукты, объединяющие несколько инженерных дисциплин.
- Информационно-насыщенные системы, например, командование и управление, управление воздушным движением и т.д.
- Платформы, например, самолеты, гражданские авиалайнеры, автомобили, поезда и т.д.
- Организационные и корпоративные системы, которые могут быть сосредоточены на предоставлении услуг или возможностей.
- Системы гражданского строительства/инфраструктуры, например, дорожные сети, мосты, здания, сети связи и т.д.

Конкретные наборы навыков для каждой области, а также виды и масштабы систем, которые она рассматривает, могут быть совершенно разными. Однако существуют определенные базовые принципы унификации систем, которые могут повысить эффективность системного подхода в любой области. В частности, общее знание системных принципов и терминологии позволит общаться и улучшить способность системных инженеров интегрировать сложные системы, которые выходят за рамки традиционных границ областей.

Онтологические модели задают термины и понятия сущностей и взаимосвязей, используемые при представлении предметной области и её объектов. В качестве примера можно рассмотреть раздел «Термины и определения», присутствующий в составе многих инженерных и организационных документов. Итак, проектирование системы начинается с задания терминов и понятий/онтологии предметной области и целевой системы.

Как правило, онтология домена должна принадлежать всем ЗС в том смысле, что после ее создания все ЗС должны согласиться с ней и будут ее соблюдать. Дополнения или изменения в онтологии контролируются органом

управления конфигурацией, так что отдельные ЗС не могут вносить изменения в одностороннем порядке. Но, как отмечено выше, может возникнуть неразрешимое расхождение во мнениях.

В разработке Стэнфордского университета описывают здравый смысл и очень практичный процесс из семи шагов разработки онтологии, соответствующий концепции простой модели, описанной выше (<http://www.ksl.stanford.edu/people/dlm/papers/ontology101/ontology101-noy-mcguinness.html>). Однако этот процесс легко адаптируется к большинству ситуаций.

При этом первом этапе рассматриваются четыре основных вопроса:

1. Какова область применения онтологии?
2. Как будет использоваться онтология?
3. На какие вопросы и проблемы должны быть даны ответы при создании экземпляров онтологии?
4. Кто будет использовать и поддерживать онтологию?

Ответы на эти вопросы не будут и не должны быть статичными, а скорее отражают понимание на определенный момент времени в разработке онтологии и модели(ей), которые создаются на ее основе.

На вопрос о предметной области (домене) следует ответить как можно более подробно, но при этом учесть факторы, представляющие интерес для всех ЗС. Скорее всего, не желательно, чтобы домен был слишком большим, как, например, все космические аппараты, а например, ограничен на космических аппаратах, которые предоставляют информацию о погоде. Со временем эта область может расширяться до сбора данных о погоде с самолетов и наземных датчиков, необходимых для учета мнений ЗС.

Второй вопрос связан с пониманием того, будет ли онтология использоваться исключительно для рассуждений, как это может быть выполнено, например в Protégé [1], в одной или нескольких моделях MBSE или в комбинации того и другого. При использовании онтологии для логических рассуждений обязательно потребуются значительная строгость,

чтобы результаты были последовательными и надежными. При использовании в качестве основы для моделей строгость может быть снижена, как отмечалось выше, но снижение строгости может привести к путанице и несоответствиям.

На вопрос 3 можно ответить, создав набор вопросов о проекте. Это вопросы, ответы на которые заинтересованные стороны хотели бы получить с помощью онтологии или ее реализации. Примерами вопросов для метеорологического космического аппарата могут быть следующие:

1. Какие датчики необходимы для измерения содержания воды в снегу?
2. Какие датчики необходимы для измерения скорости ветра?
3. Какие датчики необходимы для измерения температуры грунта?
4. Какие датчики необходимы для измерения атмосферного давления?
5. Какие датчики необходимы для измерения содержания углекислого газа в атмосфере?
6. Как система может оценивать изменения климата и концентрацию углекислого газа?
7. Какой угол наклона обеспечивает стабильные измерения независимо от положения солнца?
8. Какая погода сейчас в Лондоне?
9. Каков прогноз погоды в Лос-Анджелесе на 5 дней?
10. Какая орбита покрывает наибольший процент поверхности Земли?

### 1.5 Системы деятельности и композиции системно-ориентированных приёмов

Так как системному инженеру для разработки сложной системы необходимы широкие познания в нескольких взаимосвязанных областях, возникает вопрос, насколько глубоки должны быть эти знания. Понятно, они не могут быть столь же глубокими, как у специалиста, всю жизнь работавшего в соответствующей области. Но все же их должно быть достаточно, чтобы осознать такие факторы, как программные и проектные риски,

технологические ограничения, требования, предъявляемые со стороны интерфейсов, а также произвести анализ компромиссов при выборе проектных альтернатив. Исследование иерархической структуры современных систем позволяет обнаружить типовые составные части, которые встречаются в большинстве систем и определяют минимально пригодный для работы уровень технических знаний, которыми должен обладать системный инженер для того, чтобы выполнять свою работу. На этом уровне находят компромисс в отношении технических возможностей системы и разрешают конфликты на уровне интерфейсов, чтобы добиться сбалансированного проектного решения в отношении системы в целом. При этом системному инженеру необходимы обширные познания в нескольких взаимосвязанных областях, которые простираются до уровня компонентов, распространяясь на несколько областей знаний. Знания же специалиста по проектированию простираются вверх от уровня деталей до уровня компонентов и, как правило, ограничены отдельной технологической областью или дисциплиной.

Сложную систему можно представить в виде иерархической структуры, состоящей из подсистем, компонентов, субкомпонентов и деталей. Область компетенций системного инженера охватывает самый верхний уровень

Структурно-функциональный анализ в SE включает определение функций системы, их иерархической структуры и последовательности операций. В процессе структурно-функционального анализа системы исследуют функции, подфункции и интерфейсы, реализующие задачи системы, сформулированные ЗС. Такой анализ обычно включает следующие этапы:

- Разложение системных функций на функции более низких уровней, которым будут удовлетворять элементы системы.
- Группировка аналогичных функций
- Моделирование функций системы, т.е. какие функции необходимо выполнять и как они соответствуют целям системы.

- Определение количественных целевых значений основных параметров системы.

При этом выделяют параметры, которые не зависят от проекта системы, например, условия окружающей среды и параметры, зависящие от проекта, например, стоимость ЖЦ, выходную мощность, скорость, вес.

Основными результатами анализа являются иерархическая структура в виде функционального дерева и дерева компонентов, реализующих эти функции. Первое определяет основные функции, которые должна выполнять система, второе выделяет все физические компоненты системы, которые могут выполнять основные функции.

Главная цель структурно-функционального анализа – обеспечение руководителя обоснованием оптимальности принимаемых им решений на основе различных критериев.

Составные части, из которых состоят все комплексные системы, располагаются на уровне компонентов и характеризуются функциональными и физическими признаками. Они выполняют в системе четко определенную значимую функцию и являются специфичными, то есть относятся к области отдельной инженерной дисциплины. Функциональные элементы – это функциональные эквиваленты компонентов; среди них по признаку физического носителя выделяются четыре категории компонентов:

- сигнальные элементы, которые служат для получения и передачи информации;
- информационные элементы, которые служат для интерпретации, упорядочения информации и управления ей;
- материальные элементы, которые служат для формирования структуры и преобразования материалов;
- энергетические элементы, которые служат источниками энергии или движущей силы.

Компоненты – это физическое воплощение функциональных элементов; среди них по физическим и конструктивным признакам можно, например, выделить шесть категорий:

- электронные;
- электронно-оптические;
- электромеханические;
- механические;
- термомеханические;
- программные.

Задача системного инженера состоит в реализации функциональных элементов с помощью компонентов.

Модель составных частей системы может быть полезной в нескольких отношениях:

1. Выделение четырех классов функциональных элементов (сигнальные, информационные, материальные и энергетические функциональные элементы) может подсказать, что лучше предпринять для достижения необходимого результата работы.

2. Идентификация классов функций, которые должна выполнять система, помогает сгруппировать подходящие функциональные элементы в подсистемы, тем самым упростив функциональную декомпозицию и функциональное описание.

3. Идентификация отдельных функциональных составных частей может помочь в определении природы интерфейсов внутри одной подсистемы и между подсистемами.

4. Знание взаимосвязи между функциональными элементами и их физическим воплощением может помочь при визуализации физической архитектуры системы.

5. Часто встречающиеся примеры составных частей системы могут подсказать, какие технологии (в том числе и альтернативные) лучше всего подходят для их реализации.

6. Тем, кто специализируется на программном обеспечении и не знаком с техникой, наличие относительно простой структуры, состоящей из четырех классов функциональных элементов и шести классов физических компонентов, поможет привести знания об оборудовании в стройную систему.

Под окружением системы понимается все, что находится вне системы, но взаимодействует с ней, а именно: 1) операторы системы (часть функциональных возможностей системы, не входящая в комплект поставки); 2) техническое обслуживание и ремонт, укрытие и системы обеспечения; 3) упаковка, доставка и хранение; 4) погодные и другие физические условия окружающей среды; 5) угрозы.

Чтобы понять, в каких условиях функционирует система, необходимо точно идентифицировать ее границы, то есть определить, что находится внутри системы, а что вне ее. Поскольку мы рассматриваем системную инженерию в контексте проекта разработки системы, в качестве подлежащего разработке берется система в целом.

В исследовании систем важнейшую роль играет принцип учета их взаимодействия с внешней средой. Внешняя среда системы – значимые для рассмотрения сущности вне системы. Внешняя среда системы задает условия её существования. Среду составляют внешние по отношению к целостной системе предметы, явления и процессы, с которыми система так или иначе взаимодействует, изменяя их и изменяясь при этом сама.

Выделение внешней среды требует установления границы системы и выделения значимых объектов внешней среды, находящихся с ней во взаимодействии. Под этим углом зрения к целостной системе относят только те объекты, которые принимают участие в создании свойств целого, остальное – внешняя среда, это два исходных понятия, играющих роль базовых категорий для описания систем,

Объекты, образующие внешнюю среду, имеют неодинаковое значение для ее существования/функционирования. Условия и свойства внешней среды, без которых данная система не может функционировать и развиваться,

являются существенными, необходимыми; условия и свойства, которые не оказывают существенного влияния на внутреннюю природу системы, называются сопутствующими; остальными условиями пренебрегают. Отсюда такой пример классификации значимости характеристик внешней среды: существенные; сопутствующие; пренебрегаемые.

На первый взгляд, определение границ системы не составляет труда, но на практике очень трудно решить, что является частью системы, а что частью ее окружения. Многие проекты оказались провальными из-за неправильных допущений относительно того, что есть внешнее, а что внутреннее. Более того, разные организации определяют границы системы по-разному – даже для очень похожих систем. По счастью, имеется несколько критериев, помогающих определить, должен ли некоторый объект определяться как часть системы:

*Контроль со стороны разработчика.* Контролирует ли разработчик системы разработку данного объекта? Может ли разработчик повлиять на требования к объекту или эти требования определяются независимо от желания разработчика? Средства выделяются из бюджета разработчика или финансирование осуществляет другая организация?

*Контроль эксплуатации.* Будет ли эксплуатация данного объекта после внедрения системы находиться под контролем организации, эксплуатирующей ее? Будет ли владелец системы определять цели и задачи, стоящие перед этим объектом? Будет ли эксплуатационный контроль время от времени переходить к другой организации?

*Привязка функций.* При функциональном описании системы может ли системный инженер привязывать функции к определенным объектам?

*Единство цели.* Необходим ли данный объект для успешной работы системы? Можно ли после внедрения системы удалить его без ущерба для других объектов?

Кроме того, на самых ранних стадиях необходимо решить, являются ли пользователи и операторы частями системы или внешними объектами. В

большинстве случаев их следует рассматривать как внешние объекты. Разработчик системы и владелец редко обладают достаточным контролем над операторами, чтобы включать их в систему. Если оператор не является частью системы, то системный инженер и разработчик должны уделить особое внимание интерфейсу оператора – критически важному аспекту сложной системы.

Интерфейсы – это важнейшая забота системного инженера. От них зависят взаимодействия между компонентами. Можно выделить три категории интерфейсов: соединители, изоляторы и преобразователи. Соединители, которые обеспечивают передачу электричества, жидкости, усилия и т.д. между компонентами. Изоляторы, которые блокируют такие взаимодействия. Преобразователи, которые изменяют характер среды взаимодействия. Подобные интерфейсы реализуются в виде составных частей компонентов или субкомпонентов, которые можно представлять как интерфейсные элементы. Интерфейсы необходимо выявить и специфицировать, а также координировать и контролировать. Кроме того, для комплексирования, а также технического обслуживания и ремонта обычно предоставляются контрольные интерфейсы.

Одно из важных средств обмена информацией, доступных системному инженеру, это контекстная диаграмма. На ней в наглядном виде изображаются внешние объекты и их взаимодействия с системой. Типичный пример контекстной диаграммы показан на рис. 6. Это так называемая диаграмма черного ящика, на которой система показана в виде сплошной фигуры в центре, без каких бы то ни было деталей. Внутреннее устройство или принцип работы скрыты от наблюдателя.

Диаграмма состоит из трех компонентов:

1. Внешние объекты - это все объекты, с которыми взаимодействует система. Многие из них можно рассматривать как источники входных воздействий на систему или получатели выходных воздействий со стороны системы.

2. Взаимодействия. Стрелками обозначены взаимодействия между системой и внешними объектами. Направление стрелки указывает, в какую сторону направлена конкретная связь. Хотя допускается и использование двусторонних стрелок, односторонние более просты для восприятия. Поэтому системному инженеру не рекомендуется применять двусторонние стрелки, чтобы не затемнять семантику взаимодействия. В любом случае каждое взаимодействие (стрелка) снабжается меткой, которая обозначает, что именно передается через интерфейс. На этом рисунке показаны типичные для контекстной диаграммы взаимодействия. На реальной контекстной диаграмме взаимодействия были бы помечены конкретными названиями, а не обобщенными понятиями. Метки должны четко передавать смысл взаимодействия, но при этом быть достаточно лаконичными, чтобы поместиться на диаграмме. Таким образом, слов «данные» или «связь» лучше избегать, потому что они не несут почти никакого смысла.

3. Система. Она изображается сплошной фигурой – овалом, кругом или прямоугольником, в центре которого находится только название системы без какой-либо дополнительной информации.



Рис. 6 – Контекстная диаграмма

Можно классифицировать то, что передается через внешние интерфейсы и сформировать пять категорий:

- данные;
- сигналы;
- материалы;
- энергия;
- воздействия.

Таким образом, система взаимодействует со своим окружением (точнее, с внешними объектами), принимая или отдавая один из первых четырех элементов либо осуществляя воздействие, которое тем или иным образом влияет на систему или окружение.

Следует также отметить, что любая система является частью более крупного образования. Иногда это образование само можно назвать системой (а не просто окружающей средой, или «природой»). В таких случаях говорят о системах систем, у которых имеется семь отличительных характеристик: эксплуатационная независимость отдельных систем, административная независимость отдельных систем, территориальная распределенность, эмерджентное поведение, эволюционное развитие, самоорганизация и адаптация.

Инженерия систем масштаба предприятия аналогична по сложности, но внимание здесь сосредотачивается на организации как отдельной сущности. Поскольку в состав предприятия входят не только технические, но и социальные системы, его сложность может оказаться непредсказуемой.

## 1.6 Системная инженерия и цифровая трансформация промышленности. Цифровое мышление.

В последние годы мир стал свидетелем экспоненциального роста технологического прогресса, и системная инженерия (SE) не является исключением. SE трансформирует способ, которым мы проектируем,

анализируем и управляем сложными системами. Это трансформационное изменение использует использование передовых технологий, таких как искусственный интеллект (AI), большие данные и Интернет вещей (IoT). Однако эволюция SE выходит далеко за рамки просто технологических достижений. Цифровая инженерия (DE) представляет собой системное вмешательство, целостный подход к трансформации SE, который включает людей, процессы, данные и технологии.

Коммерческие и государственные предприятия активно предпринимают усилия по модернизации процессов и продуктов, переходя к надежным цифровым представлениям корпоративной информации и семантически интегрируют информацию по всему предприятию и цепочкам поставок для проектирования, разработки, производства, логистики и бизнес-анализа. Инженерия знаний, представление информации, курирование моделей и аналитика данных будут лежать в основе принятия решений и выполнения совместной работы. Ценность будет предоставляться потребителю не только через конечные продукты, но и все чаще за счет предоставления услуг. Цифровая трансформация предоставит преимущества более гибким и конкурентоспособным предприятиям, которые освоят и примут эти подходы.

Таким образом, природа инженерии, особенно инструменты и методы, будут меняться более глубоко, чем в предыдущие десятилетия. Моделирование, имитация, анализ и визуализация системных проектов и сквозных решений, обеспечиваемых высокоточными цифровыми представлениями, будут доминировать в практиках всех инженерных дисциплин, а методы искусственного интеллекта будут все больше интегрироваться в инструменты на протяжении всего ЖЦ системы.

Развитие цифровых технологий и разработка стандартов позволяют использовать методы системной инженерии на основе моделей (MBSE), но экосистемы моделирования часто рудиментарны и неполны. Кроме того, вычисления, облачная инфраструктура и обнаружение данных не

используются в полной мере по сравнению с другими инженерными и научными дисциплинами.

Основная концепция DE заключается в использовании цифровых моделей, интегрированных с моделированием, многокритериальным анализом и средами визуализации с эффектом погружения. Другими словами, одним из ключевых технических аспектов DE является использование MBSE. MBSE предоставляет общий язык и структуру для общения и управления системными требованиями, проектированием и реализацией. MBSE также позволяет разработчикам и инженерам систем моделировать и тестировать поведение системы в виртуальной среде, что снижает потребность в физических прототипах. Переход к DE происходит шаг за шагом, и эволюция выходит за рамки только MBSE. Хотя MBSE является критически важным компонентом DE, это лишь часть более значительного сдвига в сторону цифровой трансформации [34]. DE подразумевает фундаментальный сдвиг в мышлении и требует от организаций принятия более совместного подхода к решению проблем, когда ЗС во всей организации работают вместе для разработки более эффективных, действенных и гибких решений для быстро меняющихся требований отрасли.

Среда SE в полной мере используют достижения цифровых технологий и стандартов моделирования для быстрого исследования проектов с использованием высокоточного моделирования, визуализации данных и технологий семантической сети. Инструменты SE извлекают выгоду из подключения к Интернету и представления знаний для обеспечения бесперебойного обмена информацией с другими дисциплинами и их инструментальными средами как части более широкой корпоративной цифровой инженерной среды. Кроме того, системные инженеры сотрудничают с машинами для объединения креативности и автоматизации в надежном и гибком процессе проектирования.

Пять целей цифрового инжиниринга

**1. Формализовать разработку, интеграцию и использование моделей** для информирования предприятий и принятия программных решений:

Устанавливает формальное планирование, разработку и использование моделей как неотъемлемую часть выполнения инженерных работ как континуума на протяжении всего ЖЦ. Такое повсеместное использование моделей приведет к непрерывному сквозному цифровому представлению интересующей системы. Это будет поддерживать последовательный анализ и принятие решений для программ и всего предприятия.

**Модели могут обеспечить точное и универсальное** представление системы, явления, сущности или процесса. На ранних этапах ЖЦ модели позволяют виртуально исследовать решения до их фактического воплощения. В течение ЖЦ решения модели созревают и могут стать полезными репликами физических аналогов для виртуального тестирования и поддержки логистического обеспечения.

Эта цель фокусируется на формализованном применении моделирования для поддержки всех фаз ЖЦ системы от концепции до утилизации.

**Модели будут построены так, чтобы стать авторитетным источником истины**, что должно включать прослеживаемость моделей от концепции до утилизации целевой системы. Интеграция и кураторство моделей должны соответствовать планам по сбору и передаче информации лицам, принимающим решения.

**Модели используются для ответа на вопросы**, обоснования решения, поддержки решений и четкой недвусмысленной коммуникации на всех уровнях достоверности и по всем видам деятельности ЖЦ. Модели должны использоваться для поддержки деятельности полного ЖЦ. Обмен информацией между техническими дисциплинами или организациями должен осуществляться посредством обмена моделями и автоматизированных преобразований.

## **2. Предоставьте надежный и авторитетный источник истины.**

Это позволяет получать доступ, управлять, анализировать, использовать и распространять информацию из общего набора цифровых моделей и данных. В результате уполномоченные заинтересованные стороны получают актуальную, авторитетную и последовательную информацию для использования в течение жизненного цикла.

Авторитетный источник истины позволит командам работать совместно, имея доступ к актуальным моделям, данным и информации, при этом бесшовно интегрируя свою работу. Модели служат интегратором на протяжении всего ЖЦ. Этот сдвиг парадигмы принципиально изменит текущую практику принятия документов на принятие моделей и обеспечит техническую основу для доменов приобретения и функциональных областей. Пользователи могут создавать различные представления, используя общую сеть моделей и данных, чтобы предлагать согласованные цифровые артефакты, одновременно сокращая трудоемкие усилия и доработки.

## **3. Внедрение технологических инноваций для улучшения инженерной практики:**

Видение цифрового инжиниринга заключается в том, чтобы иметь инжиниринговое предприятие, которое соединяет цифровой и физический миры на протяжении ЖЦ системы. Сквозное цифровое предприятие будет включать подход на основе моделей в цифровой среде, подключенной с помощью передовых технологий, для проведения мероприятий полного жизненного цикла от концепции до утилизации.

Реализация сквозного цифрового предприятия, автоматизация задач и процессов, а также принятие более разумных и быстрых решений – все это требует следующего рубежа технологий, которые преобразуют способ взаимодействия людей и машин. Достижения в области искусственного интеллекта привели к появлению когнитивных технологий, которые способны выполнять задачи, которые традиционно требовали человеческого интеллекта.

**4. Создать поддерживающую инфраструктуру и среду для выполнения деятельности, сотрудничества и общения между заинтересованными сторонами.**

Надежные, доступные, безопасные и связанные информационные сети необходимы для выполнения цифровой инженерной деятельности на протяжении всего ЖЦ.

Эффективное использование предприятия, основанного на моделях, требует перехода от документооборота к цифровому подходу.

**5. Трансформировать культуру и рабочую силу для внедрения и поддержки цифровой инженерии на протяжении всего жизненного цикла.**

Включает в себя лучшие практики управления изменениями и стратегические коммуникации для трансформации культуры и рабочей силы. Необходимы целенаправленные усилия для руководства и реализации изменений, а также поддержки перехода организации к цифровой инженерии.

## 2 Природа систем и представление систем с помощью моделей

### 2.1 Типы систем. Циклическая и иерархическая природа систем.

В то время как широкий спектр взглядов на конкретные системы вытекает из практики системной инженерии и других системно-ориентированных дисциплин, дисциплина системная наука ищет абстрактные, обобщенные и универсально применимые концепции, принципы и теории систем. Всеобъемлющее понятие «система» применимо к любому физическому или концептуальному предмету, представляющему интерес, включая абстрактные области знаний.

Система – это совокупность взаимосвязанных компонентов. Компоненты по-разному связаны друг с другом, а сама система связана с ее окружением. Все системы имеют границы. В случае спроектированных или физических систем граница ясна. В социальных и метафизических системах граница обычно более динамична, менее очевидна и более открыта для интерпретации. Другими словами, наблюдатели, скорее всего, по-разному будут воспринимать границу социальной или метафизической системы. Общее наблюдение о системах заключается в том, что они обладают свойствами, которые не очевидны из свойств самих компонентов, – синергией или эмерджентностью.

Хотя систему часто воспринимают как структуру, ее уникальные свойства обусловлены отношениями между компонентами внутри этой структуры. Например, деревья обеспечивают тень от солнца и поэтому могут служить убежищем от жары. В практике системной инженерии систему часто отождествляют с ее функциями. Спроектированные системы обладают одной или несколькими функциями. Функции – это полезные свойства в контексте системы более высокого уровня. Функции являются возникающим свойством желаемого поведения системы, а поведение системы обеспечивается структурой системы.

Системы могут быть как «физическими», так и/или «концептуальными» вещами. Концептуальные вещи, ментальные процессы, часто коррелируют с физическими причинами (например, событиями, наблюдаемыми в мозге) и могут считаться «составляющими» отдельный класс реляционных процессов. Если «концептуальные» вещи могут быть основаны на реляционных процессах, коррелирующих с физическими причинами, то само собой разумеется, что осмысленное общение о физических причинах в различных пространственных и временных масштабах обеспечивает теоретическую основу для включения концептуальных и физических вещей в область «конкретных» систем.

В этом узком смысле можно сказать, что все интересующие нас предметы участвуют в «единой» системе «конкретной» (физической) природы. То есть, как непреодолимое физическое единство, Вселенная состоит из концептуальных и физических вещей, существующих во взаимосвязанных и объединяющих процессах взаимосвязи, которые можно описать в субъективно понятных терминах, иными словами, «понять». Эта «системность» (по понятным причинам существующая в реляционных процессах) является общей характеристикой всех вещей. Системная наука обеспечивает полезные ориентиры для значимых подходов к обеим сферам в целом (например, физической и социальной).

Природа систем как одна из наиболее мощных и широко используемых парадигматических концепций является общей нитью человеческого существования. Как правило, системы во Вселенной не воплощают человеческую деятельность, в отличие от людей и ученых-системологов. Проверка, легитимация и оценка системных знаний обычно происходят в их отношениях между человеческими ситуациями. В частности, системная наука на службе SE (или наоборот) признает и способна предвидеть и предоставлять ценность для ЗС системы, которые обычно находятся в системах другого происхождения (культуры, которые не обязательно имеют общий системный язык).

Системная наука (как система деятельности) увеличивает ценность за счет организации и адаптации концепций, теорий, принципов и активов, которые предоставляют полезные выражения фактов, проблем, эффектов или степени, относящихся к формам, функциям и приспособленности систем в ландшафте системных компетенций. Эти модели выражения помогают ЗС предвидеть сложные динамические ситуации и составлять описания и последовательности действий (например, планы) множеством понятных и надежных способов. Системные ученые должны общаться с широким кругом заинтересованных сторон, чтобы системы были спроектированы так, чтобы они работали предсказуемо хорошо. В свою очередь, ЗС должны владеть «местным» языком(ами) своих системных интересов. Часто это имеет приоритет, и ценность системной науки заключается в выражении знаний в терминах, понятных ЗС, а не наоборот.

Актуальность понимания общих основ систем для практики SE можно резюмировать в трех пунктах:

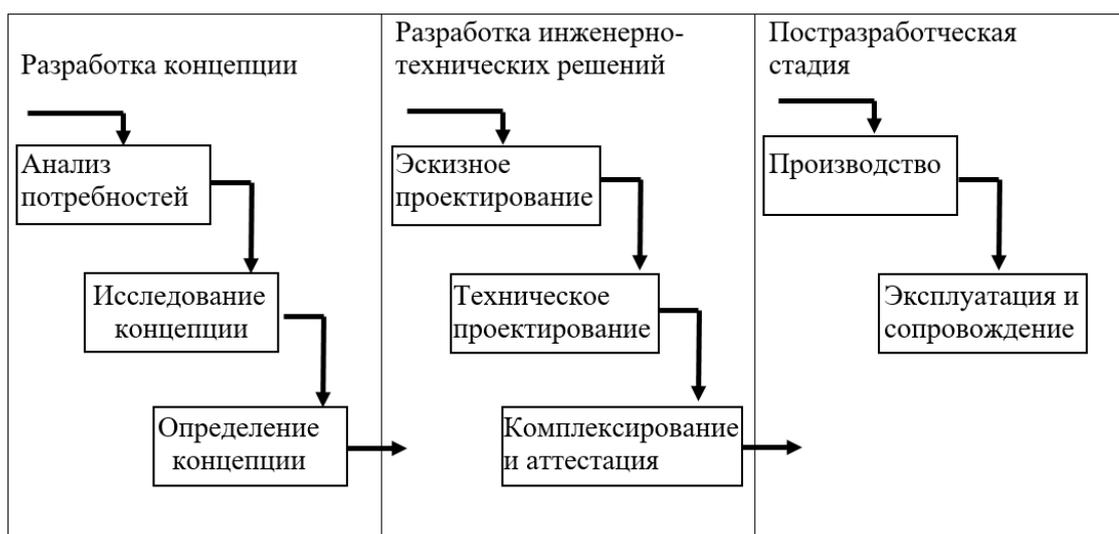
1. Цивилизация зависит от высокоразвитых физических и концептуальных систем и последних данных планетологии указывает на то, что системы планетарной поддержки существенно и относительно быстро меняются. Цивилизация представляет собой продолжающуюся коэволюционную систему систем с системой планетарной поддержки человечества, и недавние данные указывают на то, что скорость изменений увеличивается. Цивилизация зависит от высокоразвитых планетных систем, и недавние данные планетологии (обновленные данные о пределах роста) указывают на то, что они меняются значительно и относительно быстро.

2. Практика SE встроена в распространение социотехнических систем, составляющих современную цивилизацию, и развивается вместе с ними.

3. Проектирование, интеграция и развитие социотехнических систем становятся более сложными, поскольку в процессы SE вовлекаются новые технические специалисты. Например, добавление специальностей в области экологии, экономики, социальной сферы и управления увеличивает нагрузку

на ключевую роль системного инженера – системного интегратора и коммуникатора.

При построении модели ЖЦ, которая отражала бы существенные переходы от одного вида деятельности системного инженера к другому на протяжении существования системы, обнаружилось, что удобнее всего разбить ЖЦ системы на три больших стадии, а их, в свою очередь, – на восемь этапов. Эта структура показана на рис. 7. Названия стадий выбраны с тем расчетом, чтобы в них отражалась принципиально важная деятельность, имеющая место на каждом этапе процесса. Некоторые названия неизбежно совпадают или, во всяком случае, коррелируют с названиями аналогичных частей в других существующих моделях ЖЦ.



**Рис. 7** – Модель ЖЦ, предназначенная для системного инженера.

Модель ЖЦ системы (рис. 7) включает три стадии, из которых первые две охватывают часть ЖЦ, относящуюся к разработке, а последняя – период после завершения разработки. Эти стадии отмечают наиболее важные переходы в ЖЦ системы, а также изменения типа и предмета деятельности системного инженера:

1. Стадия разработки концепции она охватывает начальный период, когда формируется и выбирается концепция системы, реализация которой позволяет наилучшим образом удовлетворить установленные потребности ЗС;

2. Стадия разработки инженерно-технических решений охватывает переход от концепции системы к прошедшему успешную валидацию проекту физической реализации системы, отвечающей эксплуатационным, стоимостным и временным требованиям;

3. Постразработоческая стадия включает производство, развертывание, эксплуатацию и сопровождение системы на протяжении всего срока ее службы.

Названия стадий выбраны в соответствии с основным типом деятельности.

Основные цели стадии разработки концепции таковы:

1. Убедиться в том, что потребность в новой системе, равно как и рынок для нее, действительно существуют, а также в том, что имеются технические и экономические возможности ее создания.

2. Исследовать возможные концепции системы, сформулировать и одобрить совокупность требований к ее поведению.

3. Выбрать наилучшую концепцию системы, определить ее функциональные характеристики и составить детальный план последующих этапов разработки, производства и ввода системы в эксплуатацию.

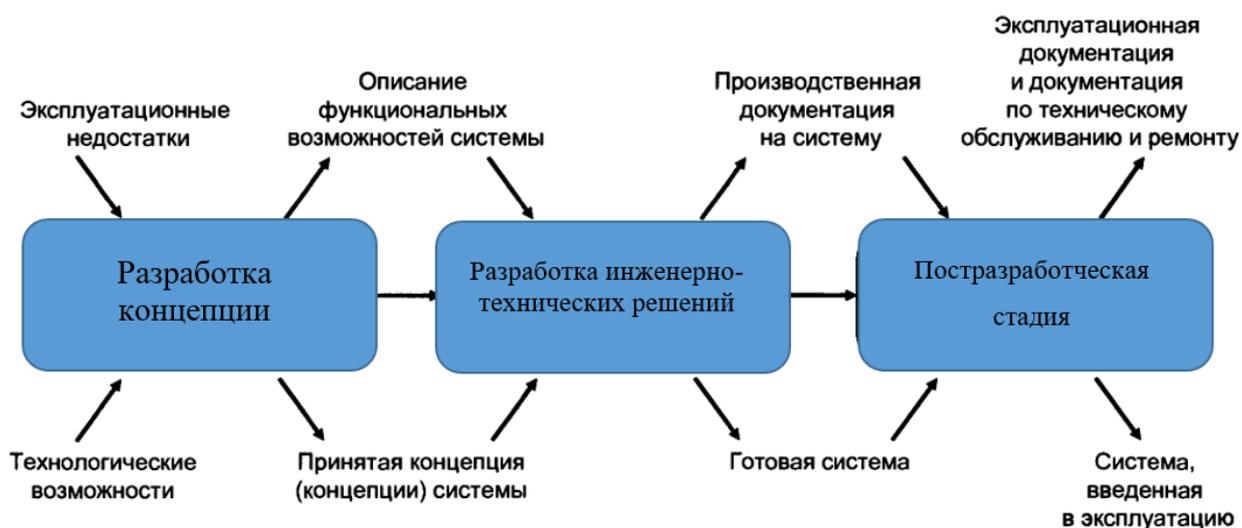
4. Разработать новые технологии, необходимые для реализации принятой концепции, и убедиться в их способности удовлетворить требованиям ЗС.

Основные цели стадии разработки инженерно-технических решений таковы:

1. Осуществить инженерно-техническую разработку системы-прототипа, которая удовлетворяет функциональным требованиям, а также требованиям по надежности, ремонтпригодности и безопасности.

2. Создать систему, экономичную в производстве и использовании и продемонстрировать ее пригодность к эксплуатации.

Соотношения между основными стадиями ЖЦ системы показаны в графической форме на рис. 8. Здесь мы видим принципиально важные входы и выходы для каждой стадии. Надписи над блоками относятся к потоку информации в виде требований, спецификаций и документации, начиная с практических нужд. Входы и выходы под блоками соответствуют шагам эволюции формальных представлений (описаний, чертежей, документации) инженерно насыщенной системы от концепции до ввода в эксплуатацию. Видно, что с продвижением по ЖЦ документация и конструкторские решения становятся все более сложными и конкретными.



**Рис. 8** – Основные стадии жизненного цикла системы.

Внутри каждой стадии ЖЦ системы можно выделить отдельные этапы, которые характеризуются четко определенными целями и деятельностью. Применительно к большим программам эти этапы отделяются друг от друга точками принятия решений – такими же, какие отделяют переходы между стадиями. Роли SE на различных этапах ЖЦ существенно отличаются. Поэтому, чтобы понять, как эволюция системы в рамках ее ЖЦ соотносится с процессом SE, полезно разработать детализированную модель структуры

этого процесса, где будут отражены элементы второго иерархического уровня. В нашей модели ЖЦ для системного инженера стадия разработки концепции ЖЦ включает три этапа: анализ потребностей, исследование концепции и определение концепции. Эти этапы, основные виды деятельности на каждом из них, входы и выходы показаны на рис. 9 в таком же формате, как на рис. 8.

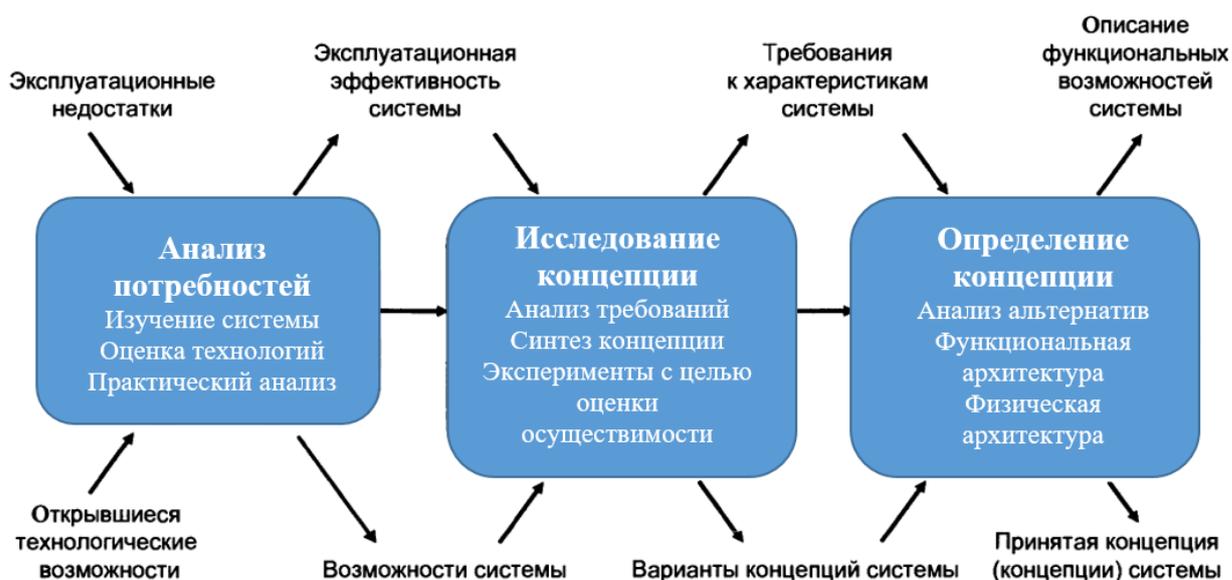


Рис. 9 – Этапы разработки концепции в ЖЦ системы.

**Этап анализа потребностей.** На этом этапе выявляется потребность в новой системе. Здесь задаются вопросы типа «Действительно ли нужна новая система?» и «Существует ли практически осуществимый способ удовлетворить эту потребность?». Для ответа на такие вопросы необходимо критически проанализировать, в какой степени, текущие и предполагаемые в дальнейшем потребности могут быть удовлетворены путем физической или функциональной модернизации имеющихся средств, а также понять, способны ли существующие технологии обеспечить желаемое наращивание возможностей. Во многих случаях стимулом к созданию новой системы может послужить результат анализа практических нужд или появление инновационного продукта, но четко зафиксировать момент рождения новой системы обычно не удается. На выходе этого этапа создается описание

возможностей и эксплуатационной эффективности, которыми должна обладать новая система. Во многих отношениях это первая итерация самой системы, правда, на очень общем концептуальном уровне. Рекомендуется обратить внимание на то, как «система» эволюционирует по ходу ЖЦ, начав с этого, самого раннего, этапа. Хотя мы бы не стали называть такое описание требованиями, оно, безусловно, является предтечей официальных требований к системе. Некоторые специалисты называют это полученное на самой ранней стадии представление «описанием исходных возможностей».

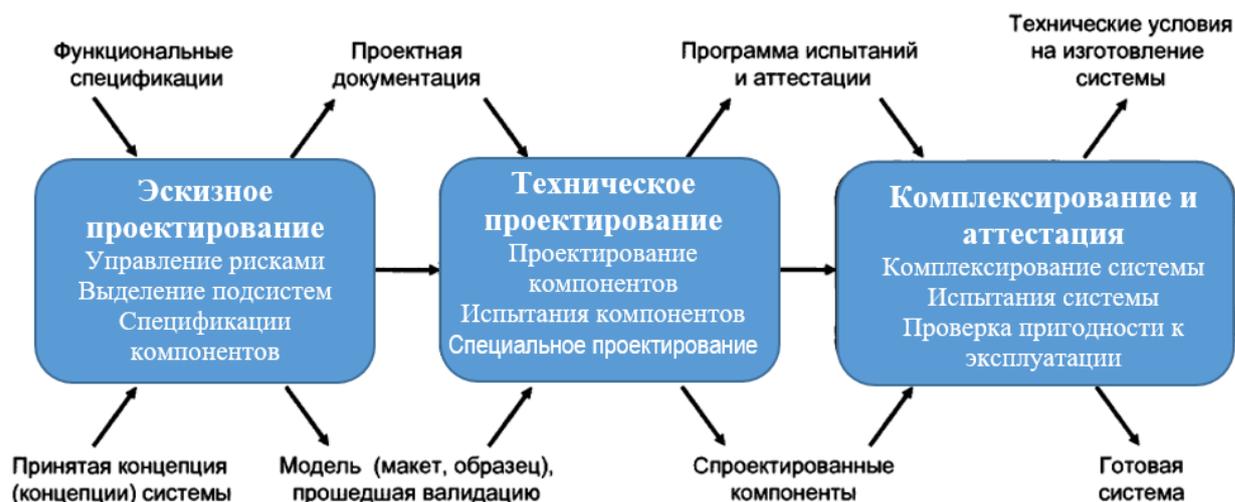
**Этап исследования концепции.** На этом этапе исследуются возможные варианты концепций системы и задаются вопросы типа «Какими должны быть характеристики новой системы, чтобы удовлетворить выявленные нужды?» и «Существует ли хотя бы один способ достижения таких характеристик с приемлемыми затратами?». Если ответ на эти вопросы положительный, то еще до затраты значительных сил и средств на разработку проекта новой системы известно, что у него имеется четко определенная и достижимая цель. На выходе данного этапа формируется первый «официальный» набор требований, которые обычно называют требованиями к функциональным возможностям системы. Говоря «официальный», мы имеем в виду, что подрядчик или агентство может оценить на соответствие установленные в требованиях возможности и характеристики. Кроме начального набора требований на этом этапе разрабатывается несколько возможных концепций системы. Обратите внимание на множественное число - важно изучить несколько альтернативных вариантов концепции и уяснить, каков диапазон потенциальных решений.

**Этап определения концепции.** На этом этапе определяется предпочтительная концепция. Следует ответить на вопрос: «Каковы ключевые характеристики концепции системы, при которых достигается благоприятный баланс между функциональными возможностями, сроком службы и стоимостью?» Для этого нужно рассмотреть несколько альтернативных концепций и сравнить их характеристики, практическую полезность, риски

разработки и стоимость. Получив удовлетворительный ответ, можно принимать решение о выделении серьезных ресурсов на разработку новой системы. На выходе получаются два представления одной и той же системы: набор функциональных спецификаций, описывающих, что и насколько хорошо должна делать система, и принятая концепция. Последняя может быть представлена в одном из двух видов. Если сложность системы относительно мала, то для формирования общей стратегии проектирования достаточно простого описания концепции. Если же система по-настоящему сложна, то такого описания недостаточно и необходимо представить всестороннюю системную архитектуру, отражающую различные взгляды на систему. Вне зависимости от степени детализации концепцию следует описать в нескольких ракурсах - главным образом функциональном и физическом. Если сложность особенно велика, то вполне могут понадобиться и другие ракурсы.

До перехода к стадии разработки инженерно-технических решений на создание системы обычно затрачиваются сравнительно небольшие средства, хотя на то, чтобы четко понять, в каких условиях будет работать система, и исследовать технологии, относящихся к делу на уровне подсистем, могут быть потрачены годы и немалые усилия. Основные затраты возникают на последующих стадиях жизненного цикла.

На рис. 10 показаны действия, а также входы и выходы, характерные для различных этапов стадии разработки инженерно-технических решений. Они называются эскизное проектирование, техническое проектирование, комплексирование и аттестация.



**Рис. 10** – Этапы разработки инженерно-технических решений в ЖЦ системы.

На этапе эскизного проектирования стоят две основные задачи: 1) идентификация и снижение рисков разработки и 2) разработка проектной документации на систему. Успешное завершение стадии разработки инженерно-технических решений существенно зависит от прочности фундамента, заложенного на стадии разработки концепции. Но поскольку концептуальное проектирование - главным образом аналитическая работа, на которую выделяются ограниченные ресурсы, то неизбежно остаются неизвестные, которые еще предстоит определить и прояснить. Важно выявить эти «неизвестные неизвестные» и принять по ним решения на ранних этапах стадии разработки. В частности, следует принять все возможные меры, чтобы минимизировать число невыявленных проблем еще перед тем, как от функционального проекта и связанных с ним требований к системе будет осуществлен переход к техническим спецификациям (проектным, конструкторским, производственно-технологическим) на отдельные аппаратные и программные элементы системы. Этот этап особенно важен, когда концепция системы предполагает использование передовой технологии, которая ранее не применялась в подобных разработках, или когда для достижения требуемых характеристик приходится подвергать компоненты

большей нагрузке, чем было принято ранее. Цель эскизного проектирования состоит в том, чтобы получить представление о конструкции составных частей системы, решения по которым не проработаны, и продемонстрировать практическую возможность выполнения требований к этим частям, а также заложить основу для преобразования функциональных требований к системе в документацию на систему и в технические требования к компонентам SE занимает центральное место в решениях о том, что нуждается в валидации и как ее провести, а также в интерпретации результатов. Если риски использования непроверенной технологии высоки, часто заключается отдельный контракт на выполнение работ, относящихся к этому этапу, а заключение контрактов на оставшиеся этапы разработки зависит от полученных результатов. В полном соответствии с назначением данного этапа его основным результатом являются проектная документация и модель (макет, образец), прошедшая валидацию. В документации уточняются и развиваются решения, содержащиеся в функциональных спецификациях, разработанных на предыдущей стадии. Модель (макет, образец) системы – это окончательный результат очень подробного анализа рисков, в ходе которого удастся выявить неизвестные, о которых упоминалось выше, и принять по ним решения. Именно это имеется в виду, когда говорится, что модель прошла валидацию. Перед тем как перейти к следующему этапу, системный инженер должен убедиться, что систему можно будет спроектировать и изготовить. Поэтому на этом этапе все риски должны быть признаны контролируемыми.

На этапе технического проектирования выполняется детальное техническое проектирование системы. Из-за масштабности задачи по ходу процесса обычно несколько раз производится формальный анализ состояния проекта. У этого мероприятия есть важная функция – дать заказчику или пользователю возможность ознакомиться с проектом на ранних этапах, проконтролировать выполнение бюджета и графика и высказать разработчику полезные критические замечания. Вопросы надежности, возможности изготовления, ремонтпригодности и т.п. рассматриваются и на предыдущих

этапах, но на этапе технического проектирования приобретают особую важность. В совокупности решение этих вопросов часто называют «специальным проектированием» (specialty engineering). Поскольку готовое изделие состоит из компонентов, которые предполагается объединить и испытывать в составе системы, системный инженер отвечает за то, чтобы технические проекты отдельных компонентов точно отвечали требованиям к функциональности и совместимости, а также за управление процессом внесения изменений в проект, чтобы при этом не нарушались интерфейсы и конфигурация. Задача этого этапа заключается в преобразовании спецификаций на компоненты в набор проектных решений в отношении компонентов. Разумеется, сразу после проектирования, а иногда и одновременно с ним необходимо провести испытания компонентов. Есть и еще одна задача, решение которой выполняется на данном этапе - уточнение программы испытаний и аттестации. Мы используем термин «уточнение», чтобы отличить начало от продолжения. Первоначальный вариант программы испытаний и аттестации составляется на гораздо более раннем этапе ЖЦ, а сейчас, при наличии информации, полученной в ходе выполнения предыдущих этапов, ее можно привести по существу к окончательному виду. Два результата первостепенной важности на этом этапе - программа испытаний и аттестации и разработка прототипа. Прототип может принимать разные формы, и совсем необязательно рассматривать его по аналогии с прототипом программы. В зависимости от разновидности системы прототип, создаваемый на этом этапе, может быть виртуальным, физическим или гибридным. Например, если проектируется океанское грузовое судно, то в качестве прототипа может выступать гибридный виртуального и физического макетов. Создавать на этом этапе грузовое судно в масштабе 1:1 не всегда возможно или целесообразно. С другой стороны, если система - это стиральная машина, то вполне можно изготовить прототип и в натуральную величину. В распоряжении конструкторов имеются современные средства автоматизированного проектирования. Модели системы и имитационные

модели должны соответствовать текущему состоянию проекта и результатам испытаний.

На этапе комплексирования и аттестации процесс комплексирования компонентов сложной системы в работающее целое и оценки функционирования системы в реальных условиях номинально является частью процесса разработки инженерно-технических решений, поскольку в этой точке программы разработки нет никакого формального разрыва. Однако роли и обязанности системного инженера во время технического проектирования элементов системы и в процессе комплексирования и аттестации системы существенно различаются. С точки зрения SE, мы рассматриваем процесс комплексирования и аттестации системы как отдельный этап ЖЦ. Важно понимать, что новую систему можно собрать и оценить как функционирующее изделие только после того, как все ее компоненты сконструированы и изготовлены. Именно на этой стадии проверяется, что интерфейсы компонентов согласованы и компоненты взаимодействуют в соответствии с функциональными требованиями. Возможно, на более ранних этапах уже проводились испытания на уровне подсистемы или прототипа, но целостность проектных решений относительно всей системы до этого момента не могла быть подвергнута валидации. Следует отметить, что в процессе комплексирования и аттестации часто требуются разработка и конструирование сложных вспомогательных комплексов, делающих возможными имитацию эксплуатационных воздействий и ограничений, а также измерение реакции системы с достаточно высокой точностью. Иногда комплексы такого рода могут быть построены на основе оборудования, применявшегося при разработке, однако масштаб этой задачи не стоит недооценивать. Результатами данного этапа являются: 1) спецификации, служащие руководством при изготовлении системы, которые обычно называются «технические условия на производство системы» (иногда называемые исходной производственной документацией) и 2) собственно

готовая система. Последнее подразумевает, что имеется все необходимое для производства и сборки системы и, возможно, прототип системы.

Этап производства – это первый из двух этапов, составляющих постразработческую стадию. Как бы тщательно ни был приспособлен к нуждам производства проект системы, в процессе производства неизбежно возникают проблемы. Всегда существуют неожиданные препятствия, которые руководитель проекта не в состоянии контролировать, например непредвиденные трудности с обеспечением инструментами, ошибки в критически важных программах или неожиданный сбой в ходе заводских комплексных испытаний. Такие ситуации грозят дорогостоящим срывом производственного графика и, следовательно, требуют быстрого и решительного исправления. Системный инженер часто оказывается единственным человеком, достаточно квалифицированным для того, чтобы диагностировать источник проблемы и найти эффективное решение. Нередко ему удается отыскать «обходной путь» решения проблемы с минимальными затратами. Это означает, что для обеспечения производства в штат необходимо включить системных инженеров, хорошо знакомых с проектом, особенностями конструкции и эксплуатации системы. В тех случаях, когда требуется консультация специалиста по специальному проектированию, системный инженер – нередко единственный, кто может квалифицированно решить, кого и когда пригласить.

На этапе эксплуатации и сопровождения нужда в поддержке со стороны системного инженера ощущается еще острее. Операторы системы и специалисты по техническому обслуживанию и ремонту, скорее всего, недостаточно сведущи в тонких деталях функционирования и обслуживания системы. Хотя специально обученные инженеры по эксплуатации в общей ситуации знают, что делать, на случай, если проблема выйдет за рамки их квалификации, должна быть предусмотрена возможность пригласить опытного системного инженера. Надлежащее планирование этапа эксплуатации подразумевает подготовку логистической системы и программ

обучения операторов и ремонтного персонала. В этом планировании важная роль должна быть отведена системной инженерии. Неизбежно возникают непредвиденные проблемы уже после ввода системы в эксплуатацию, и это необходимо учесть в логистической системе и в системе обучения персонала. Очень часто инструментарий, применяемый для обучения и технического обслуживания и ремонта, сам по себе является важным компонентом поставляемой системы. У большинства сложных систем срок службы исчисляется многими годами, и на его протяжении система подвергается мелким и крупным обновлениям, обусловленным эволюцией целей и задач системы, а также техническим прогрессом, достижения которого позволяют улучшать функциональные возможности, повышать надежность или экономичность системы. В наибольшей степени периодические обновления присущи системам, в которых интенсивно используются компьютеры, причем совокупные усилия, затрачиваемые на усовершенствования, могут намного превышать усилия, потраченные на первоначальную разработку системы. И хотя масштаб отдельной модернизации несопоставим с масштабом работ, необходимых для создания новой системы, обычно в ходе обновления системы приходится принимать много сложных решений, требующих применения системной инженерии. Этот процесс может оказаться чрезвычайно нелегким, особенно на стадии разработки концепции модернизации.

## 2.2 Основные сущности для представления систем: требования, функции, компоненты

Системная инженерия отличается от механики, электротехники и других инженерных дисциплин в нескольких существенных отношениях:

В центре внимания системной инженерии находится система в целом, это придает особое значение функционированию системы как единого целого. Системный инженер смотрит на систему как снаружи (то есть оценивает ее во взаимодействии с другими системами и окружением), так и изнутри. Он

интересуется не только техническим проектом системы, но и внешними факторами, которые могут налагать существенные ограничения на проектные решения. Сюда входит выявление нужд заказчика, определение условий эксплуатации, сопряжение с другими системами, логистические требования, требования к квалификации обслуживающего персонала и прочие факторы, которые должны быть надлежащим образом отражены в документах, содержащих требования к системе, и учтены при ее проектировании.

Хотя основная цель SE состоит в том, чтобы руководить, это не означает, что системные инженеры сами не принимают существенного участия в проектировании системы. Напротив, они играют ведущую роль на начальной стадии создания новой системы (разработка концепции), которая завершается функциональным проектированием системы, способной удовлетворить потребности пользователя. Важные проектные решения, принимаемые на данной стадии, не могут в той же мере, как это принято в традиционных инженерных дисциплинах, опираться на количественное знание, но скорее должны основываться на качественных оценках, учитывающих необходимость достижения баланса между множеством разнородных показателей, а также опыт, накопленный в разнообразных дисциплинах, особенно если речь идет о новой технологии.

SE наводит мосты между традиционными инженерными дисциплинами. Элементы сложной системы гетерогенны, поэтому для ее проектирования и разработки требуется знание различных инженерных дисциплин. Чтобы система функционировала правильно, каждый ее элемент должен корректно работать в связке с другими элементами – одним или несколькими. Реализация таких взаимосвязанных функций зависит от сложного комплекса физических и функциональных взаимодействий между элементами, которые проектировались по отдельности. Таким образом, элементы системы нельзя разработать независимо, а затем просто соединить, надеясь получить при этом работоспособную систему. На самом деле системный инженер должен направлять и координировать проектирование отдельных элементов, следя за

тем, чтобы взаимодействия и сопряжения между элементами системы обеспечивали совместимость и взаимную поддержку устройств в составе системы. Такая координация особенно важна, когда отдельные элементы системы проектируются, испытываются и поставляются различными организациями.

Связь современной системной инженерии с ее истоками проще всего понять, приняв во внимание три основных фактора:

Технический прогресс, который дает шансы для повышения функциональных и других возможностей системы, но одновременно приводит к появлению рисков, относящихся непосредственно к разработке, для управления которыми требуется руководство со стороны системного инженера; ни в какой другой области это не проявляется столь наглядно, как в сфере автоматизации. Технологические достижения в области человеко-машинного взаимодействия, робототехнических устройств и программного обеспечения делают именно эту область одним из мест, где с наибольшей скоростью возрастает влияние технологий на системное проектирование.

Конкуренция, различные формы которой требуют поиска лучших (а значит и более передовых) системных решений, для чего необходимо на различных уровнях системной иерархии искать компромиссы между альтернативными подходами.

Специализация, которая требует разбиения системы на составные части, соответствующие конкретным типам изделий, которые могут быть спроектированы и изготовлены специалистами, а также наличия строго установленных правил сопряжения этих частей и взаимодействия между ними.

Современная SE появилась в результате того, что передовые технологии в сочетании с ростом степени автоматизации принесли с собой риски и повышение сложности; при этом конкурентная борьба требовала идти на риск после тщательной оценки возможных последствий, а углубление

специализации диктовало необходимость междисциплинарных связей и построения интерфейсов.

В общем и целом, SE – это дисциплина, обладающая высоким потенциалом, требующая мультидисциплинарных знаний и позволяющая агрегировать разнообразные системные элементы. Системный инженер должен уметь выполнять приближенные расчеты применительно к сложным случаям, чтобы проверить результат на истинность. И наконец, он должен обладать скептическим, но вместе с тем позитивным складом ума – необходимое условие оправданного риска.

Метод SE можно представить себе как систематическое применение научного метода к инженерной деятельности по созданию сложной системы. Можно считать, что он включает четыре основных вида деятельности, которые применяются последовательно, как показано на рис. 11:

1. Анализ требований.
2. Функциональное описание.
3. Описание физической реализации.
4. Валидация проектных решений.

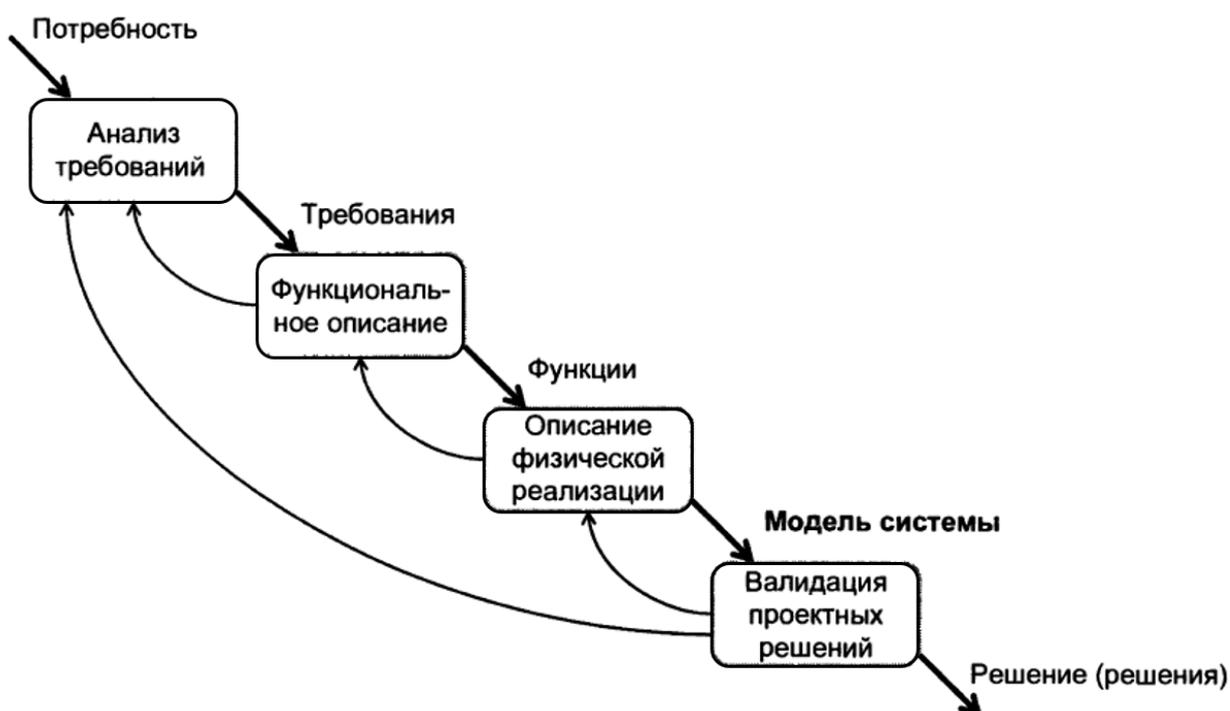


Рис. 11 – Высокоуровневая схема системной инженерии.

Характерные особенности шагов могут различаться в зависимости от типа системы и стадии ее разработки. Но основные принципы применения достаточно схожи, чтобы определить типичные действия, присущие каждому шагу, рекомендованному методом.

1. Анализ требований (постановка задачи). Этот этап заканчивается формированием иерархической структуры сущности требований к целевой системе. Типичные действия включают:

- сбор и систематизацию всех входных условий, в том числе требований, планов, точек принятия решений и моделей, полученных на предыдущем этапе;

- ответ на вопрос «зачем» применительно ко всем требованиям - в терминах практических нужд, ограничений, окружения и других высокоуровневых целей;

- прояснение требований к тому, что, насколько хорошо и в рамках каких ограничений должна делать система;

- исправление несоответствий и выражение требований в измеримых показателях там, где это возможно.

2. Описание функций (анализ функционирования и привязка функций). Этот этап заканчивается формированием иерархической структуры сущности функций целевой системы. Типичные действия:

- перевод требований (зачем, почему) на язык функций (действий и работ), которые должна выполнять система (что);

- декомпозиция требований с привязкой к функциональным составным частям;

- описание взаимодействий между функциональными элементами, позволяющее заложить основу для построения модульной конфигурации.

3. Описание физической реализации (синтез, анализ физической реализации и размещение элементов). Этот этап заканчивается

формированием иерархической структуры сущности компонентов целевой системы Типичные действия:

- синтез нескольких альтернативных компонентов системы, представляющих многообразие проектных подходов к реализации необходимых функций и позволяющих наиболее простым образом осуществить взаимодействия и реализовать интерфейсы между элементами структуры;

- выбор наиболее предпочтительного подхода, где в основе принятия решения лежит достижение компромисса на основе анализа совокупности заранее определенных критериев с заданными приоритетами (показателями эффективности) в интересах получения наилучшего «баланса» между показателями функционирования, рисками, затратами и сроками;

4. Валидация проектных решений (верификация и оценка). Типичные действия:

- проектирование моделей окружения системы (логической, математической, имитационной и физической), отражающих все существенные аспекты требований и ограничений;

- имитация или испытание и анализ системного решения (решений) на моделях окружения;

- при необходимости - выполнение итераций для корректировки модели системы или моделей окружения или для ослабления слишком жестких требований, до тех пор, пока проектные решения и требования не будут полностью согласованы.

Таким образом основными сущностями для представления систем являются требования, функции, компоненты.

Элементы метода системной инженерии, описанные выше, представлены в виде блок-схемы на рис. 12, который детализирует представление, показанное на рис. 11. Прямоугольные блоки отвечают четырем основным шагам метода: анализ требований, функциональное описание, описание физической реализации и валидация проектных решений.

Сверху расположены входы, являющиеся результатом предыдущей стадии: требования, ограничения и цели. Слева от каждого блока находятся внешние входы, например предшествующая система, составные части системы и результаты анализа, выполненного на предыдущих шагах. Справа и сверху от блоков и в самом низу показаны вклады методологии системной инженерии. Окружностями внутри блоков обозначены упрощенные представления основных процессов на данном шаге метода. Стрелки указывают направление потока информации. Видно, что существуют обратные связи между различными шагами процесса, а также итерации как внутри элементов, так и с возвратом к предыдущим элементам, в том числе к требованиям.

Итак, программа разработки крупной системы – это сложный комплекс работ, направленных на удовлетворение важной потребности пользователя. Этот комплекс включает множество дисциплин, предусматривает применение новых технологий, требует постепенно нарастающего выделения ресурсов и выполняется пошагово в соответствии с выделенным бюджетом и утвержденным графиком.

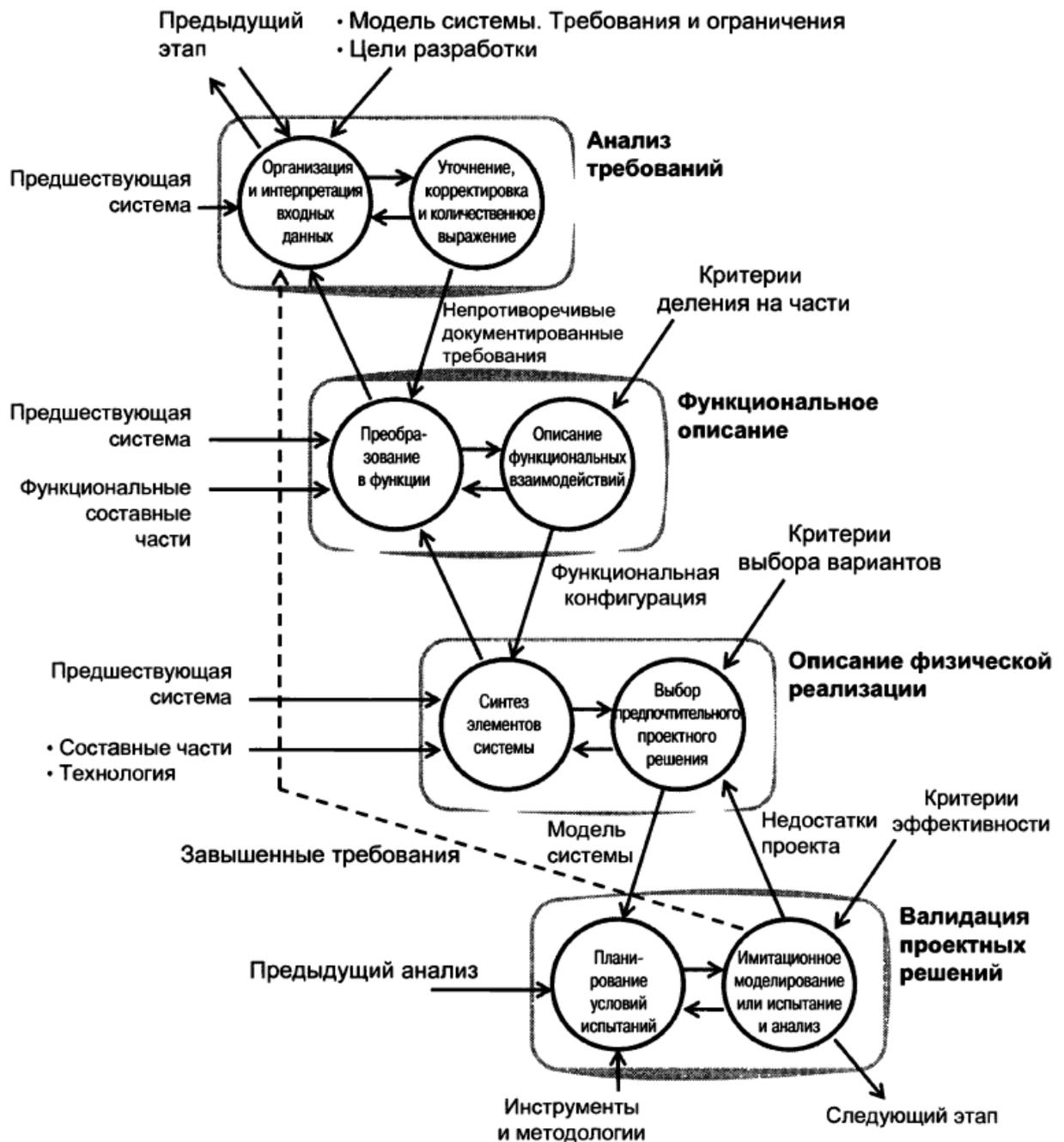


Рис. 12 – Блок-схема метода системной инженерии.

Как правило, новые системы вырастают из предшествующих им, поскольку функциональная архитектура и даже некоторые компоненты последних могут быть использованы повторно. Новая система постепенно «материализуется» в ходе разработки. Описания системы и проектные решения эволюционируют от концепции к реальности. Документы, графики, диаграммы, модели и продукция также претерпевают соответствующие изменения. Более того, ключевые участники разработки сменяют друг друга;

однако системная инженерия играет ключевую роль на протяжении всех этапов.

Итак, метод SE включает четыре основных шага.

1. Анализ требований - определяется, почему необходимы те или иные требования.

2. Функциональное описание - требования переводятся на язык функций.

3. Описание физической реализации - синтезируются альтернативные варианты физической реализации.

4. Валидация проектных решений - моделируется окружение системы.

Эти четыре шага применяются на каждом этапе разработки. Конкретный способ применения метода SE зависит от этапа ЖЦ по мере того как система материализуется, фокус смещается в направлении сверху вниз – с уровня системы (этап анализа потребностей) на уровень компонентов и деталей (этап технического проектирования).

### 2.3 Модельно-ориентированный подход в представлении систем.

Представление в оговоренном формате (нотации) объекта понимается как его модель. Модель – это искусственно созданное и применяемое представление объекта наблюдателем, записанное в заданных нотациях и символах, а моделирование – деятельность по формированию и применению моделей в исследовательских и прикладных целях. Модель имеет предназначение, например, составить представление о чём-либо; улучшить понимание предметной области и объекта рассмотрения; обеспечить нахождение допустимых рациональных параметров объекта; обеспечить соответствие устройства и поведения объекта требованиям и планам; обеспечить контроль при ведении деятельности и т.д.

При этом согласно ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» следует различать математическую модель – модель, в которой сведения об объекте

моделирования представлены в виде математических символов и выражений; компьютерную модель (электронную модель) – модель, выполненную в компьютерной (вычислительной) среде и представляющая собой совокупность данных и программного кода, необходимого для работы с данными; цифровую модель изделия – систему математических и компьютерных моделей, а также электронных документов изделия, описывающая структуру, функциональность и поведение вновь разрабатываемого или эксплуатируемого изделия на различных стадиях жизненного цикла, для которой на основании результатов цифровых и (или) иных испытаний по ГОСТ 16504 выполнена оценка соответствия предъявляемым к изделию требованиям.

Широкий спектр потенциальных применений означает, что предназначение используемых модели целесообразно идентифицировать и документировать. Модель формируется и применяется в ходе ведения деятельности. Для одного объекта могут создаваться много моделей с разными предназначениями.

Модель составных частей системы может быть полезной для определения действий, способных принести требуемые результаты функционирования системы, облегчить функциональную детализацию и описание отдельных функциональных возможностей, а также идентификацию интерфейсов между подсистемами и компонентами и визуализацию физической архитектуры системы.

Техника моделирования – один из основных инструментов SE, особенно в ситуации, когда собрать факты, поддающиеся однозначной интерпретации и имеющие количественное выражение, не получается. Воспользуемся техникой моделирования, чтобы описать логическую структуру модели типичной сложной системы в терминах ее составных частей. Цель такой модели – отобразить относительно простую и понятную архитектуру системы, которая может использоваться как отправная точка при обсуждении разработки новой системы и роли системной инженерии на протяжении этого

процесса. По своим масштабам эта модель не распространяется на суперсистемы или системы систем, но с ее помощью можно описать большинство систем, разрабатываемых путем комплексирования компонентов, приобретаемых на основе договора или соглашения - таких, например, как новый самолет или система управления воздушным движением в зоне аэропорта.

По своей природе сложная система обладает иерархической структурой, в которой можно выделить ряд крупных взаимодействующих элементов, называемых, как правило, подсистемами. Последние в свою очередь состоят из более простых функциональных объектов и т.д., вплоть до таких примитивных элементов, как шестерня, трансформатор или электрическая лампочка, которые обычно называют деталями. В число стандартных терминов, применяемых при описании различных архитектурных уровней в структуре системы, входят лишь «система» и «подсистема» для обозначения самых верхних уровней и «деталь» - для самого нижнего.

Для описания и представления систем различной природы (технических, организационно-технических, социально-экономических) всё шире используется модельно-ориентированный (Model Based, MB) подход. В частности, этот подход применяется в таких важных сферах, как системный инжиниринг (Model Based System Engineering, MBSE) [5, 7, 8, 21, 34], менеджмент (Model Based Management, MBM) [35], предприятие (Model Based Enterprise, MBE) [9, 17, 36], общая методологии искусственных систем (Model Based Systems, MBS) [8, 21, 37].

В парадигме MB создание и использование унифицированных моделей инженерно-технических систем является:

- важным инструментом упорядочения, смысловой унификации и обобщения представления знаний об объектах;
- формой обмена информацией между специалистами, инженерами и менеджерами;
- способом построения исполнительных систем.

Унифицированные модели используются для проработки и представления ситуации «как было» и «как есть»; представления и проектирования искусственных объектов; организации и управления исполнением деятельности. При этом одновременно используются разные методы и перспективы моделирования, дополняющие друг друга, гармонизированные между собой и направленные на удовлетворение интересов различных субъектов. Гармонизированные сборки частных моделей образуют метамоделю и интегрируют описания сложных систем

Основополагающая идея MBSE состоит в том, что модель системы разрабатывается на ранних стадиях процесса и эволюционирует в ходе ЖЦ разработки системы, до тех пор, пока не превратится, по сути дела, в прототип. На ранних стадиях ЖЦ модель еще недостаточно точна и используется главным образом для принятия стратегических решений. По мере продвижения разработки уровень качества модели растет, и в конце концов она становится пригодной для использования в проектировании. И наконец, модель еще раз трансформируется – на этот раз в прототип.

Хотя MBSE подход может показаться похожим на традиционный подход системной инженерии, между ними существует несколько важных отличий. И самое главное – это порождаемые результаты. В традиционной системной инженерии (в том числе в любом варианте структурного анализа или объектно-ориентированного подхода) основными результатами, получаемыми на ранних стадиях ЖЦ разработки системы, являются документы. Не важно, электронные это документы или бумажные, – они выступают в роли статического представления системы. В MBSE основными результатами являются модели, которые до некоторой степени исполняемы. Таким образом, анализ MBSE (на каком бы этапе ЖЦ он не проводился) сводится к анализу совокупности моделей, а этот процесс можно автоматизировать. Напротив, анализ традиционных артефактов системной инженерии заключается в основном в чтении текстов и диаграмм (хотя

современные представления и дисплеи существенно упрощают эту процедуру).

Была сформирована группа INCOSE MBSE Focus Group [1, 37], чтобы найти и документировать продукты, в которых MBSE подход реализован полностью или частично. В частности, Объектно-ориентированный метод системной инженерии INCOSE (Object-Oriented Systems Engineering Method - OOSEM) [1, 38]. Реализован с использованием SysML [1, 39] для поддержки специфицирования, анализа, проектирования и верификации системы. Базовый набор операций порождает артефакты, которые можно уточнять и использовать в других приложениях. Эти операции и артефакты перечислены ниже:

- а) анализ потребностей заинтересованных сторон;
- б) определение требований к системе;
- в) определение логической архитектуры;
- г) синтез вариантов архитектур, порождаемых логической архитектурой (allocated architectures);
- д) оптимизация и оценка альтернатив;
- е) валидация и верификация системы.

MBSE – это формализованное применение моделирования для поддержки системных требований, проектирования, анализа, верификации и валидации, начинающееся на этапе концептуального проектирования и продолжающееся на этапах разработки и более поздних этапах ЖЦ [1, 4, 9, 21]. Отличительной чертой подхода MBSE является то, что модель представляет собой основной артефакт процесса системной инженерии. Фокус на разработке, управлении и контроле модели системы – это переход от традиционного подхода на основе документов к системной инженерии, где акцент делается на создании и контроле документации о системе. Используя системную модель в качестве основного артефакта, MBSE предлагает потенциал для повышения качества продукта, улучшения повторного использования артефактов моделирования системы и улучшения

коммуникаций между командой разработчиков систем. Это, в свою очередь, предлагает потенциал для сокращения времени и затрат на интеграцию и тестирование системы, а также значительного сокращения затрат, времени разработки и рисков при внедрении системы.

## 2.4 Типология моделей в инжиниринге технических систем. Метамоделирование.

Системные инженеры всегда использовали множество видов моделей, включая функциональные модели для поддержки разработки требований, имитационные модели для анализа поведения систем и другие аналитические модели для анализа различных аспектов системы, таких как надежность, безопасность, массовые свойства, энергопотребление и стоимость. Однако эта дисциплина по-прежнему в значительной степени опирается на артефакты на основе документов для сбора большей части информации о спецификации и дизайне системы, такой как требования, документация по управлению интерфейсом и описания дизайна архитектуры системы. Эта информация часто разбросана по множеству различных документов, включая текст, неформальные чертежи и электронные таблицы. Этот подход к системной инженерии на основе документов страдает от недостатка точности, несоответствий между артефактами и сложностей в поддержании и повторном использовании информации.

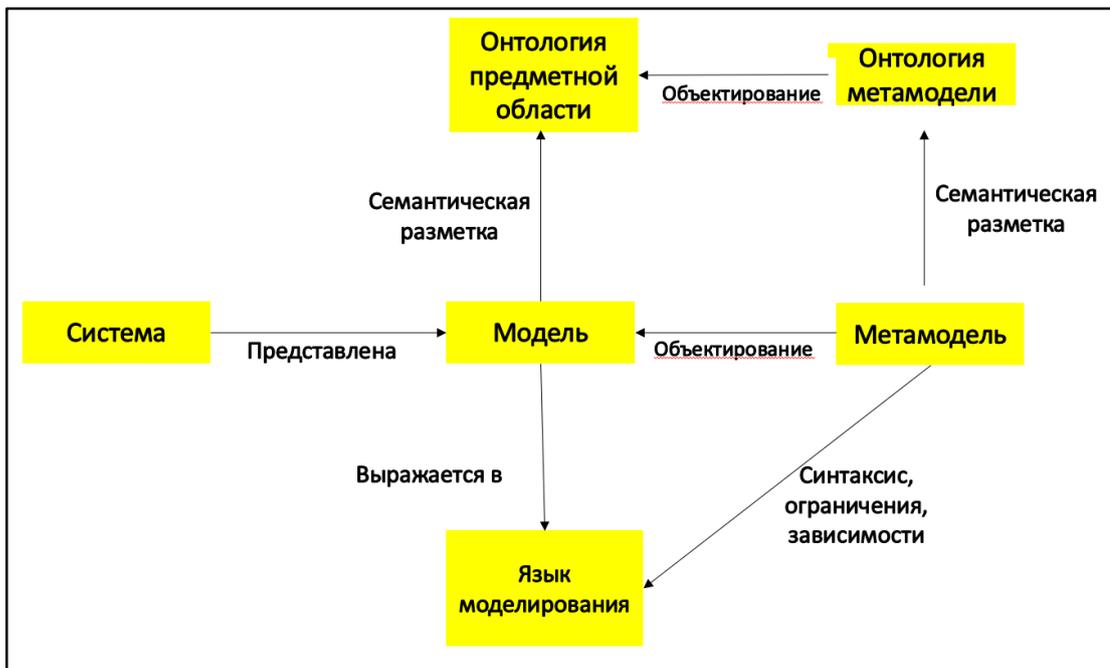
MBSE включает в себя разнообразный набор описательных и аналитических моделей, которые могут применяться на протяжении всего жизненного цикла, от моделирования системы систем (SoS) до моделирования компонентов. Типичные модели могут включать описательные модели архитектуры системы, которые используются для спецификации и проектирования системы, и аналитические модели для анализа производительности системы, физических характеристик и других качественных характеристик, таких как надежность, ремонтпригодность, безопасность и стоимость.

При этом общий анализ применения моделей в инженерной практике позволяет выделить несколько важных общих моментов:

- Модели отвечают на ряд конкретных вопросов о предметной области.
- Интерпретация модели требует понимания ее терминологии.
- Четко определенный и согласованный словарь снижает путаницу в интерпретации модели.
- Модельные словари, основанные на специальной терминологии, могут привести к неверным предположениям о значении модели, что приведет к ошибкам в интерпретации.

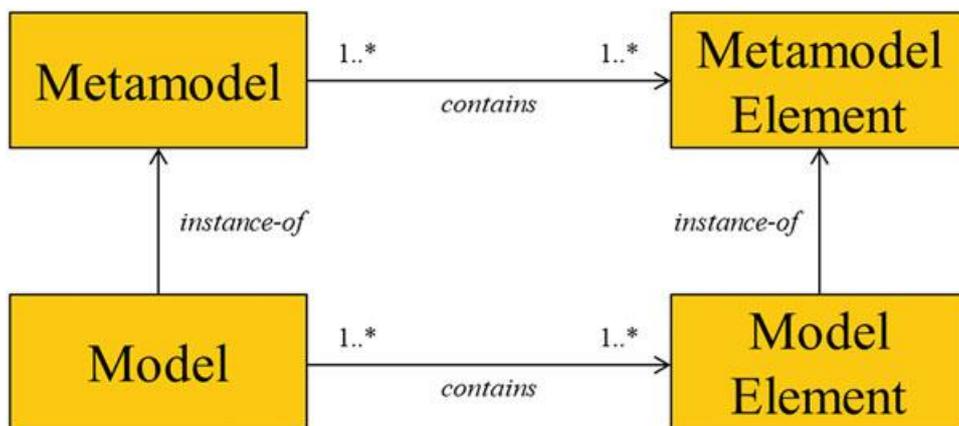
Метамоделли определяют абстрактный синтаксис языка моделирования, используемого для выражения моделей в интересующей области. Метамоделли включают в себя общие типы объектов, отношения между типами объектов, атрибуты типов объектов и правила объединения объектов и отношений. Модели представляют собой семантическое отображение онтологии домена в систему, в то время как метамоделли являются основой онтологий метамоделей, используемых для определения онтологии домена [19]. Метамоделли могут быть определены иерархически, то есть мета-метамоделль может определять терминологию метамоделли, то есть метамоделль является образцом (примером) мета-метамоделль. Например, связь существует между двумя сущностями, когда одна из сущностей является примером другой, то есть является членом или создан из другого субъекта. Так «собака» это экземпляр домашнего животного, и наследует свойства «домашний питомец».

Как показано на рис. 13, система представлена моделью, которая является экземпляром метамоделли. Модель выражается на языке моделирования, который использует синтаксис, семантику, ограничения и шаблоны, определенные метамоделью. Существует семантическое отображение метамоделли в онтологию метамоделли, которая является специализацией концепций метамоделли, необходимых для создания экземпляра онтологии домена.



**Рис. 13** – Отношения модели, метамодели и онтологий

В строгой метамодели, если элемент модели  $m_i$  является экземпляром модели  $m_j$ , то каждый элемент в  $m_i$  должен быть экземпляром некоторого элемента в  $m_j$ . В модели, включающей  $L$  уровней,  $m_0, m_1, m_2, \dots$  и  $m_{L-1}$ , каждый элемент модели уровня  $m_i$  должен быть уникальным экземпляром модели уровня  $m_{i+1}$  для всех  $i < L-1$ , и любая другая связь, отличная от связи экземпляра между двумя элементами  $m_j$  и  $m_k$ , подразумевает, что *уровень* ( $j$ ) = *уровень* ( $k$ ), как показано на рис. 14.



**Рис. 14** – Строгая метамодель

Свободное или неоднозначное метамоделирование не следует строгим правилам, позволяющим размещать элементы модели там, где это необходимо. Свободное метамоделирование может упростить разработку, но есть два важных побочных эффекта:

Свободное назначение элементов допускает наследование, ассоциации и другие отношения, выходящие за границы метауровня, что ухудшает целостность модели, если элементы модели сгруппированы в подгруппы схожего назначения.

Что еще более важно, свободное метамоделирование подрывает устоявшиеся объектно-ориентированные декомпозиции, в которых инстанциация (создание экземпляров) может находиться на том же уровне, что и метамодель, экземпляром которой она является.

При подходе «сверху вниз» метамоделирование системы S начинается с представления рассматриваемой предметной области, представления и позиционирования целевой системы (миссия, функции, состав) и её внешней среды, представления и позиционирования других существенно важных для рассмотрения объектов. Затем эти описания детализируются (фаза редукции и анализа) и вновь собираются (фаза синтеза) в моделях. При более широком рассмотрении в моделировании возможно применение трех разных подходов:

**Аналитический (дедуктивный) подход «сверху вниз»,** фокусирующийся на моделировании от целого (уровень системы S) к частному (уровень подсистем S).

**Синтетический (индуктивный) подход «снизу-вверх»,** фокусирующийся на моделировании и накоплении решений от частного к общему.

Ситуационное применение обоих подходов – **вертикальное итерационное моделирование**, в ходе которого разработчики стремятся добиться поэтапного понимания и комплексного структурирования объекта и методик моделирования путем расчленения общей задачи на частные задачи, четкого их позиционирования и разграничения друг от друга через понятные

интерфейсы с последующей интеграцией, по мере появления предпосылок, получаемых из локальных решений.

Во всех случаях в MBSE описания предметной области, систем и объектов формируются путем построения набора унифицированных и гармонизированных между собой моделей. А сами модели в подходе MBSE представляют один из ключевых способов записи знаний об объектах окружающего и проектируемого мира.

Таким образом, опорную структуру моделей MBSE можно упорядочить по принципу последовательности разработки [9, 40], представленной на рисунке 15.



**Рис. 15** – Опорная структура моделей MBSE

В этой «матрешке» каждый последующий тип моделей гармонизирован с предыдущими, наследует и дополняет их новыми дополнительными свойствами и характеристиками. Проекты разработки цифровых представлений сложных технических систем на базе MBSE начинаются с формирования онтологии предметной области, которые представляют собой справочник основных определений понятий, которые используются для создания архитектурных системных моделей целевых объектов. Такие модели представляют собой текстовые описания объектов в унифицированной форме

справочников, иерархически структурированных сущностей MBSE (требований, функций, компонентов и процессов) и матриц связанностей этих сущностей [9, 41,42]. Подчеркнем, что структура моделей, представленная на рис. 15, не противоречит структуре, сформулированной в ГОСТ по цифровым двойникам изделий [43].

## 3. Архитектурные модели системы

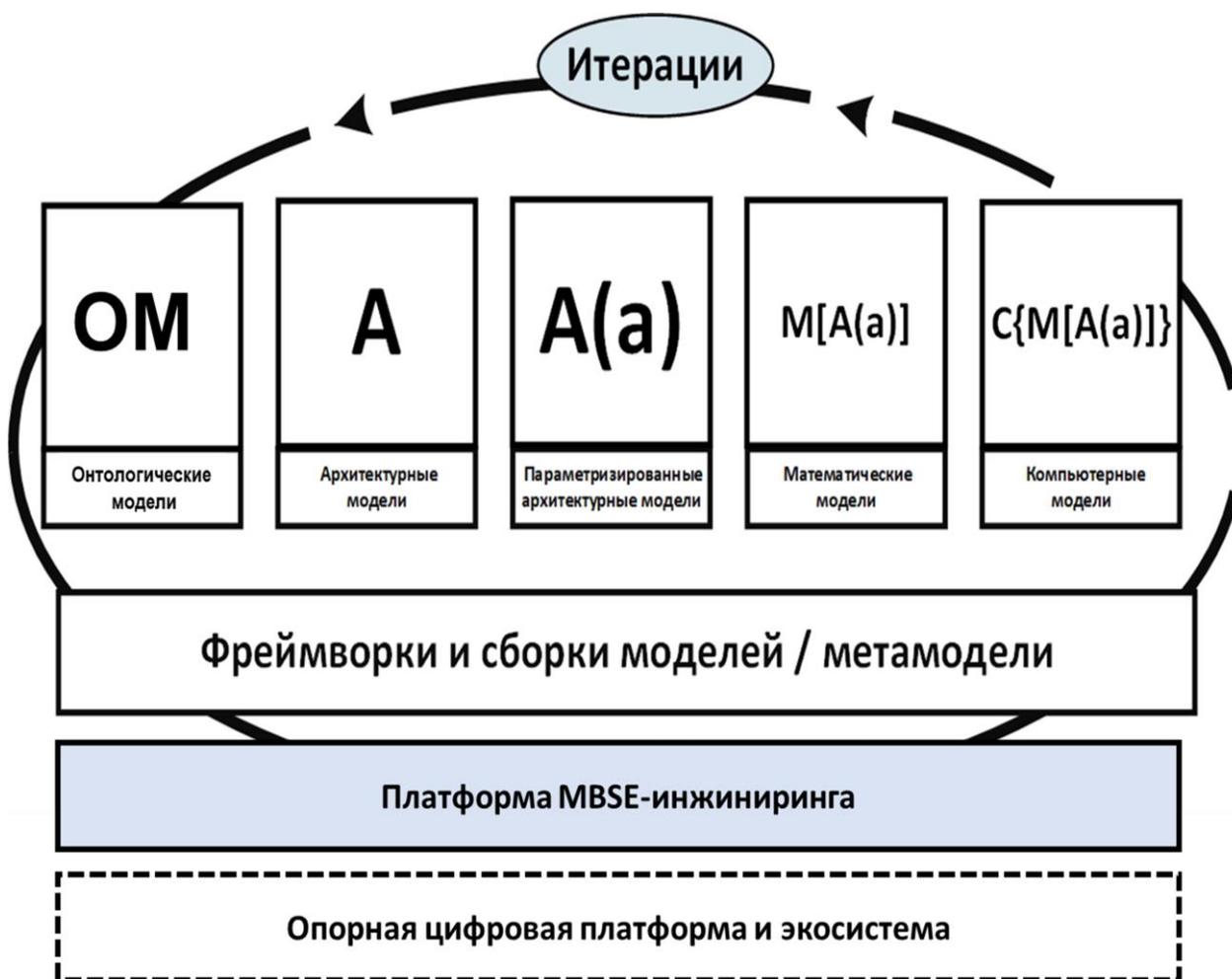
### 3.1 Опорная архитектурная модель.

Если максимально просто, то архитектура – это представление иерархии системы, её компонент и значимых связей между ними. По понятным причинам все связи учесть невозможно, поэтому выбирают и учитывают наиболее значимые. Уровни иерархии, учитываемые сущности и состав компонент системы задаёт архитектор системы на основе принятой политики моделирования. Значимые для рассмотрения связи по иерархии и на горизонтальных уровнях представления системы тоже идентифицирует и фиксирует архитектор. В этом приходится балансировать. Детализация должна быть достаточной для применений, но при этом, по возможности, минималистической по объему и по затратам. Описание также должно быть понятным по методологии и открытым для расширения. В итоге формируется то, что называется архитектурным представлением/архитектурной моделью устройства целевой системы. Оно делает устройство системы понятным и показывает структурный каркас, на основе которого развиваются дальнейшие представления системы.

Архитектурная модель системы дополняется путем формирования ситуационных параметров. Потом, возможно, снова уточняется архитектура. Потом, возможно, снова дополняются параметры. И так далее итерационно до получения приемлемого прикладного решения архитектура – дополняющие архитектурные представления ситуационные параметры. Так, действуя дедуктивно (сверху вниз), или индуктивно (снизу-вверх), или итерационно, архитектор системы идентифицирует с рациональной степенью детализации её описание.

Методология MBSE основана на упорядочивании методов и инструменты архитектурного моделирования целевых технических объектов как систем. Уже на начальных стадиях разработки подход позволяет

упорядочить представление структуры объектов и быстро формировать и оценивать облик рассматриваемого объекта, в рамках построения цифрового представления согласно общих подходов интеллектуальной цифровой экономики (рис.16) [44].



**Рис. 16** – Общая структура моделей MBSE

В состав опорных системных сущностей согласно MBSE подхода для представления создаваемой или существующей системы входят требования, функции, компоненты. При этом следует начинать с задания терминов и понятий, онтологии предметной области и целевой системы для однозначного представления указанных системных сущностей, принимаемых всеми ЗС.

Напомним, что онтологии – это контролируемые атрибутированные словари, которые включают согласованные наборы явно перечисленных, однозначных и избыточных терминов, отношений и ограничений,

необходимых для построения и интерпретации моделей [45-53]. Эти словари создаются с учетом вклада экспертов в предметной области и конфигурируются контролирующим органом, который создается ЗС. Онтологии являются основополагающими для MBSE и необходимы для определения области действия модели, ее создания и использования.

Онтологии имеют множество применений, включая следующие:

Распространение общего понимания того, как структурируется и именуется информация, среди таких субъектов, как ЗС и базы данных ПО.

- Поддержка повторного использования знаний в предметной области путем содействия специализации для нескольких предметных областей

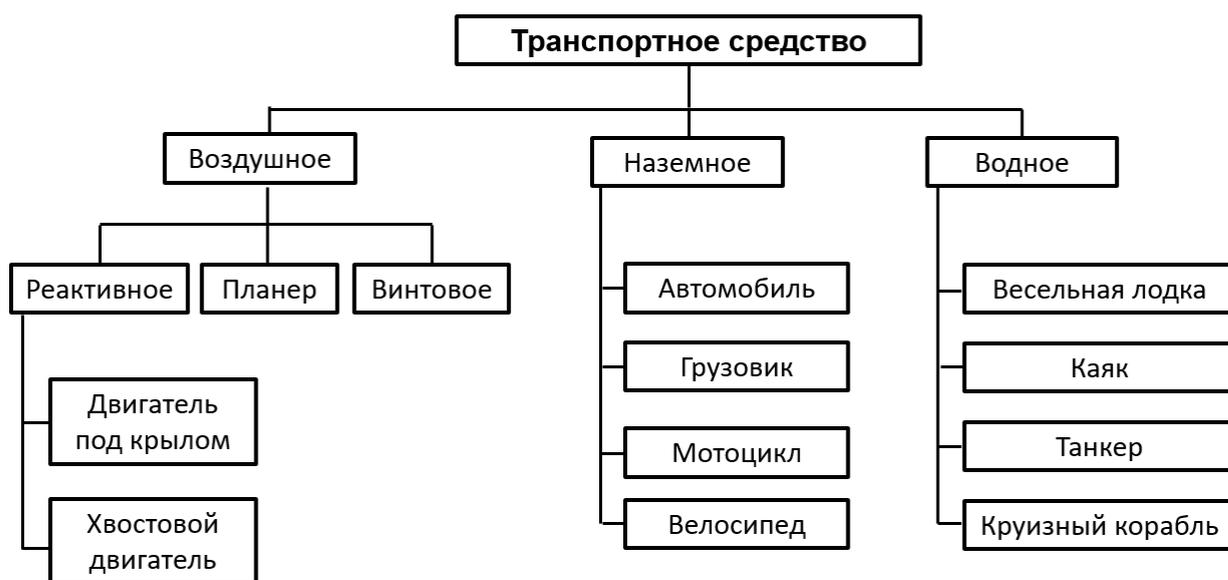
- Обеспечение необходимости явных предположений о предметной области, что снижает неоднозначность и упрощает внесение изменений, если они потребуются

- Разделение предметной области и операционных знаний, что позволяет создать систему из ее компонентов, независимую от компонентов и продуктов, которые она производит

- Обеспечение возможности рассуждения на основе знаний предметной области, когда онтология представлена формальными, декларативными утверждениями

Онтологии фиксируют соглашение об использовании терминологии и отношений, но не являются ни словарем, ни таксономией. Онтологии обеспечивают согласованную коммуникацию в семантической области, но не обязательно являются полными. Хотя термины таксономия и онтология иногда используются взаимозаменяемо, эти термины принципиально различны. Таксономии иерархически упорядочены и используются для наименования, описания и классификации терминов в области. Упорядочение таксономии определяется набором последовательных и однозначных правил. И наоборот, онтологии связывают концепции области с отношениями способами, которые поддерживают более глубокое понимание.

Например, рисунок 17 показывает часть таксономии транспортных средств [1]. Основная концепция «Транспортное средство» разлагается на конкретные типы транспортных средств: «Воздушное», «Наземное» и «Водное» транспортное средство. Эта таксономия может ответить на такой вопрос, как «Каковы типы Воздушные транспортные средства?» или «Какой тип транспортного средства Велосипед?». Однако эта таксономия не может ответить на вопрос: «Сколько пассажиров помещается в Весельной лодке?» без перечисления «Весельная лодка» – типы, основанные на вместимости, например. Другое перечисление, основанное на скорости и типе, необходимо, если мы хотим узнать, насколько быстро Весельная лодка может двигаться. Таксономии легко обходят с помощью бинарного и древовидного поиска и кластеризации.



**Рис. 17** – Пример таксономии транспортного средства

Онтологии — это концепции и отношения для определенной области, они более формальны и содержат больше информации, чем таксономии. Рисунок 18 показывает онтологию с использованием отношения «это есть», в которых субконцепции «Водное» транспортное средство, «Наземное» транспортное средство и «Воздушное» транспортное средство приобретают

свойства родительского понятия «Транспортные средства». То есть, модель, в которой создается экземпляр «Воздушного» транспортного средства, будет иметь свойства «Грузоподъемность», «Ограничения по погоде» и «Максимальное расстояние» в дополнение к унаследованным свойствам «Тип двигателя», «Тип управления» и «Использование». Свойства концепции могут быть ограничены по мере необходимости.



**Рис. 18** – Пример онтологии транспортного средства

На рисунке 19 представлены экземпляры для типа «Транспортное средство», которые называются «Весельная лодка Тип 1» и «Весельная лодка Тип 2». Как показано на рисунках 18 и 19 общими компонентами онтологий являются концепции, отношения, экземпляры, аксиомы, ограничения и правила.

Концепции представляют собой вещи или наборы вещей в семантической области. Боксер – это концепция в области собака. Прimitивные концепции – это те, которые имеют только необходимые условия для принадлежности к классу, например, все члены класса, млекопитающее, должны иметь волосы, три косточки среднего уха, молочные железы и неокортекс (новые области коры головного мозга, которые у низших млекопитающих только намечены, а у человека составляют основную часть коры). Животное, у которого отсутствует любое из этих свойств, не может быть млекопитающим. Определенные концепции – это свойства, которые

являются как необходимыми, так и достаточными для принадлежности к классу. Условие, что рост взрослого человека составляет  $> 1,5$  м, является необходимым и достаточным условием класса, «рост более 1,5 метров».

<b>Водное ТС: Весельная лодка Тип 1</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Тип корпуса: Дерево – сосна</li><li>• Осадка: 60 см</li><li>• Максимальная скорость: 3 узла</li><li>• Вместимость: 2 человека</li><li>• Тип двигателя: Весло каноэ</li><li>• Тип управления: Ножной руль</li><li>• Использование: Перевозка людей</li></ul>	<b>Водное ТС: Весельная лодка Тип 2</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Тип корпуса: Дерево – дуб</li><li>• Осадка: 75 см</li><li>• Максимальная скорость: 3,5 узла</li><li>• Вместимость: 4 человека</li><li>• Тип двигателя: Пара весел</li><li>• Тип управления: Руль на корме</li><li>• Использование: Перевозка людей</li></ul>
---	--

**Рис. 19** – Примеры экземпляров онтологии транспортного средства

Отношения – это ассоциации (связи), созданные между сущностями и экземплярами сущностей. Отношения могут определять родительские/дочерние ассоциации, потоки от источника к месту назначения, композицию, распределения, декомпозиции и многое другое.

Экземпляры – это конкретные или абстрактные вещи, представленные концепцией. В строгом смысле, поскольку онтологии являются концептуализациями предметной области, они не должны включать экземпляры. Онтология и связанные с ней экземпляры называются базой знаний. В некоторых ситуациях определение того, является ли вещь концепцией экземпляра, является сложным и зависит от предметной области и ее применения. В космическом корабле приемник GPS может представлять собой общий класс приемников GPS или может быть экземпляром устройства для определения времени и местоположения.

Аксиомы – это утверждения, ограничивающие значения класса и экземпляра. Например, можно потребовать, чтобы космический корабль имел размеры меньше  $x$ ,  $y$  и  $z$ , чтобы поместиться в определенный обтекатель ракеты-носителя.

Ограничения определяют, что должно быть истинным для принятия утверждения в качестве входных данных. Время запуска космического

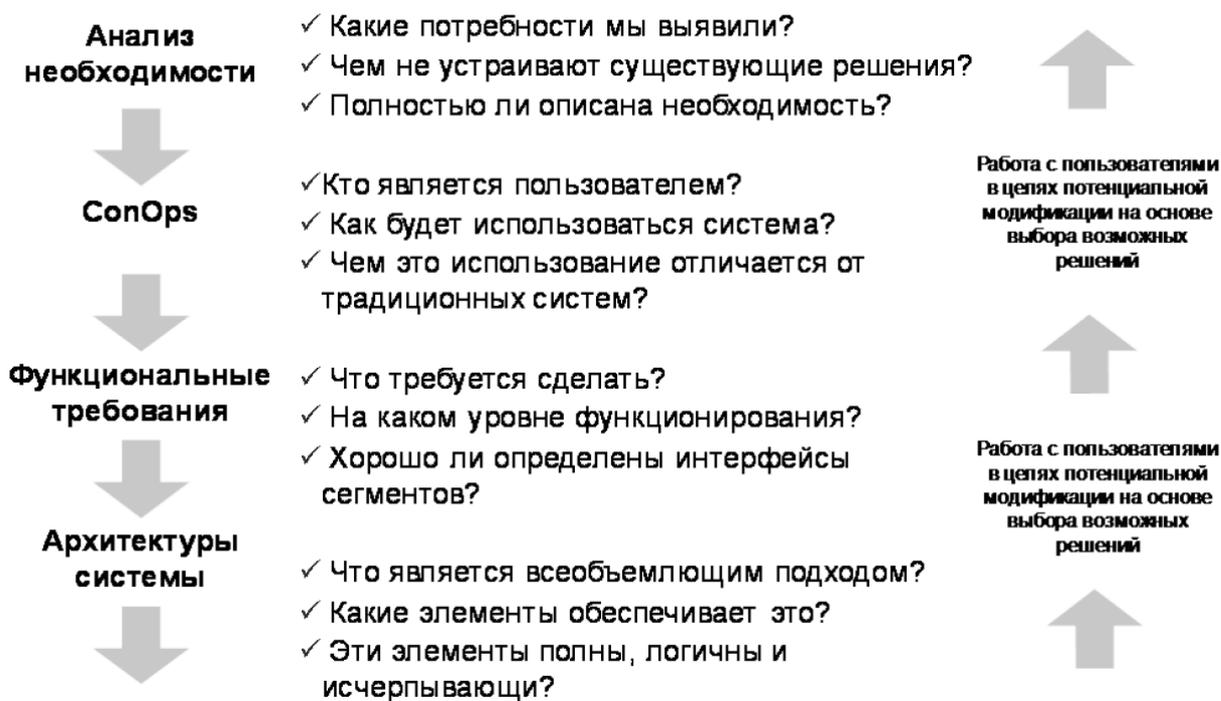
корабля должно произойти в пределах окна запуска, которое позволит избежать столкновения с космическим мусором.

Правила – это утверждения-гарантии, описывающие логические выводы, сделанные из утверждений. Если мы утверждаем, что космический корабль помещается в определенный обтекатель, то его размеры меньше конкретных  $x$ ,  $y$  и  $z$ .

### 3.2 Системные архитектурные модели. Атрибутирование архитектуры.

Важно понимать применение MBSE для концептуальной системной архитектуры в которой выбор системной архитектурной модели является фундаментальной деятельностью при реализации сложных технических систем. Существует взаимосвязь системного инжиниринга и системной архитектуры как науки и искусства, а также то, что разработка архитектуры – это индуктивный процесс, основанный на эвристическом осмыслении и опыте системного инженера, создающего архитектуру системы, которого иначе называют системным архитектором. Архитектура системы представляет основополагающая и единая структура системы, определенная в том числе, в терминах элементов системы, интерфейсов, процессов, ограничений и принципов действий. Архитектуру системы представляет иерархическую структуру основных сущностей системы (требования, функции, компоненты), их взаимосвязей и принципов, а также правил управления их проектированием и эволюцией во времени [2].

Разработка проекта архитектуры системы представляет собой рекурсивный итерационный процесс, выполняемый для каждого уровня иерархии системы (рис. 20). В центральной части рисунка 20 сформулированы вопросы, на которые необходимо дать исчерпывающие ответы при разработке соответствующих проектных решений.



**Рис. 20** – Разработка системной архитектуры системы – рекурсивный итерационный процесс [2].

При разработке архитектуры системы происходит разделение системы на элементы или модули (сегменты, подсистемы, комплексы, подкомплексы, компоненты, части) [2, 3]. В процессе разработки принимаются решения о том, как должны быть выстроены и скомбинированы физические компоненты системы, чтобы обеспечить выполнение предписанных системе целевых функций. Таким образом, можно сказать, что архитектура системы – это промежуточный результат системной разработки (см. рис. 16), появляющийся на выходе концептуального проектирования и онтологического инжиниринга [54-59]. Архитектура системы определяет связь между анализом необходимости создания системы, описанием проекта, функциональным анализом и первым описанием предлагаемой структуры разрабатываемой системы в терминах того, что она должна делать, а также существующих интерфейсов.

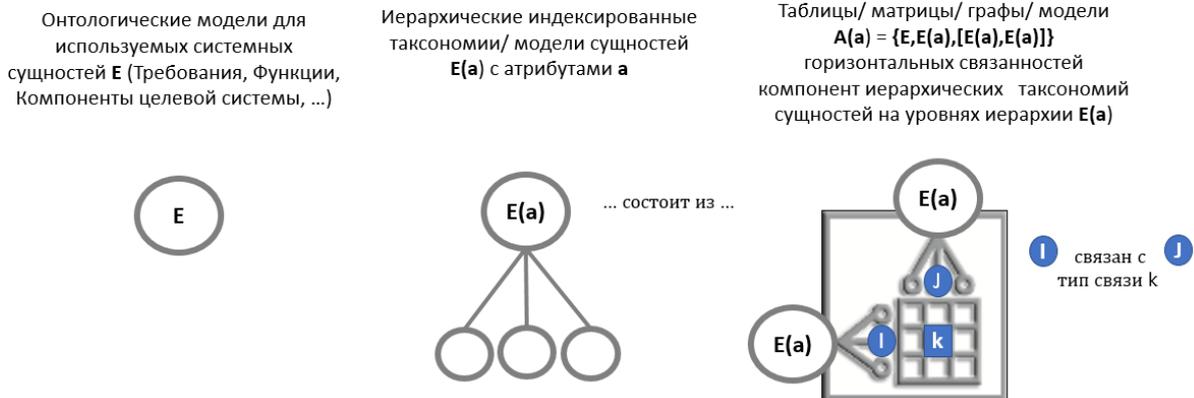
Выбор подхода к разработке архитектуры систем является первоочередной задачей. Обычно подход определяется иерархическим уровнем разрабатываемой системы. Так, например, для деталей (изделий)

различают четыре основных типа архитектур: функциональную, эксплуатационную, техническую и физическую. Функциональная архитектура описывает, как работает предлагаемая система; эксплуатационная – как ее видит обслуживающий персонал; техническая архитектура включает нормативную базу разработки: существующие стандарты, интерфейсы и базовые операции, в то время как физическая архитектура определяет, какие технические средства использованы и где они расположены.

Описание архитектуры всей сложной системы рекомендуется рассматривать на основе рассмотрения базовых сущностей представления системы таких как: требования к системе, функции системы, компоненты системы, работы по созданию компонентов системы и, по необходимости, учета других сущностей. В этом случае шаги по созданию архитектуры системы начинаются с определения предметной области и создания онтологии – взаимоувязанного представление терминов и понятий предметной области, т.е. результата онтологического инжиниринга предметной области. Примерная схема показана на рисунке 21, который является развитием общей структуры моделей MBSE, представленной на рисунке 16. Следует обратить внимание на то, что шаги по созданию архитектуры системы и атрибутированной архитектуры системы разделены. Это сделано намеренно в рамках общего итерационного процесса разработки технической системы, т.к. следует утвердить среди ЗС архитектуру на уровне структуры сущностей и только затем нагружать ее атрибутами.

На рисунке 21 представлен тот факт, что согласно MBSE подходу до математического моделирования, алгоритмов и автоматизации необходимо структурирование онтологических представлений системы в форме архитектурных моделей  $A(a) = \{E, E(a), [E, E(a)]\}$

**Подход MBSE: до математики, алгоритмов и автоматизации –  
структурирование вербальных представлений целевой системы в форме  
архитектурных моделей  $A(a) = \{E, E(a), [E(a), E(a)]\}$**



**Рис. 21** – Пошаговый процесс разработки системной архитектуры. Политики и дорожные карты моделирования и применения моделей в MBSE.

Усилия по созданию целевой системы на базе MBSE подразумевают, что предметная область и цель системы должны быть четко определены. При этом системные архитектурные решения должны соответствовать этим целям и служить поддержкой принятия решений по разработке целевой системы. Мероприятия по разработке системной архитектуры реализуются итерационно и могут включать представление потенциальных архитектур, определение архитектурных решений, проведение анализа в поддержку возникающих архитектурных решений, принятие архитектурных решений на основе результатов анализа, фиксация решений для следующей итерации архитектуры. Основным результатом действий, выполняемых на концептуальных этапах системной инженерии, которые определяют целостный взгляд на всю систему также может иметь архитектурный вид. В этом случае архитектура системы — это описание структуры и поведения системы, которые совместно обеспечивают одну или несколько функций для удовлетворения потребностей ЗС системы. Описания архитектуры должны поддерживать коммуникацию между системными архитекторами и другими ЗС. Успешная коммуникация использует языки, понятные и принятые каждым участником этой коммуникации. Поэтому системным архитекторам необходимо определить

состав ЗС, почему они являются ЗС и какие языки описания архитектуры лучше всего подходят для коммуникации с этими ЗС.

Описания архитектуры должны выражать архитектуру системы [1], что означает описание того, как выбранные решения решают проблемы, для разрешения которых создается система и почему были выбраны эти решения. Для этой цели описания архитектуры включают четыре основных элемента описания архитектуры:

- принципы коммуникации с точки зрения архитектуры;
- архитектурная точка зрения на систему (ее структуризация);
- возможности по трассировке (отслеживая) эволюции архитектуры;
- обоснования архитектурных решений.

В идеале описание архитектуры включает каждый из вышеупомянутых четырех элементов описания архитектуры. Экономические соображения могут привести к исключению некоторых из них. Как минимум описание архитектуры должно представлять понятную всем ЗС картину и определять:

- общую структуру разрабатываемой системы;
- контекст системы;
- рассматриваемые элементы системы;
- заинтересованные стороны;
- реализуемые требования

Принципы коммуникации с точки зрения архитектуры определяют, как передавать архитектуру. Коммуникация использует виды визуализации, определяющие, как что-то должно быть представлено. Виды визуализации могут быть строительными блоками языков описания архитектуры, и они определяют коммуникацию только о части архитектуры, формулируя требования или проблемы. Принципы управляют связанными представлениями архитектуры, определяя, как представлять оформленную часть архитектуры. Связь между точками зрения архитектуры и ЗС является косвенной и может быть выведена из оформленных требований или проблем и выбранных видов визуализации. Требования связаны с ЗС, а ЗС понимают

определенные визуализации, управляемые выбранными видами визуализации, которые подходят для коммуникаций. Поэтому системным архитекторам необходимо будет оценить, какие архитектуры необходимы и достаточны для успешных коммуникаций. Хорошая практика требует документирования обоснований оценки и выбора точек зрения архитектуры. Такие архитектурные фреймворки поддерживают системных архитекторов в этом отношении, явно связывая архитектуры с ЗС.

Помимо декомпозиции системы на подсистемы архитектурные описания расширяются посредством уточняющих, по возможности типовых дополнительных характеристик. Т.е., например, строится иерархическая структура не только для подсистем, но и следующих сущностей целевых систем: требования к системе – отражают ожидания потребителей и заказчиков; функции системы – отражают предназначения системы или ее компонент; компоненты системы (подсистемы) – части системы, обеспечивающие выполнение тех или иных функций; работы по созданию системы и т. д. – обеспечивают создание компонент и системы в целом. В зависимости от объекта и решаемой задачи этот список может корректироваться и пополняться. Это означает, что применяются такие архитектурные иерархические декомпозиции – EBS (Entities Breakdown Structure) сущностей E (рис. 21) [9]:

требований к системе – модель RBS, Requirement Breakdown Structure;

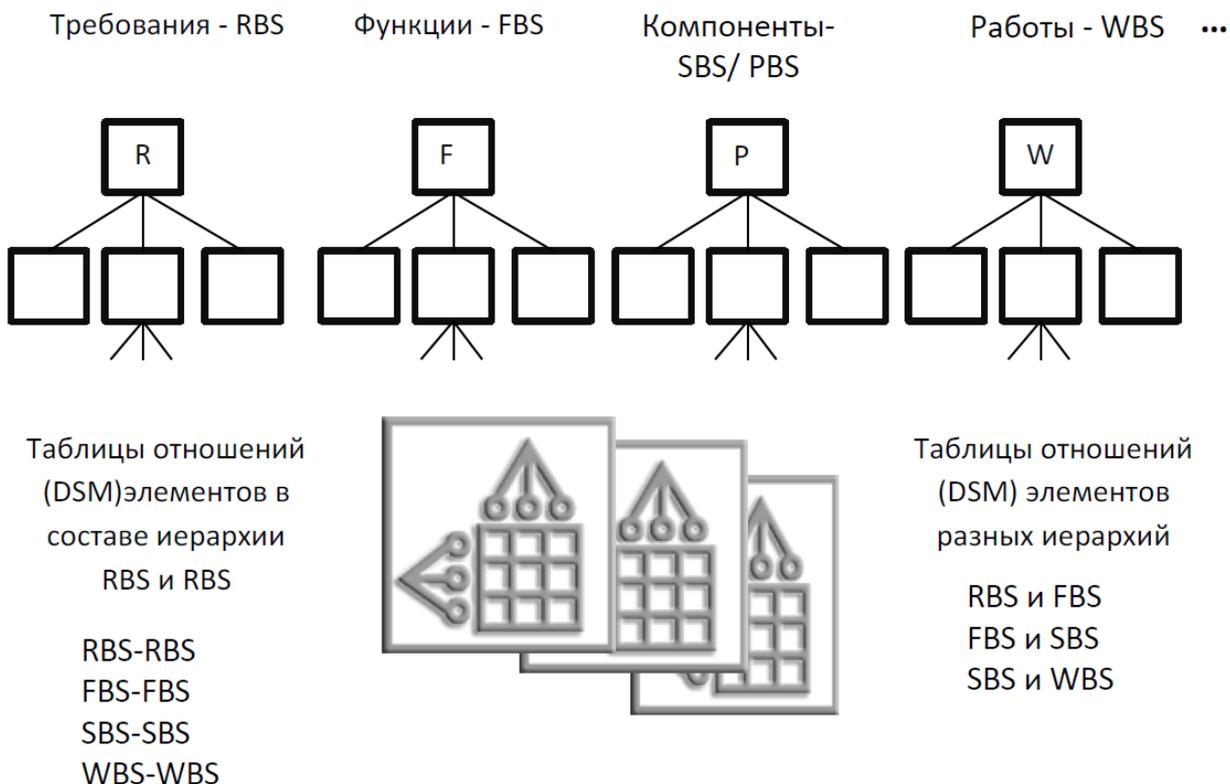
функций системы (функциональные требования) – модель **FBS, Function Breakdown Structure**;

компонент системы (подсистемы), обеспечивающих исполнение требований и функций, – модель **SBS, System Breakdown Structure**;

работ по созданию системы – модель **WBS, Work Breakdown Structure**;

Примеры иерархических декомпозиций сущностей и их связанностей представлены на рисунке 22.

## Иерархические декомпозиции сущностей



**Рис. 22** – Примеры иерархических декомпозиций сущностей и их связанностей.

Системная архитектура, как и гражданская архитектура, является одновременно наукой и искусством и должна отвечать на следующие вопросы, включая четкое указание того, что находится за пределами границ [1]:

1. Какие функции должны, должны, не должны и не должны быть зафиксированы?
2. Может ли инспекция интересующих нас функций привести к переформулировке проблемы? Если да, то насколько общей должна быть модель?
3. Какие компоненты следует и не следует захватывать?
4. Как определить, является ли кто-то ЗС и следует ли его включать?
5. Как мы оцениваем синергию или конфликты в данной архитектуре?

6. Какие идеи получены в процессе проектирования, помимо набросков выбранной архитектуры, и как мы сохраняем эти идеи, чтобы в дальнейшем использовать их в процессе проектирования?

7. На каком уровне детализации достаточно разложить интересующую систему по отношению к контексту и конкретным потребностям ЗС?

Основная роль системного архитектора заключается в принятии решений, а принятие решений является сутью архитектуры, однако все больше архитектурных решений принимаются в группах, и роль архитектора становится заключающейся в содействии, модерировании, информировании и регистрации архитектурных решений. Это понятие подчеркивает важность подходящей платформы, которая будет помогать системному архитектору на протяжении всего процесса принятия архитектурных решений. Возможности поддержки принятия решений включают управление информацией, формулирование, рекомендации, выбор, выполнение и обучение [60, 61].

### 3.3 Матрицы взаимного влияния сущностей

Иерархические описания дополняются в архитектурных моделях описанием связанностей между компонентами иерархий (сущностями) – матрицы взаимного влияния сущностей (МВВС). Связи между элементами сущностей иерархических моделей EBS устанавливают в виде таблиц отношений. Отношения могут быть установлены между компонентами одной и той же сущности (таблицы отношений вида компоненты иерархий «сами на себя», их ещё называют таблицами N – квадрат), рисунок 22 слева:

- RBS-RBS;
- FBS-FBS;
- SBS-SBS;
- WBS-WBS.

Отношения могут быть установлены между компонентами иерархий разных сущностей, рисунок 22 справа:

- RBS-FBS;

- FBS-SBS;
- SBS-WBS.

Тем самым через связности компонент разных иерархических моделей частные модели собираются и увязываются в «большие» метамоделли. При необходимости могут учитываться и связи компонентов с внешней средой, онтологии, термины используемых для описания целевой системы.

Искусственные системы проходят свои жизненные циклы (разработка, применение, модернизация или утилизация). Архитектурные модели и метамоделли применяются по всему ЖЦ искусственных объектов.

Способ, которым системные архитекторы обычно декомпозируют высокоуровневую системную архитектуру, оказывает огромное влияние на сложность интерфейса систем. В существующей практике системы структурируются на основе эмпирических знаний системных архитекторов и преобладающей архитектуры организаций, ответственных за разработку систем. Каждая сложная социотехническая система должна быть разложена и уравновешена по уровням иерархии и на каждом уровне архитектура системы демонстрирует определенный уровень сложности. Согласование сущностей на каждом уровне с модулями на уровне выше может помочь снизить сложность всей системы в целом, сделав ее более управляемой. При этом использование межуровневой и внутриуровневой МВВС является основой реализации этого подхода, помогая согласованию сущностей на разных уровнях, а затем выявляет проблемные взаимодействия, которые могут создавать проблемы при системной интеграции [42, 62].

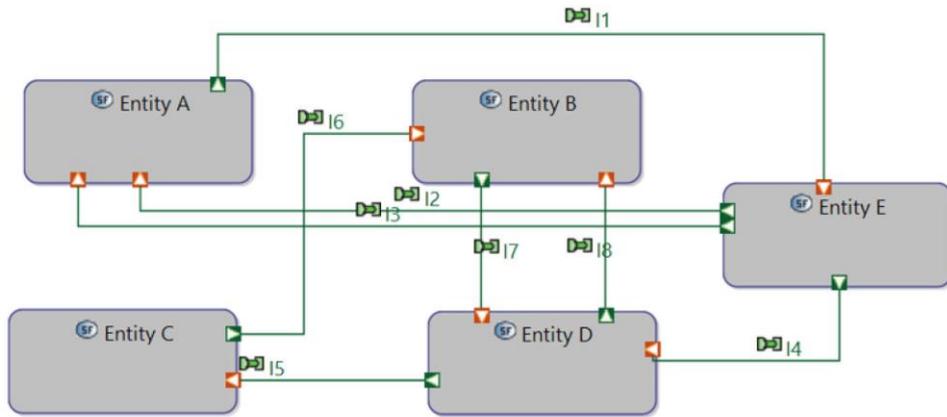
Декомпозиция системы была ключевой стратегией, которая используется для управления сложностью системы. На самых ранних этапах жизненного цикла системные архитекторы сталкиваются с двумя ключевыми решениями для иерархии сущностей: определение количества уровней и элементов на каждом уровне, используемых при декомпозиции системы (т.е. разбиения системы на части). Решение об архитектурной декомпозиции влияет на различные аспекты системы, включая внутренние интерфейсы,

механизмы интеграции, стоимость внедрения, график внедрения, операционные услуги, системную сложность, а также подходы к верификации и валидации.

Разработка архитектуры систем раньше считалось скорее искусством, чем наукой, однако в последние годы предпринимались целенаправленные усилия по включению науки в практику разработки системной архитектуры [72, 77, 82, 89, 92, 115]. Матричные методы, такие как MBVC, обеспечивают формальную конструкцию для анализа системных архитектур. В частности, матричный анализ предлагает средства для сбора и оценки архитектур в количественном выражении. Данные в матричном формате поддаются машинной интерпретации. Кроме того, матричные архитектурные методы позволяют использовать достижения в области машинного обучения и анализа данных.

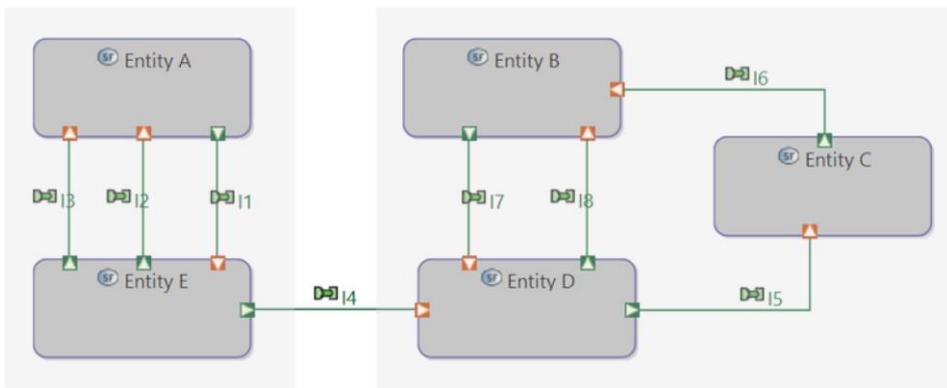
Кроме того, компактная матричная форма пригодна для представления сколь угодно больших систем. При матричных подходах системная архитектура дополняется в виде  $N \times N$  квадратная матрица, в которой строки и столбцы представляют  $N$  сущности, в то время как элементы матрицы представляют взаимодействия между сущностями [63]. Матричное представление может быть настроено таким образом, чтобы отражать спецификации интерфейса, протяженность по времени, а также технические, социальные и экономические характеристики системных объектов. Чтобы исследовать взаимодействие человека с подсистемами, соответствующие части матрицы могут быть преобразованы в графическую форму для визуализации и анализа на основе графиков. Это отображение позволяет людям вносить свой вклад в анализ системных архитектур [19, 64].

На рисунке 23(а) представлена в виде блоков, а взаимодействия – в виде отрезков линий между блоками. Идентичная информация представлена в матричном представлении, где все объекты представлены именами строк и столбцов. Матричное представление является компактным и масштабируемым.



		A	B	C	D	E
Entity A	A	A				I1
Entity B	B		B		I7	
Entity C	C		I6	C		
Entity D	D		I8	I5	D	
Entity E	E	I2,I3			I4	E

(a)



		A	E	D	B	C
Entity A	A	A	I1			
Entity E	E	I2,I3	E	I4		
Entity D	D			D	I8	I5
Entity B	B			I7	B	
Entity C	C				I6	C

(b)

Рис. 23 – Примеры матрицы взаимного влияния сущностей [42].

Кроме того, с помощью матричного представления можно выполнять различные типы анализа. Например, изменяя последовательность элементов, можно найти лучший способ агрегирования компонентов и разложить архитектуру на два модуля, где взаимодействия являются внутренними по отношению к модулю, как показано на рисунке 23(b). Аналогично, возведя матрицу в квадрат, можно выявить косвенные взаимодействия и зависимости, но матричное представление, хотя и эффективно для компьютерного манипулирования, не является интуитивно понятным для людей. В этом случае определенный сегмент архитектуры может быть преобразован в графическое представление для просмотра человеком и взаимодействия.

Итак, в общем случае MBVC представляют собой квадратные матрицы с одинаковыми наименованиями (индексами) сущностей для столбцов и строк. На главной диагонали – пусто, т.к. сущности сами на себя не влияют. Все другие элементы показывают, как сущности влияют друг на друга. При этом могут использоваться различные шкалы: от простейших – 0 нет взаимного влияния, 1 – влияние есть. Отметим, что в общем случае MBVC не является симметричной.

В более сложных случаях при добавлении к иерархической архитектуре системы MBVC на пересечении ее строк  $i$  и столбцов  $j$  располагаются записи, характеризующие заданный вид отношений, например, ответственности – компонент  $i$  отвечает за исполнение функции  $j$ ; подчинения – компонент  $i$  доминирует над компонентом  $j$ ; отношения логики – исполнение функция  $i$  предшествует исполнению функции  $j$ . При этом для удобства виды связанностей  $k = (k_1, k_2, \dots)$  сущностей рекомендуется индексировать:  $k_1$  – это связанность типа 1;  $k_2$  – это связанность типа 2; и т.д. Так в MBVC связанность требований может быть: по общим ресурсам; по общим ограничениям; по общим целевым критериям и т.д. Связанность функций может быть: по логике последовательности выполнения функций; по связанностям в процессах передачи информации в процессе выполнения функций; по связанностям в процессах передача материальных потоков в

процессе выполнения функций; по связанным в процессах передача энергии в процессе выполнения функций и т.д.

Связанности компонентов системы должны быть представлены в МВВС аккуратно согласно терминологии, определенной в онтологической модели системы. Для разного вида компонентов могут быть существенными различные связанности: передача информации между компонентами системы; материальные потоки между компонентами системы; передача энергии между компонентами системы; связанность компонент по размерам, используемым материалам и т.д.

Модели архитектуры системы полезны, во-первых, при рассмотрении отдельных аспектов представляемой системы, во-вторых, при комплексном рассмотрении нескольких аспектов в увязке между собой. В первом случае они позволяют рассматривать структуру отдельных сущностей – требований, функций, компонентов, работ. Во втором – связанности и взаимовлияния этих сущностей. Так, задание требований влияет на выбор необходимых функций системы. Задание функций влияет на выбор компонентов системы. Увязка функций и компонентов в МВВС определяет связанности системы, ее физическую архитектуру. Использование МВВС позволяет отслеживать как изменения требований приводит к изменениям по всей этой цепочке связанностей сущностей. Может проявиться и обратный эффект влияния – от компонентов к функциям и требованиям. Так, если не удаётся по тем или иным причинам выполнение требований при намечаемой архитектуре системы, то можно попробовать переконфигурировать систему (иерархии, компоненты, связанности) или, если результат не достигается, скорректировать, по согласованию с ЗС, требования. Такие процедуры часто называют балансировкой архитектуры системы.

Состав и конфигурации метамоделей архитектуры определяются для прикладной задачи политикой моделирования. Начальный опорный пример архитектуры технической системы показан на рисунке 24. Включает как обликовые (ментальные, онтологические) представления – верхний слой на

рисунке 24, так и формализованные представления требований, функций, компонент, связанностей системы – второй и третий слои на рисунке 24.



**Рис. 24** – Примеры опорной метамодели архитектуры системы

Требования являются исходным описанием и определяют системную архитектуру, которая включает иерархическую структуру функций, компонентов и связанности функции-компоненты. Состав сущностей и учитываемых связанностей может расширяться. При этом расширение конфигурации модели опирается на идентификацию необходимости, возможности и предпосылки намечаемого расширения, способ применения расширенной модели архитектуры.

Следует особо отметить, что в случае наличия атрибутированной архитектуры сущностей совместно с МВВС появляется возможность представить связь между атрибутами сущностей, в первую очередь компонентов. Это служит основой для определения математических моделей, используемых в разрабатываемой системе, которые суть являются связью между атрибутами.

Кроме того, MBVC является инструментом для верификации иерархической архитектуры системы путем выявления в матричном представлении тех связей, которые могут быть не представлены в иерархической структуре.

## 4 Методология модельно-ориентированного системного инжиниринга

### 4.1 Основные компоненты методологии модельно-ориентированного системного инжиниринга

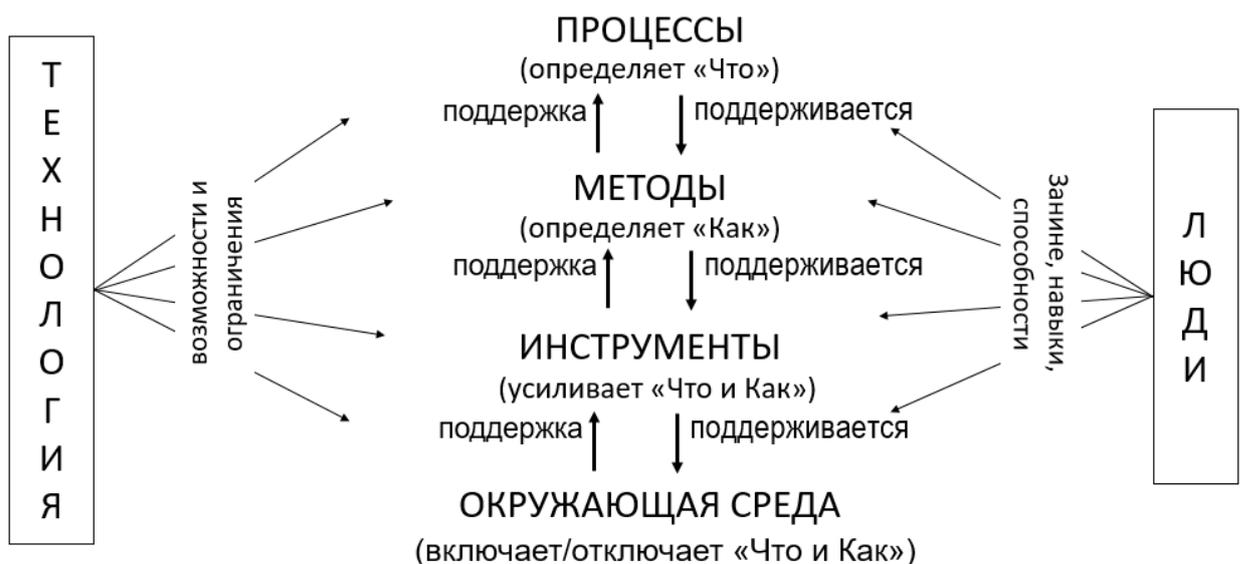
**Методология** определяется как совокупность связанных процессов, методов и инструментов. Таким образом, методологию MBSE можно охарактеризовать как совокупность связанных процессов, методов и инструментов, используемых для поддержки дисциплины системной инженерии в «модельно-ориентированном» или «управляемом моделью» контексте. Слово «методология» часто ошибочно считается синонимом слова «процесс». Для целей настоящего проекта используются следующие определения из для различения методологии от процесса, методов и инструментов:

Процесс (P) –это логическая последовательность задач, выполняемых для достижения определенной цели. Процесс определяет «ЧТО» должно быть сделано, не уточняя «КАК» выполняется каждая задача. Структура процесса обеспечивает несколько уровней агрегации, что позволяет проводить анализ и определение на разных уровнях детализации для поддержки различных потребностей в принятии решений.

Метод (M) состоит из приемов выполнения задачи; другими словами, он определяет «КАК» каждой задачи. (В этом контексте слова «метод», «техника», «практика» и «процедура» часто используются взаимозаменяемо.) На любом уровне задачи процесса выполняются с использованием методов. Однако каждый метод также сам по себе является процессом с последовательностью задач, которые должны быть выполнены для этого конкретного метода. Другими словами, «КАК» на одном уровне абстракции становится «ЧТО» на следующем более низком уровне.

Инструмент (Т) — это инструмент, который при применении к определенному методу может повысить эффективность задачи, при условии, что он применяется правильно и кем-то с надлежащими навыками и подготовкой. Целью инструмента должно быть содействие выполнению «КАК». В более широком смысле инструмент улучшает «ЧТО» и «КАК». Большинство инструментов, используемых для поддержки системной инженерии, основаны на компьютерах или программном обеспечении, что также известно, как инструменты автоматизированного проектирования.

На основе этих определений *методологию можно определить как совокупность связанных процессов, методов и инструментов*. Методология по сути является «рецептом» и может рассматриваться как применение связанных процессов, методов и инструментов к классу проблем, которые имеют что-то общее. Расширяя это определение немного дальше, методологию MBSE можно охарактеризовать как совокупность связанных процессов, методов и инструментов, используемых для поддержки дисциплины системной инженерии в «модельно-ориентированном» или «управляемой моделью» контексте.



**Рис. 25** – Связанные процессы, методы и инструменты и их влияние на технологии и людей [1].

При выборе правильного сочетания элементов PMTE (процессы (P), методы (M), инструменты (T), окружающая среда (E)) необходимо учитывать знания, навыки и способности вовлеченных людей. Возможности и ограничения технологии должны учитываться при разработке среды разработки системной инженерии. Этот аргумент распространяется, конечно, и на среду MBSE. Технология не должна использоваться «только ради технологии». Технология может либо помогать, либо мешать усилиям по системной инженерии. Аналогично, при выборе правильного сочетания элементов PMTE необходимо учитывать знания, навыки и способности вовлеченных людей [1]. Когда используются новые элементы PMTE, часто эти параметры участников должны быть улучшены посредством специального обучения и специальных заданий.

Напомним, что основная концепция цифровой инженерии заключается в использовании цифровых моделей, интегрированных с моделированием, многокритериальным анализом и средами визуализации с эффектом погружения. Другими словами, одним из ключевых технических аспектов цифровой инженерии является использование MBSE, которая предоставляет общий язык и структуру для общения и управления системными требованиями, проектированием и реализацией. MBSE также позволяет разработчикам и инженерам систем моделировать и тестировать поведение системы в виртуальной среде, что снижает потребность в физических прототипах. Переход к цифровой инженерии происходит шаг за шагом, и эволюция выходит за рамки только MBSE. Хотя MBSE является критически важным компонентом цифровой инженерии, это лишь часть более значительного сдвига в сторону цифровой трансформации [33]. Цифровая инженерия подразумевает фундаментальный сдвиг в мышлении и требует от организаций принятия более совместного подхода к решению проблем, когда ЗС со всей организации работают вместе для разработки более эффективных, действенных и гибких решений для быстро меняющихся требований отрасли. При этом в MBSE модели систем поддерживают ЖЦ системы, включая

разработку требований, архитектуру высокого уровня, детальное проектирование, тестирование, использование, обслуживание и утилизацию.

Надо представить основополагающие концепции, такие как определения модели и языка моделирования, а также их связь с инструментами моделирования и MBSE.

Существует множество определений слова «модель». Следующие определения относятся к модели как к представлению выбранных аспектов предметной области, представляющей интерес для разработчика моделей:

- физическое, математическое или иное логическое представление системы, сущности, явления или процесса;
- представление одной или нескольких концепций, которые могут быть реализованы в физическом мире;
- упрощенное представление системы в некоторой конкретной точке времени или пространства, предназначенное для содействия пониманию реальной системы;
- абстракция системы, направленная на понимание, сообщение, объяснение или проектирование аспектов, представляющих интерес для этой системы;
- выборочное представление некоторой системы, форма и содержание которой выбираются на основе определенного набора проблем.

Модель связана с системой явным или неявным отображением. В контексте системной инженерии модель, представляющая систему и ее среду, имеет особое значение для системного инженера, который должен определять, проектировать, анализировать и проверять системы, а также делиться информацией с другими заинтересованными сторонами. Различные модели систем используются для представления различных типов систем для различных целей моделирования.

С точки зрения MBSE можно рассмотреть таксономию типов моделей и как разные модели должны работать вместе для поддержки MBSE подхода при создании сложных технических систем. Существует множество различных

типов моделей и связанных с ними языков моделирования для решения различных аспектов системы и различных типов систем. Поскольку различные модели служат различным целям, классификация моделей может быть полезна для выбора правильного типа модели для предполагаемой цели и области применения.

Поскольку системная модель является представлением системы, множество различных выражений, которые различаются по степени формализма, могут считаться моделями. В частности, можно нарисовать иерархическое изображение компонентов системы и считать его моделью. Аналогично можно написать описание системы в тексте и ссылаться на него как на модель. Оба примера являются представлениями системы. Однако, если нет какого-либо соглашения о значении терминов, существует потенциальная неточность и возможность двусмысленности в представлении. Основной фокус системного моделирования заключается в использовании моделей, поддерживаемых четко определенным языком моделирования. Хотя менее формальные представления могут быть полезны, модель должна соответствовать определенным ожиданиям, чтобы ее можно было рассматривать в рамках MBSE. В частности, начальная классификация различает неформальные и формальные модели, поддерживаемые языком моделирования с определенным синтаксисом и семантикой для соответствующей области интереса.

В «Глоссарии Министерства обороны США по моделированию и имитации (M&S)» [65] утверждается, что модель может быть физическим, математическим или иным логическим представлением системы. Это определение дает отправную точку для классификации моделей высокого уровня. Физическая модель – это конкретное представление, которое отличается от математических и логических моделей, обе из которых являются более абстрактными представлениями системы. Абстрактную модель можно далее классифицировать как описательную (похожую на логическую) или аналитическую (похожую на математическую).

Описательная модель описывает логические отношения, такие как отношение целое-часть системы, которое определяет дерево ее частей, взаимосвязь между ее частями, функции, которые выполняют ее компоненты, или тестовые случаи, которые используются для проверки системных требований. Типичные описательные модели могут включать те, которые описывают функциональную или физическую архитектуру системы или трехмерное геометрическое представление системы.

Аналитическая модель описывает математические соотношения, такие как дифференциальные уравнения, которые поддерживают количественный анализ параметров системы. Аналитические модели можно далее классифицировать на динамические и статические модели. Динамические модели описывают изменяющееся во времени состояние системы, тогда как статические модели выполняют вычисления, которые не представляют изменяющееся во времени состояние системы. Динамическая модель может представлять производительность системы, такую как положение самолета, скорость, ускорение и расход топлива с течением времени. Статическая модель может представлять оценку массовых свойств или прогноз надежности системы или компонента.

Как описательные, так и аналитические модели могут быть дополнительно классифицированы в соответствии с предметной областью, которую они представляют:

- свойства системы, такие как производительность, надежность, массовые свойства, энергетические, структурные или тепловые модели;
- реализация проекта и технологий, такие как электрические, механические и программные модели проектирования;
- подсистемы и продукты, такие как коммуникации, управление неисправностями или модели распределения питания;
- системные приложения, такие как информационные системы, автомобильные системы, аэрокосмические системы или модели медицинских устройств.

Классификация, терминология и подход модели часто адаптируются к конкретной области применения. Например, при моделировании организации или бизнеса поведенческая модель может называться моделью рабочего процесса или процесса, а моделирование производительности может относиться к производительности затрат и графика, связанной с организацией или бизнес-процессом. Одна модель может включать несколько категорий из приведенного выше списка. Например, модель надежности, тепловая и/или мощность может быть определена для электрической конструкции подсистемы связи для аэрокосмической системы, такой как самолет или спутник.

Системные модели могут быть гибридными моделями, которые являются как описательными, так и аналитическими. Они часто охватывают несколько категорий моделирования, которые должны быть интегрированы для обеспечения согласованного и связного представления системы. Таким образом, системная модель должна предоставлять как системные конструкции общего назначения, так и проблемно-специфические конструкции, которые являются общими для всех категорий моделирования. Системная модель может включать несколько представлений для поддержки планирования, требований, проектирования, анализа и проверки.

В то время как системные инженеры регулярно работали с моделями в течение нескольких десятилетий, MBSE предлагает целостное предложение, основанное на способе создания, представления и использования моделей. В частности, MBSE основан на нескольких ключевых руководящих принципах:

- MBSE включает унифицированную модель, которая является междисциплинарной, охватывает жизненный цикл системы и используется в качестве авторитетного источника истины для всех видов деятельности по системной инженерии;
- Документы, возникают в моделях или генерируются на основе моделей, так что управление и контроль конфигурации не является отдельной

деятельностью, которая страдает от хорошо известных проблем обслуживания и выхода из строя;

- MBSE является нейтральным по отношению к методологии моделирования, можно использовать различные методы и конструкции моделирования на основе доступности информации и сложности отраслей/областей знаний (доменов). MBSE занимается созданием и эксплуатацией моделей домена, а не документов, как основного средства обмена информацией.

Использование формального представления в MBSE может поддерживать рассуждения и способствовать взаимодействию между разнородными моделями. Растущий акцент на использовании онтологий для захвата знаний предметной области, отраженных в сценариях и вариантах использования, помогает ограничить режим применимости (т.е. область применения), в рамках которого могут быть поставлены вопросы и на них можно ответить, а также выполнять рассуждения. Модели, созданные с помощью MBSE, связывают дисциплины, облегчают сотрудничество между заинтересованными сторонами и поощряют переосмысление предположений и ограничений. Важно, что модели в MBSE можно проверять в имитационных средах (с помощью виртуального прототипирования и разработки цифровых двойников) в рамках проверочного тестирования, тем самым снижая стоимость и усилия физического тестирования.

#### 4.2 Методы формирования и управления потребностями в системе и требованиями к ней

Методология MBSE использует подход на основе моделей для представления различных артефактов, созданных в ходе разработки, часто используя язык SysML [66, 67] в качестве преобладающего языка моделирования. Таким образом, это позволяет системному инженеру точно фиксировать, анализировать и определять систему и ее компоненты, а также обеспечивать согласованность между различными представлениями системы.

Артефакты моделирования также могут быть уточнены и повторно использованы в других приложениях для поддержки линейки продуктов и эволюционных подходов к разработке. На рисунке 26 показано, что методология MBSE включает в себя следующие действия по разработке [1, 68]:

- Анализ потребностей заинтересованных сторон
- Определение требований к системе
- Определение логической архитектуры
- Синтез кандидатов на выделенные архитектуры
- Оптимизация и оценка альтернатив
- Проверка и верификация системы

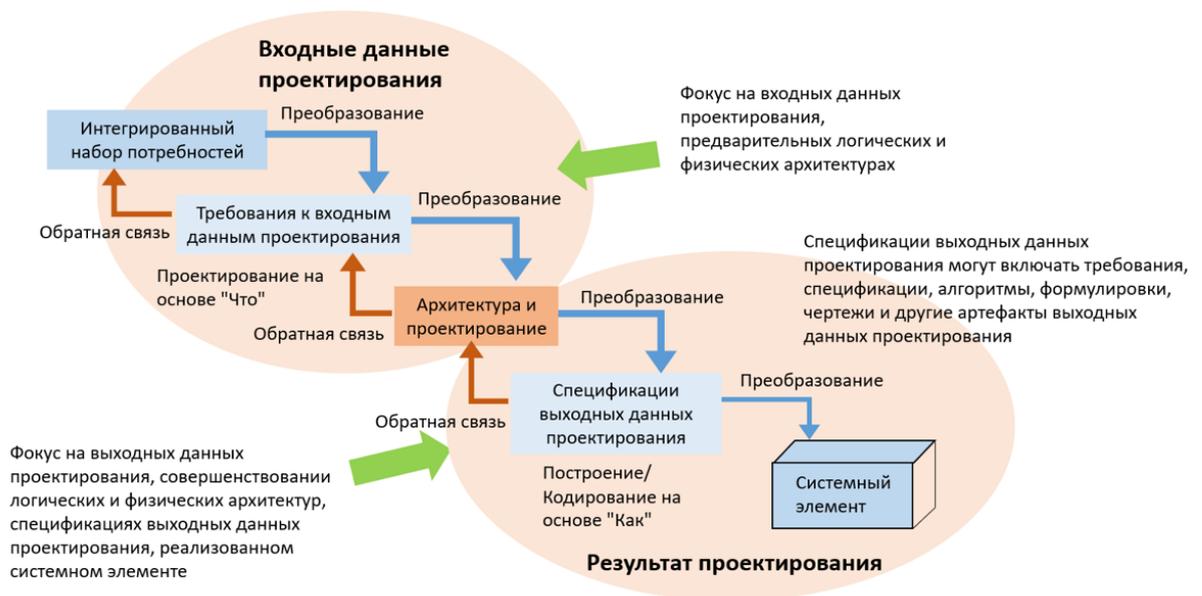
Анализ потребностей заинтересованных сторон включает анализ существующих систем и предприятий, связанные с ними ограничения и потенциальные области улучшения. Общая структура определения потребности заинтересованных сторон показана на рисунке 27. Результаты анализа «как сейчас есть» используются для разработки будущей системы для будущего состояния, например, промышленного предприятия, и связанных с ним требований миссии. Модель предприятия отображает предприятие, его составляющие системы, включая системы, которые должны быть разработаны или изменены, и субъектов предприятия (сущности, внешние по отношению к предприятию). «Как есть» предприятие анализируется с использованием методов причинного анализа для определения его ограничений и используется в качестве основы для выведения требований миссии и модели будущего предприятия.



**Рис. 26** – Основные артефакты методологии MBSE.

Требования миссии указываются в терминах целей миссии/предприятия, мер эффективности и вариантов использования верхнего уровня. При этом варианты использования и сценарии охватывают функциональность предприятия.

Создание интегрированного набора потребностей гарантирует, что в процессе определения потребностей заинтересованных сторон будут проанализированы все перспективы, включая риски, движущие силы, ограничения, а также анализ и проработку концепций жизненного цикла. Определение потребностей заинтересованных сторон в общем случае направлено на формирование концепции будущей системы (рис. 28).



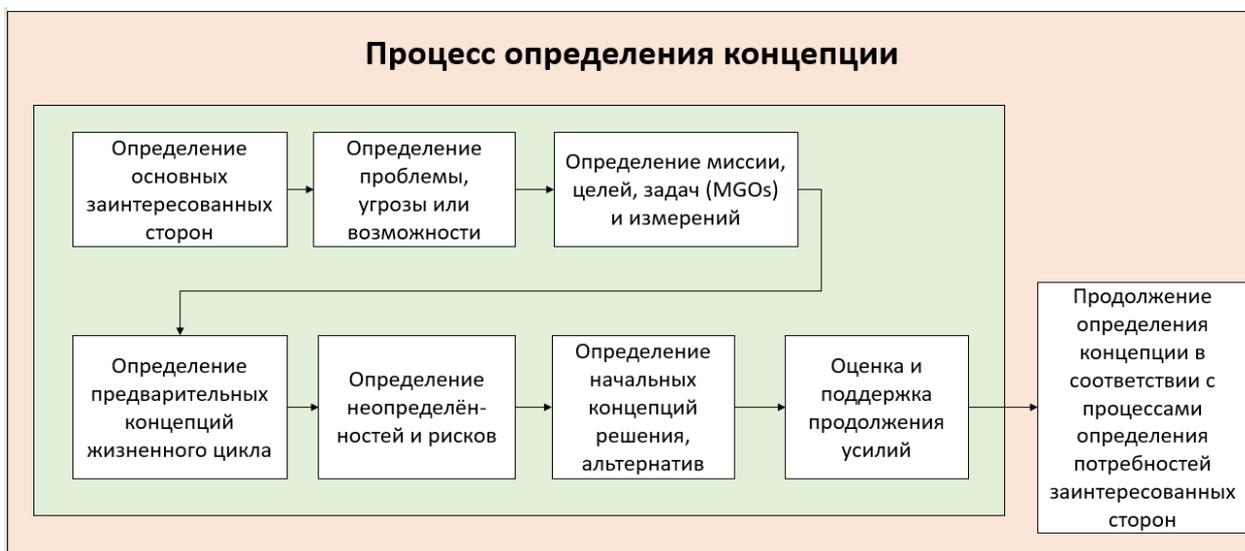
**Рис.27** – Определение потребностей заинтересованных сторон

При этом следует помнить, что важнейшая задача внедрения MBSE на действующем предприятии – это поиск путей снизить стоимость эксплуатации объектов за счет следующих эффектов:

- установление общего понимания структуры и значения информации,
- повышение качества проекта за счет точных семантически/синтаксически однозначных системных моделей,
- улучшенные коммуникации,
- повышенная способность управлять сложностью системы,
- улучшенное качество продукции,
- расширение знаний и повторного использования информации,
- визуализация компонентов и процессов,
- расширенные возможности учить и учиться для персонала.

Таким образом ЖЦ системы начинается со стадии «определения концепции». На первых шагах этой стадии заказчик (или предприятие) идентифицирует новые желательные возможности системы в виде потребностей (needs) заинтересованных сторон. Затем проводится бизнес-анализ или анализ миссии, результатом которого являются высокоуровневый

набор стратегий и потребностей, выраженные в виде бизнес-требований, отражающих миссию проекта (рис.28).



**Рис. 28** – Определение концепции системы. Анализ бизнеса, формулировка миссии

Задачи этапа анализа потребностей – идентифицировать действительно существующую потребность в новой системе и разработать осуществимый подход к ее удовлетворению. Такой стимулируемый потребностями поход к разработке систем характерен для большинства оборонных и других государственных программ и, как правило, является результатом ограниченности возможностей существующей системы. Разработка подобного типа требует использования технического подхода, гарантирующего осуществимость с приемлемыми затратами [6].

Принципиально иной подход - это разработка системы, стимулированная техническим прогрессом. Он характерен для разработки большинства коммерческих систем и является результатом открывшейся технологической возможности для лучшего удовлетворения какой-либо потребности. При разработке такого типа необходимо продемонстрировать целесообразность и возможность сбыта.

На этапе анализа потребностей выполняются следующие виды деятельности:

- системный анализ – осмысление потребности в новой системе;
- анализ функционирования – определение функций, необходимых для того, чтобы система могла успешно использоваться по назначению;
- оценка осуществимости – выявление осуществимого подхода к реализации;
- валидация потребностей – демонстрация экономической эффективности.

Системные требования (System Requirement), включают следующие классы требований проекта:

- Функциональные требования (Functional requirements)
- Требования к удобству использования (Usability requirements).
- Требования к производительности (Performance requirements).
- Системные интерфейсы (System interfaces)
- Требования к интеграции человека и системы (Human system integration requirements)
- Требования к ремонтпригодности (Maintainability)
- Требования к надежности (Reliability)
- Физические требования (Physical requirements)
- Требования к адаптивности (Adaptability requirements)
- Требования к безопасности системы (System security)
- Нефункциональные требования (Non-functional requirements)
- Требования к данным (Data requirements)
- Требования к процессам (Process requirements).

С требованиями назначения связан в первую очередь вопрос «зачем?», а с функциональными - вопрос «что?» (при том, что для требований к показателям функционирования характерен еще вопрос «сколько?»). Но если при формировании этих двух наборов требований нас интересует только, зачем и что, то куда же должен обратиться аналитик, чтобы получить ответ на

остальные четыре вопроса (кроме основных: что, почему, зачем и как) ? Чтобы разобраться в этом, следует рассмотреть парадигму триединства разработки концепции, показанную на рисунке 29.



**Рис. 29** – Триединство разработки концепции системы [6].

Описание контекста функционирования акцентирует внимание на вопросах «где?» и «когда?». Точнее, контекст функционирования описывает окружение, в котором предположительно будет работать система. Конкретный пример такого контекста называют сценарием. Большинство сценариев включают по меньшей мере пять элементов:

1. Цели и задачи: общее описание назначения системы вместе с критерием успешности.
2. Дружественные стороны: описание дружественных сторон и систем, а также существующих между ними связей.
3. Враждебные действия (и планы): описание действий и целей враждебных сил. Угрозы необязательно должны исходить от людей, это могут быть и стихийные бедствия (например, извержение вулкана).
4. Окружение: описание физического окружения, имеющего отношение к системе и ее назначению.

5. Последовательность событий: описание отдельных событий, возможных по ходу дела. В этих описаниях не должно быть деталей, уточняющих отдельные особенности реализации системы.

Тип сценария определяется характером рассматриваемой системы и проблемы. На рисунке 30 показаны различные уровни сценариев, которые могут понадобиться при разработке системы.



**Рис. 30** – Иерархии сценариев при разработке системы [6].

Итак, разработка требований включает четыре основных шага: установление, анализ, валидацию и документирование. Если эти шаги выполнены правильно, то на выходе получается заслуживающий доверия набор хорошо проработанных требований.

Для порождения требований функционального уровня обычно нужен анализ альтернативных концепций, включающий, как правило, использование математических и имитационных моделей эффективности. Для проведения такого анализа необходимы три вещи: исходный набор требований назначения, концепция функционирования рассматриваемой системы и контекст функционирования – набор сценариев эксплуатации, дающих представление об окружении.

Так как разработка системы – это недетерминированный процесс в том смысле, что включает повторяющийся процесс рассуждений по индукции; при этом имеется множество различных решений, способных удовлетворить требованиям назначения. Большую ценность может представлять

предшествующая система, поскольку на ее основе можно определить функциональную архитектуру новой системы и показатели функционирования ее отдельных составных частей.

Требования к показателям функционирования разрабатываются в ходе анализа, цель которого – установить показатели функционирования для каждой исследуемой концепции. Затем эти требования оцениваются на предмет соответствия требованиям назначения и ограничениям. К числу источников ограничений можно отнести: 1) оператора системы, особенности технического обслуживания, ремонта и испытаний; 2) требования к сопряжению с другими системами; 3) внешние условия, в которых эксплуатируется система; 4) условия, связанные с изготовлением, транспортировкой и хранением. В конечном итоге требования к показателям функционирования системы определяют, что система должна делать, но не как это должно делаться. Эти требования представляют характеристики системы в технических терминах, их набор является необходимым и достаточным для отражения требований назначения и имеющихся ограничений. Требования к показателям функционирования оформляются в виде динамического документа; они пересматриваются и обновляются на всем протяжении жизненного цикла системы.

#### 4.3 Задачи модельно-ориентированного анализа и синтеза системы

MBSE парадигма использует формализованные представления систем, известные как модели, для поддержки и облегчения выполнения задач системной инженерии на протяжении всего жизненного цикла системы. MBSE часто противопоставляется устаревшим подходам на основе документов, где системная инженерия собирает информацию о проектировании системы с помощью нескольких независимых документов в различных нестандартизированных форматах. MBSE объединяет системную информацию в моделях проектирования системы, которые предоставляют основные артефакты. Эти системные модели, которые обычно выражаются на

стандартизированном языке моделирования, таком как язык моделирования систем SysML, выражают ключевую системную информацию в кратком, последовательном, правильном и связном формате. При правильной реализации модели MBSE позволяют стандартизированно консолидировать и интегрировать системные знания по инженерным дисциплинам и подсистемам и оптимизировать ключевые задачи системной инженерии, а также минимизировать риск разработки.

В процессе системной инженерии собирается, генерируется и/или поддерживается значительный объем информации относительно характеристик интересующей системы(систем), составных элементов и взаимодействующих сущностей/сред. MBSE использует модели как средство агрегации и управления этими разрозненными фрагментами информации о системе в централизованном репозитории, который может служить «единым источником истины» и технической базой относительно интересующей системы. Модели – это представления, которые используются для сбора, анализа и/или передачи информации о системе или концепции. Они могут различаться по объему, назначению и типу и могут использоваться как по отдельности, так и совместно друг с другом как часть интегрированного набора.

Свойства системных моделей можно описать и классифицировать по следующим признакам:

- Область действия: диапазон релевантности модели. Модели могут охватывать как характеристики и взаимодействия компонентов системы (широкая область действия), так и фокусироваться только на форме и функции отдельного элемента (узкая область действия).
- Домен (предметная область): «линза», через которую модель рассматривает систему. Модели могут быть целостными по своей природе или могут фокусироваться только на выделении информации, относящейся к определенным областям. Модели, специфичные для области действия, обычно используются для выделения определенных «перспектив» системы, будь то с

точки зрения конкретного сектора применения (например, аэрокосмическая промышленность, биомедицина), дисциплины (например, электрическая, механическая, тепловая), подсистемы или свойства системы (например, мощность, надежность, управление неисправностями).

- **Формальность:** уровень соответствия модели формализованным стандартам выражения информации. Модели могут выражать информацию о системах с различной степенью точности. Самые фундаментальные модели, которые просто выражают базовое представление системы в неопределенном формате, не передают информацию с точностью и считаются неформальными. Самые формальные модели соответствуют хорошо разработанным, предопределенным стандартам (формализмам) для содержания и организации, которые в совокупности определяют «языки», позволяющие последовательную и точную интерпретацию моделей.

- **Абстракция:** степень, в которой модель подавляет или исключает выходящие за рамки, неважные или нерелевантные детали. Абстракция необходима для больших и сложных систем, где непрактично воспроизводить каждый аспект данной системы в разумные сроки и с учетом затрат ресурсов.

- **Физическая/концептуальная:** является ли модель конкретной по своей природе (т. е. физическая модель) или полностью концептуальной (т. е. абстрактная модель).

- **Описательная/аналитическая:** описывает ли модель качественные аспекты системы, такие как требования, поведение или физическая архитектура (описательная модель), обеспечивает ли она представление количественных аспектов системы, таких как масса, надежность, энергопотребление, с помощью математических соотношений (аналитическая модель) или и то, и другое (гибридная модель).

- **Точность:** степень, в которой модель всесторонне фиксирует сведения о характеристиках системы, начиная от моделей, которые фиксируют только общую информацию о системе, до тех, которые стремятся точно зафиксировать как можно больше сведений о системе.

- Полнота: степень, в которой модель фиксирует всю соответствующую информацию о предметной области в пределах своей области и на предполагаемом уровне детализации.

- Интеграция: степень, в которой модель взаимодействует и взаимодействует с другими соответствующими моделями, описывающими интересующую систему или другие связанные/взаимодействующие сущности.

- Качество: степень, в которой модель (а не система, которую она представляет) удовлетворяет потребности лиц, выполняющих деятельность по системной инженерии. Высококачественная модель должна быть легко используемой, иметь минимальную двусмысленность и предоставлять точную, релевантную информацию, необходимую для поддержки задач, связанных с проектированием, разработкой, эксплуатацией и/или обслуживанием системы. Из этих свойств формализация и абстракция, как правило, наиболее часто обсуждаются в связи с MBSE [69], поскольку они оказывают наибольшее влияние на то, можно ли эффективно использовать модель как часть рабочего процесса MBSE.

Если говорить о критериях эффективных моделей MBSE следует отметить, что, хотя успешный рабочий процесс MBSE может включать использование нескольких различных взаимосвязанных или автономных моделей различных областей и типов в зависимости от потребностей пользователя, основная модель системы в проектах MBSE обычно должна иметь следующие характеристики:

1. Область, которая соответствует области проекта (т. е. она должна охватывать всю интересующую систему);

2. Представлять целостную картину из всех соответствующих доменов/предметных областей.

3. Строгое соответствие ранее установленному стандартизированному языку моделирования, будь то существующий язык, такой как SysML [39, 41, 47, 66, 67, 70, 71], или пользовательский формализм.

4. Полностью абстрагированная, чтобы включать только соответствующую информацию, подходящую для интересующей системы и желаемых вариантов ее использования.

5. Концептуальная по своей природе, чтобы позволить сбор нематериальной информации (например, системных требований).

6. Содержащая описание функциональной и структурной архитектуры системы как минимум и дополненная интегрированными аналитическими/количественными описаниями свойств по мере необходимости.

7. Демонстрация достаточной точности для захвата соответствующих элементов и поведения системы.

8. Полностью завершена с учетом ее области применения.

9. Интегрирована со всеми необходимыми вспомогательными моделями.

10. Достаточно высокого качества для удовлетворения потребностей тех, кто проектирует, разрабатывает или иным образом работает с системой.

С точки зрения содержания, эффективные системные модели должны захватывать ключевую системную информацию относительно требований, функциональности/поведения системы, структуры/формы, свойств и взаимосвязей между компонентами системы.

Языки моделирования – это спецификации, которые предоставляют стандартизированные руководящие принципы и структуры для выражения системной информации. Эти языки, которые предоставляют как структуры или «синтаксис», в котором может быть выражена информация, так и «семантику», которая управляет способом, которым должна интерпретироваться информация, могут быть выбраны на основе предпочтений и потребностей пользователя. Различные языки используют различные форматы для выражения информации (например, визуальные или текстовые средства), а также различные парадигмы (например, объектно-ориентированные, функциональные и т.д.) для группировки информации.

Визуальные языки, как правило, предпочтительны для моделирования из-за их легкости чтения, а объектно-ориентированные языки моделирования часто используются в контекстах системной инженерии, поскольку они легко поддаются системам, которые можно разложить или иным образом представить в терминах объектов.

SysML, расширение унифицированного языка моделирования [72] для системной инженерии, является одним из наиболее часто используемых языков моделирования для MBSE. Это графический язык, который использует диаграммы и таблицы для выражения системной информации и предоставляет стандартный набор из девяти типов диаграмм, которые могут использоваться для организации и выражения системной информации. Коллективные диаграммы (каждая из которых может считаться моделью сама по себе), когда они взаимосвязаны, предоставляют средства представления структуры, поведения и требований системы в абстрактной форме. Было предложено несколько других вариантов в качестве языков описания архитектуры [73] для моделирования архитектур систем. ISO/IEC/IEEE 42010 (Системная и программная инженерия - Описание архитектуры) определяет минимальные требования к языку, чтобы квалифицироваться как ADL (ISO 2011).

Пользователи MBSE имеют возможность использовать SysML, аналогичный вариант графического языка, такой как UML, язык, специфичный для предметной области или набора используемых инструментов (фреймворка), или разрабатывать пользовательский формализм для своей команды или организации [74]. Можно формализовать текстовые документы для создания моделей, однако для этого потребуется создание словаря предметной области, чтобы устранить неоднозначность, присущую выбору дикции, а также использование жестких грамматических структур, которые могут ограничить читабельность.

SysML предлагает девять типов диаграмм для моделирования системы (рис. 31):

(i) Диаграмма определения блоков (BDD) для отображения иерархии системы и связей между компонентами;

(ii) Внутренняя блок-диаграмма (IBD) для описания внутренней структуры отдельного блока;

(iii) Диаграмма вариантов использования для представления системных функций и агентов, которые их вызывают и участвуют в них, в виде «черного ящика»;

(iv) Диаграмма активности, представляющая поведение системы как поток управления и последовательное преобразование входов в выходы;

(v) Диаграмма последовательности, часто используемая в качестве инструмента детального проектирования для определения поведения в качестве входных данных на этапе разработки жизненного цикла системы и для задания тестовых случаев;

(vi) Диаграмма конечного автомата – точное определение поведения блока, которое отображает переход между состояниями в ответ на возникновение событий;

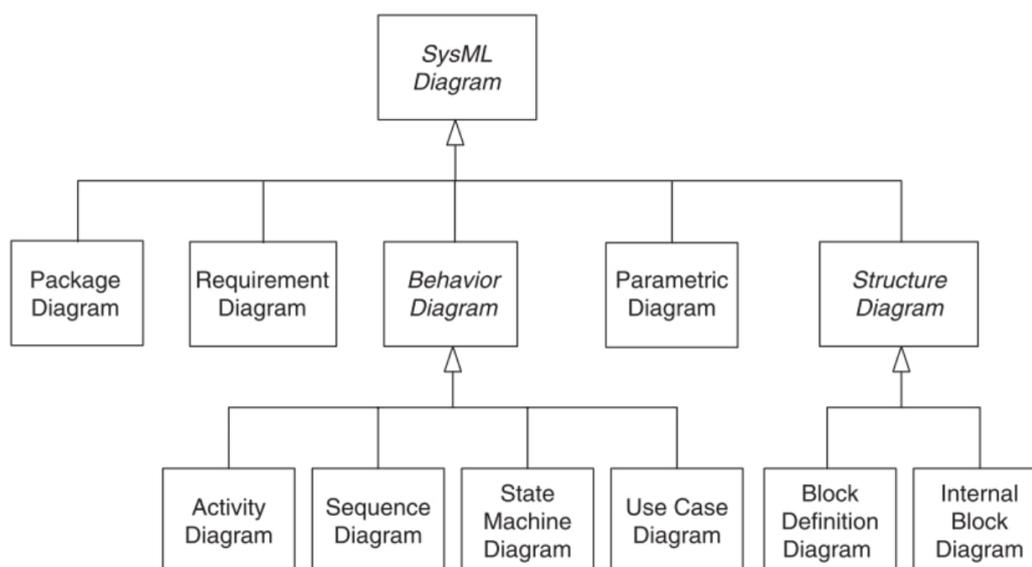
(vii) Параметрическая диаграмма, которая поддерживает инженерный анализ, включая мощность, массу, надежность, производительность и т. д., путем определения уравнений ограничений, связанных со свойствами системы;

(viii) Диаграмма пакетов; отображает организацию модели в виде иерархии содержимого пакетов; и

(ix) Диаграмма требований, которая показывает требования и их взаимосвязи друг с другом, а также с другими элементами системы, которые их удовлетворяют, проверяют и изменяют.

Инструмент моделирования Capella, который использует метод/язык инженерного моделирования на основе функционального анализа ARChitecture Analysis & Design Integrated Approach (ARCADIA) — это еще один подход, используемый в некоторых организациях для решения проблем гибкости и семантики с помощью SysML [75]. Предметно-ориентированный

язык моделирования ARCADIA во многом вдохновлен стандартами SysML и архитектурной структурой НАТО (NAF) и содержит много схожих концепций с этими языками. Методология функционального анализа была предложена в качестве альтернативы объектно-ориентированным концепциям в SysML, которые не являются интуитивно понятными для инженеров, не имеющих опыта разработки программного обеспечения. Метод фокусируется на функциях, которые затем распределяются по компонентам; и предусматривает три взаимосвязанных вида деятельности – анализ потребностей и моделирование, построение и проверку архитектуры, а также проектирование требований. Концепции диаграмм близки к SysML с десятью типами диаграмм и дополнительным акцентом на организацию модели на основе возможностей со сценариями и функциональными цепочками.



**Рис. 31** – Типы диаграмм для моделирования системы в SysML

Независимо от того, какой язык моделирования используется для проекта MBSE, важно, чтобы язык был изначально масштабируемым, стандартизированным, читаемым, допускающим повторное использование и абстрагируемым, чтобы обеспечить возможность разработки эффективных моделей MBSE.

Второй уровень структуры, существующий поверх языка моделирования, – это фреймворк архитектуры. Фреймворки архитектуры используются для организации информации, выраженной с помощью языка моделирования. В то время как язык моделирования предоставляет структуру, необходимую для выражения нескольких «представлений» (диаграмм) элементов системы и их взаимодействий, фреймворки архитектуры позволяют пользователю группировать эти представления на основе элементов, которые они представляют, и организовывать их таким образом, чтобы обеспечить прослеживаемость, упростить навигацию по модели и помочь в идентификации недостающей информации (например, пропущенного элемента) [76]. Фреймворки архитектуры — это особый тип шаблона, который часто определяется и стандартизируется для моделей MBSE. Существуют также шаблоны проектирования, специфичные для организаций и доменов, которые можно использовать в моделях MBSE для удовлетворения потребностей заинтересованных сторон в более конкретных вариантах использования модели.

Архитектурные фреймворки и шаблоны проектирования моделей играют важную роль в обеспечении возможности повторного использования моделей MBSE [77], поскольку определенные шаблоны архитектурного проектирования могут часто использоваться в нескольких проектах, даже если спецификации отдельных компонентов различаются (например, строительство дома с одинаковой структурой, но разным декором). Организовав системную модель достаточно абстрактным образом, можно будет выявить точки различия между старым и новым проектами и внести соответствующие изменения в свойства элементов в модели без необходимости переделывать весь процесс разработки модели.

Рабочий процесс разработки модели MBSE можно оптимизировать с помощью predetermined фреймворков процессов, которые предоставляют настраиваемые руководящие принципы и шаблоны для интеграции MBSE в общий процесс системной инженерии. Хотя фреймворки

процессов обычно определяются на организационном уровне, они, как правило, все демонстрируют некоторую форму процесса управления конфигурацией, руководящие принципы доступа, методы обновления модели и средства интеграции модели MBSE во все или почти все действия жизненного цикла системной инженерии. Преимущества использования MBSE ограничены, когда системная модель устаревает или иным образом становится неточной, поэтому регулярные обновления модели являются минимальным требованием для фреймворков процессов MBSE.

Для небольших проектов фреймворк процессов MBSE может быть таким же простым, как использование функций управления версиями, которые входят в состав многих платформ программного обеспечения для совместного моделирования, и интеграция использования модели и периодических обновлений в качестве контрольных точек в процессе системной инженерии. Более сложные проекты могут формализовать фреймворки процессов MBSE таким образом, чтобы их можно было проверить по планам управления конфигурацией и управления системной инженерией [69, 79, 80].

Рабочий процесс MBSE и создание централизованной системной модели подчеркивают целостный, основанный на стандартах подход к системной инженерии [19]. Поскольку создание системной модели требует согласования информации из нескольких доменов и подсистем, несоответствия и дефекты легко идентифицируются в процессе моделирования [19, 81] и могут быть устранены или устранены на более ранних этапах жизненного цикла системы, чем это было бы сделано в документо-ориентированном рабочем процессе. Аналогичным образом, централизация и стандартизация информации обеспечивают снижение недопонимания и других рисков разработки, поскольку все члены проектной группы используют один и тот же источник информации для справки. Стандартизация формата также упрощает поиск и извлечение информации по сравнению с документо-ориентированным рабочим процессом, где информация хранится в нескольких документах в разных форматах [54, 81, 82].

В более широком смысле, MBSE предоставляет лучшие средства управления сложностью, чем документо-ориентированный, с использованием формализованных структур и абстракции. Перекрестные ссылки в моделях MBSE позволяют начать проверку структуры проекта, требований и обеспечения систем на более ранних этапах ЖЦ системы и продолжить оценку качества проектирования системы на протяжении всего проекта с минимальными затратами. Кроме того, модели можно повторно использовать и адаптировать для аналогичных систем, что позволяет ускорить разработку системы с минимальным риском [4].

В то время как документо-ориентированный системный инжиниринг традиционно была парадигмой предпочтения для генерации артефактов и поддержки усилий по системной инженерии в доцифровую эпоху, цифровая трансформация общего рабочего процесса системной инженерии в последние годы стимулировала широкое внедрение MBSE и более широких подходов на основе моделей [1, 4,17, 19, 42, 54, 64]. Цифровые среды и программные инструменты упростили и ускорили создание, поддержку и использование системных моделей, особенно в условиях совместной работы [84]. При правильной реализации цифровые модели MBSE можно использовать для программного выявления несоответствий, обеспечения интерактивного моделирования поведения системы, одновременного распространения изменений по всему проекту (вместо обновления артефактов по одному), автоматической генерации артефактов на основе документов и многого другого. Появление нового программного обеспечения для поддержки и автоматизации задач системной инженерии открыло дополнительные возможности для расширения возможностей системных моделей и повышения эффективности выполнения задач системной инженерии.

Когда модели MBSE физических систем построены с достаточной полнотой и точностью, они могут функционировать как «цифровые двойники» систем, которые они представляют. Цифровые двойники предоставляют средства точного представления формы и функции системы на протяжении

всего жизненного цикла системы, и все это в цифровой среде. Создание таких цифровых двойников дает ряд преимуществ, в том числе позволяет отдельным лицам выполнять тестирование, анализ и оптимизацию систем в виртуальной среде без риска для реальной интересующей системы и часто со значительно сниженными затратами/бременем [16, 17, 26, 67, 85-88]. Цифровые двойники также позволяют представлять поведение систем в условиях, которые было бы непрактично или невозможно вызвать в экспериментальных условиях, тем самым позволяя получать информацию, которую нельзя получить путем изучения исходной физической системы.

Хотя MBSE и подходы на основе документов обычно представляются как альтернативы друг другу, MBSE и подходы на основе документов можно использовать совместно в одном проекте. В рабочих средах, где нормой является подход на основе документов, заинтересованные стороны могут ожидать или требовать предоставления текстовых артефактов документов, или могут возникнуть проблемы с незнанием каких-либо языков моделирования [1, 89]. В таких случаях может потребоваться использование гибридного подхода, при котором документы генерируются из модели проектирования как статические представления системы для контрольных точек проекта.

#### 4.4 Опорный алгоритм модельно-ориентированного системного инжиниринга

В XXI веке стали собираться композитные технические системы, состоящие из физико-технических, информационных и интеллектуальных подсистем. Инженерам-строителям предстоит реализовывать такие проекты. Как уже указывалось передовыми технологиями MBSE обладают специалисты Московском Физико-техническом институте – национального исследовательского университета (МФТИ). Представленный ниже материал основан на недавней статье, опубликованной в журнале «Труды МФТИ» [8].

Алгоритм анализа технической системы включает:

- сбор и анализ исходных данных;
- выделение функциональных подсистем и идентификацию их связанностей;
- исполнение итерационных процедур унифицированного описания компонент системы и их связанностей, иерархические и горизонтальные детализации формируемых представлений:
  - обзоры и анализы устройства и характеристик известных технических систем и условий их применения;
  - обливковое представление технических систем: идентификация и итерационное уточнение требований к системе и компонентам, генерацию вариантов представления устройства системы с учётом требований и имеющихся в распоряжении кейсов, практик, результатов анализа, знаний.

Алгоритм синтеза технической системы включает:

- выбор и консолидации на основе результатов проведенного анализа и рассмотренных практик итогового представления системы, принимаемого к дальнейшему применению;
- валидация итогового варианта представления системы.

Модельно-ориентированный подход существенно помогает локализации и конкретизации деятельности по инжинирингу технических систем. Описания, модели, характеристики технической системы системно представляются на основе применения и локализации. Основные преимущества такого подхода, следующие:

- MBSE закладывает основу применения типовых схем и решений, обеспечивает учёт известных практик и через это повышение результативности системного инжиниринга;
- существенно сокращает усилия на формирование и реализацию дорожных карт проведения работ и подбор инструментов для их проведения;
- позволяет сопоставлять и накапливать полезные результаты в форме репозитариев систематизированных модельных решений и знаний,

поддерживать, опираясь на решения репозитория, выбор решений для синтеза систем;

- в условиях цифровой трансформации позволяет формировать и по шагам развивать гармонизированные платформы прикладных унифицированных моделей и инструментов прикладного инжиниринга.

В этой связи первоочередной является задача выделения актуальных предметных областей технических систем, формирования для них опорных прикладных алгоритмов модельно-ориентированного системного инжиниринга и накопление примеров реализации алгоритмов на всех типовых этапах системного проектирования технических систем – концептуального проектирования, эскизного проектирования и рабочего проектирования. В современных условиях применение модельно-ориентированного подхода необходимо начинать прямо с этапа концептуального проектирования, что позволяет «сдвинуть моделирование по жизненному циклу технических систем влево» [2].

Опорный алгоритм модельно-ориентированного концептуального проектирования, выполненный в Центре прикладных систем искусственного интеллекта МФТИ имеет вид, представленный ниже [8].

#### 1. Онтологическое моделирование.

Формируются ключевые термины и понятия предметной области и целевой системы. Создается семантическая основа создаваемого системного проекта – гармонизированный набор применяемых терминов и понятий

#### 2. Архитектурное моделирование

Формируется иерархия рассмотрения целевой системы. При этом создаются упорядоченные иерархии целевой системы

1.1 Формируется список выбранных для описания целевой системы сущностей. Согласно философской энциклопедии, сущность – это представление и смысл данной вещи, то, что она есть сама по себе, в отличие от всех других вещей и в отличие от изменчивых (под влиянием тех или иных

обстоятельств) состояний вещи. В данном случае речь идет о последовательном формировании для целевой системы требований, функций, компонентов.

1.2 Формируется иерархический список требований к целевой системе

1.3 Формируется иерархический список функций, которые реализуют сформулированные требования к целевой системе

1.4 Формируется иерархический список компонент целевой системы, которые необходимы для реализации сформулированных функций целевой системы

1.5 При необходимости предыдущие шаги повторяются итерационно

1.6 Формируются таблицы/матрицы попарных связанностей всех сущностей (требований, функций и компонент) целевой системы между собой во всех возможных комбинациях. Т.е. требования-требования; функции-компоненты; требования-компоненты; функции-функции и т.д. Для оценки связанностей в простейшем случае может применяться бинарная шкала: 0 – связи нет; 1 – связь есть. В общем случае силу связи можно измерять, например, по 5 бальной шкале.

Следует сделать замечание, что как уже указывалось, MBSE – подход позволяет систематизировать разные точки зрения на целевую систему, которые определяют поддержку принятия решений. При этом в общем случае принятие решений определяется следующими группами факторов [90]:

- Технологические
- Экономические
- Экологические
- Социальные

Поэтому в таблицах связанностей в каждую ячейку могут помещаться несколько чисел, которые отражают силу связанности сущностей, например, отдельно с точки зрения указанных факторов.

1.7 Все шаги могут повторяться итерационно

3. Параметризация целевой системы, математическое и компьютерное моделирование

3.1 Формируется список/справочник качественных и количественных параметров целевой системы. При этом аналогично п.1.6 формируются таблицы/ матрицы связанности параметров

3.2 Выбираются/формируются математические и алгоритмические модели отражающие связи из п.3.1. При этом получается набор используемых для работы с целевой системой математических моделей и алгоритмов.

3.3 Создаются компьютерные и цифровые модели, включающие выявленные для целевой системы параметры и их связанности.

3.4 Совмещение и совместная валидация и верификация всех моделей

4. Моделирование целевой системы.

Включает, в том числе окончательное формирование в виртуальном/цифровом мире представление целевой системы. При этом поведение целевой системы в виртуальном и физическом мире должно быть идентичным.

## 5. Стандарты системной инженерии

Стандарты системной инженерии – это нормативные документы, которые определяют процессы, методы и требования, применяемые в системной инженерии на всех этапах ЖЦ систем. Они могут быть международными (ISO) и российскими (ГОСТ).

### 5.1 Стандарты системной инженерии в мире

В отрасли существует множество стандартов и руководств, связанных с системной инженерией [11]. Стандарты являются формальными документами, которые разработаны организациями по разработке стандартов (например, ISO или IEEE). Они являются общепринятым сводом знаний, обеспечивающих консенсус мнений.

При внедрении стандарта организацией или проектом для получения максимальной выгоды необходимо применять подход, охватывающий весь ЖЦ. Это включает в себя оценку альтернативных стандартов, выбор, адаптацию или адаптацию, оценку результатов и действия по улучшению. Стандарты ISO/IEC/IEEE 24748-1 и ISO/IEC/IEEE 24748-2 содержат рекомендации по управлению жизненным циклом, адаптации процессов и другим аспектам жизненного цикла, которые могут помочь при внедрении стандартов.

INCOSE рекомендует при определении новой темы для стандартизации провести исследование готовности к стандартам, исходя из зрелости концепций, конвергенции принципов и теории, а также принятия проверенных практик. Исследование включает оценку отраслевого консенсуса по теме. Также полезно оценить актуальность и зрелость стандарта с точки зрения применения темы стандарта в проекте. Например, если в проекте используется технология, охватываемая стандартом, но реализация технологии в проекте выходит за рамки стандарта, то это может стать препятствием для использования стандарта.

Гибкость и стандартизация: эти два понятия не обязательно противоречат друг другу. Инженерные организации или проекты могут адаптировать и адаптироваться стандарты, такие как ISO/IEC/IEC 15288, для определения своих процессов и подходов с учётом гибкости, необходимой в ситуациях с большей неопределённостью и вероятностью изменений. В документе NDIA SED и INCOSE под названием «ISO/IEC/IEEE 15288 Meets Lean Agile» подробно описывается использование 15288 в рамках гибкого подхода в оборонной отрасли [92]. Однако большая часть содержания документа применима к проектам и системам в любой среде. В нём описывается использование 15288 в рамках подхода Lean Agile с упором на такие принципы, как клиенто-ориентированность, системное мышление, многоплановое планирование, допущение вариативности и сохранение вариантов, итеративная разработка с инкрементальными поставками и быстрыми циклами обратной связи, решения, основанные на данных, децентрализованные решения и многое другое. Стандарты ISO/IEC/IEEE 24748-1 и ISO/IEC/IEEE 24748-2 содержат рекомендации по управлению ЖЦ, адаптации процессов и другим темам жизненного цикла, которые могут помочь в адаптации стандартов к конкретным потребностям проекта, таким как гибкость.

Кроме того, таксономия стандартов, связанных с SE, может помочь понять существующий набор стандартов. Таксономия стандартов определяется как упорядоченная классификация стандартов в соответствии с их атрибутами и взаимосвязями. На рисунке 32 представлен пример таксономии стандартов, связанных с системной инженерией от IMCOSE [11].

На рисунке 32 показаны направленность и уровень детализации многих стандартов, связанных с системной инженерией. Этот рисунок показывает, что эти активы знаний имеют различные цели или задачи. Ниже приведено краткое описание цели каждой категории в выборочной таксономии. Каждая из категорий представляет определенную ценность для заинтересованных сторон в области системной инженерии.

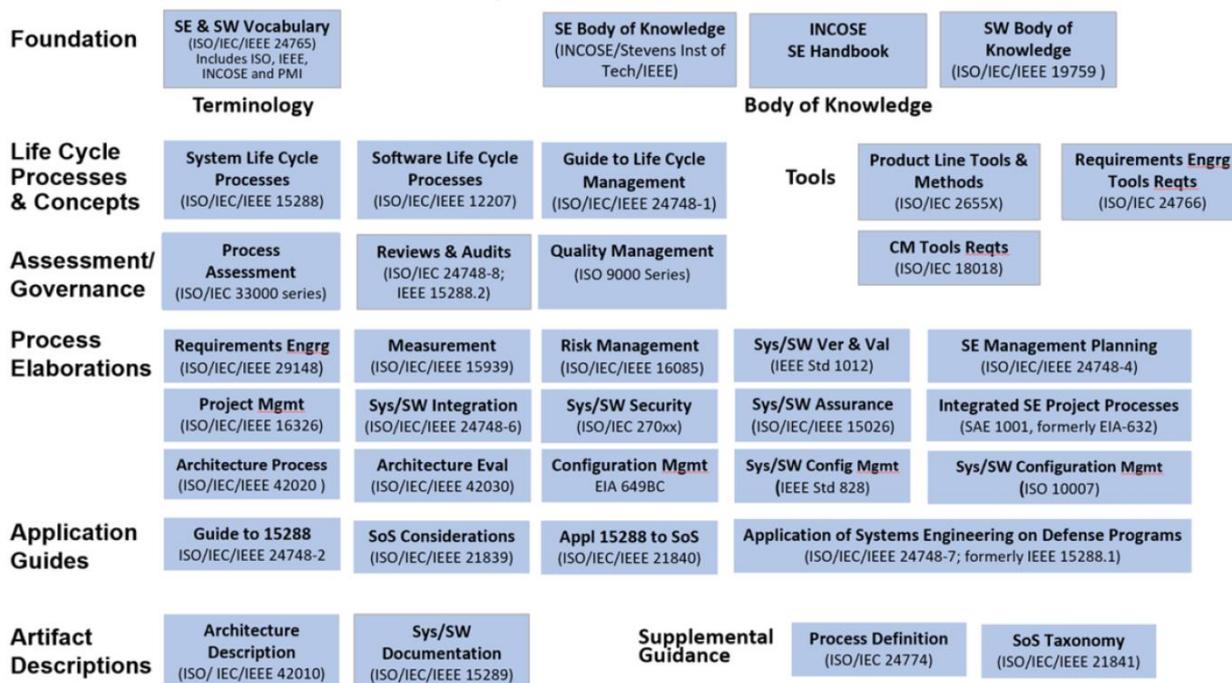


Рис. 32 – Таксономия стандартов системной инженерии от IMCOSE [11].

Фундаментальная терминология – Словарь (Foundation – Vocabulary): Здесь представлен общий набор терминов и определений из широкого спектра стандартов и справочников по системной инженерии. Включает словарь ISO/IEC JTC1/SC7, IEEE, INCOSE и PMI. Этот словарь опубликован в стандарте ISO/IEC/IEEE 24765. «Словарь» и в онлайн-ресурсе SEVOCAB по адресу <https://pascal.computer.org/>.

Фундаментальная терминология – Свод знаний (Foundation – Body of Knowledge): Сюда входят ресурсы, которые либо опубликованы как своды знаний по системной инженерии или смежным областям, либо являются признанными консенсусными справочниками, охватывающими весь спектр системной инженерии. SEBoK [11] – единственный свод знаний по системной инженерии. Справочник INCOSE SE охватывает весь спектр SE и является ключевым ресурсом, используемым для сертификации SE.

Процессы и концепции жизненного цикла (Life Cycle Processes and Concepts): включает в себя основные стандарты и справочники, которые определяют процессы ЖЦ системы, а также концепции, необходимые для

понимания, планирования и реализации жизненных циклов и процессов системы.

Оценка/Управление (Assessment / Governance): Сюда входят стандарты, ориентированные на оценку или управление процессами, продуктами или другими аспектами проектирования систем или их ЖЦ.

Разработка процессов (Process Elaborations): Сюда входят стандарты, ориентированные конкретно на один или несколько процессов. Эти стандарты содержат подробную информацию об определениях, применении и других аспектах, которые помогают планировать и выполнять процессы. Процессы соответствуют процессам жизненного цикла системы, определенным в ISO/IEC/IEEE 15288, руководстве INCOSE SE Handbook и/или SEBoK.

Руководства по применению (Application Guides): Сюда входят стандарты и справочники, предоставляющие ключевую информацию и рекомендации по другим стандартам и помогающие пользователям понять потенциальные аспекты планирования и выполнения стандартов. Некоторые из этих стандартов и руководств содержат полезные пояснения или примечания, касающиеся конкретной информации или требований стандартов или тем, на которые они ссылаются, например, ISO/IEC/IEEE 24748-2, Руководство по применению ISO/IEC/IEEE 15288.

Описания артефактов (Artifact Descriptions): включают описания и/или требования к конкретным артефактам (или информационным элементам), связанным с процессами жизненного цикла системы.

Инструменты (Tools): включают стандарты, предоставляющие информацию или требования к инструментам, применимым к процессам жизненного цикла системы.

Другие рекомендации (Other Guidance): включают любые рекомендации, выходящие за рамки других категорий таксономии.

Итак, международные стандарты:

ISO/IEC/IEEE 15288 Системы и программная инженерия — Процессы жизненного цикла систем. Основной стандарт, описывающий процессы ЖЦ

систем: от концепции до утилизации. Включает планирование, проектирование, верификацию, управление рисками и требованиями.

ISO/IEC/IEEE 24748. Руководство по применению ISO/IEC/IEEE 15288 Дополняет 15288, предоставляя практические рекомендации по внедрению процессов.

ISO 10303 (STEP). Стандарт для обмена данными в проектировании. Используется для представления и обмена информацией о продуктах на всех этапах жизненного цикла.

ISO 31000 Управление рисками. Общий стандарт для идентификации, анализа и минимизации рисков, применяемый в том числе в системной инженерии.

Стандарты IEEE:

IEEE 1220. Применение системной инженерии в процессе разработки. Фокусируется на управлении требованиями, архитектурой и интеграцией систем.

IEEE 29148. Процессы и документирование требований. Описывает методы формулировки, анализа и управления требованиями.

IEEE 15288.1. Применение системной инженерии в оборонных проектах. Адаптация ISO/IEC/IEEE 15288 для военных и государственных систем.

Стандарты INCOSE:

INCOSE Systems Engineering Handbook. Практическое руководство по системной инженерии, основанное на ISO/IEC/IEEE 15288. Содержит методы, инструменты и лучшие практики. Постоянно обновляется. Последняя доступная версия 2.12 выпущена в мае 2025. Имеется свободный доступ.

INCOSE Model-Based Systems Engineering (MBSE) Рекомендации по использованию моделей (например, SysML) для проектирования систем.

Отраслевые стандарты

NASA Systems Engineering Handbook. Руководство NASA, описывающее процессы для космических проектов.

SAE ARP4754A. Стандарт для авиационной индустрии, акцентированный на сертификации и безопасности.

## 5.2 Стандарты системной инженерии в России

В соответствии с российской терминологией жизненный цикл изделия (ЖЦИ) также означает все этапы «жизни» продукции и включает этапы дизайнерской задумки, конструкторской и технологической подготовки производства, изготовления, обслуживания, утилизации и т.п. В основном данный термин применяется по отношению к сложной наукоемкой продукции высокотехнологичных предприятий в рамках CALS-технологий [19]. ЖЦИ, как определяет его стандарт ISO 9004-1, – это совокупность процессов, выполняемых от момента выявления потребностей общества в определенной продукции до момента удовлетворения этих потребностей и утилизации продукта.

В 2005 г. Российская Федерация ввела национальный стандарт Р ИСО 15288. Настоящий стандарт идентичен международному стандарту ИСО/МЭК 15288:2002 «Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем» (ISO/IEC 15288:2002 «System engineering — System life cycle processes»). Указанный стандарт определяет 6 стадий жизненного цикла системы:

- а) стадия замысла;
- б) стадия разработки;
- в) стадия производства;
- г) стадия применения;
- д) стадия поддержки применения;
- е) стадия прекращения применения и списания.

Итак, среди российских стандартов следует упомянуть:

Российские стандарты (ГОСТ)

ГОСТ Р 57193-2016. Системная инженерия. Требования к процессам жизненного цикла продукции. Аналог ISO/IEC/IEEE 15288, адаптированный для РФ.

ГОСТ Р 57721-2017. Управление требованиями при разработке сложных систем.

ГОСТ Р 59992-2022. Национальный стандарт Российской Федерации. Системная инженерия. Системный анализ процесса управления моделью жизненного цикла системы"(утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 17.08.2022 N 772-ст). Настоящий стандарт устанавливает основные положения системного анализа процесса управления моделью ЖЦ для систем различных областей применения. Для практического применения приведены примеры перечней решаемых задач системного анализа и угроз нарушения нормальной реализации процесса управления моделью жизненного цикла системы, типовые модели и методы прогнозирования рисков, рекомендации по определению допустимых значений показателей рисков, а также рекомендации по перечню методик системного анализа процесса.

ГОСТ Р 57318-2016 Системы промышленной автоматизации и интеграция. Применение и управление процессами системной инженерии

В данном стандарте указывается, что настоящий стандарт определяет требования к процессам предприятия, связанным с разработкой новой продукции (включая вычислительную технику и программное обеспечение), а также процессам, которые обеспечивают поддержку жизненного цикла продукции. В настоящем стандарте рассмотрен интегрированный подход к системной инженерии, основу которого составляют требования к применению и управлению SEP-процессами (это процессы системной инженерии, которые применяются на предприятиях для разработки новой продукции (включая вычислительную технику и программное обеспечение) и поддержки жизненного цикла продукции) для обеспечения жизненного цикла продукции. SEP-процесс носит рекурсивный характер применительно к разработке или постепенному совершенствованию продукции и предназначен одновременно для удовлетворения требованиям рынка и обеспечения процессов жизненного цикла продукции, таких как разработка/проектирование, производство/реализация, проведение испытаний/тестирование,

распространение, эксплуатация, техническая поддержка, обучение и вывод из эксплуатации/утилизация. В настоящем стандарте понятие «системная инженерия» определяет подход к разработке продукции и используется в контексте системы. Целью настоящего стандарта не является описание организационных сущностей, которые выполняют работы по системной инженерии или распределению компетенций персонала, вовлеченного в SEP-процессы. Его целью является предоставление руководящих положений в части того, что отдельные организационные сущности, предприятие в целом и его персонал должны делать, чтобы произвести качественную конкурентоспособную продукцию, которая будет востребована на рынке, а также как обеспечить приемлемый доход от вложенных инвестиций, соответствовать ожиданиям заинтересованных сторон и оправдать общественные ожидания. Фундаментальная цель системной инженерии состоит в том, чтобы обеспечить возможность производства высококачественной продукции и оказания услуг, соответствующих конкретным человеческим и техническим характеристикам за доступную цену и в установленный срок. Это включает в себя разработку, производство, проведение испытаний и поддержку интегрированного набора элементов (аппаратные средства, программное обеспечение, обученный персонал, данные, основные средства и материал) и процессов (службы и методы), которые приемлемы для заинтересованных сторон, удовлетворяют целям предприятия и внешним ограничениям. В рамках настоящего стандарта рассмотрены и определены процессы разработки, производства, проведения испытаний, обработки, эксплуатации и поддержки процессов жизненного цикла продукции. Данная цель достигается за счет одновременной обработки контента продукции и процессов путем фокусирования ресурсов проекта и проектных решений на эффективной системной инженерии, а также за счет интегрированной обработки всех элементов системы, включая элементы, связанные с производством, проведением испытаний, распространением, эксплуатацией, поддержкой, обучением и выводом из эксплуатации.

ГОСТ Р 59993-2022 Системная инженерия. Системный анализ процесса управления инфраструктурой системы. На основе использования системного анализа настоящий стандарт расширяет комплекс национальных стандартов системной инженерии для оценки достижимости требуемого качества, безопасности и эффективности системы, прогнозирования рисков, связанных с реализацией системных процессов, и обоснования эффективных предупреждающих действий по снижению этих рисков или их удержанию в допустимых пределах. Выбор и применение системных процессов в жизненном цикле системы осуществляют по ГОСТ Р 57193. В общем случае применительно к системам различного функционального назначения системный анализ используют для следующих системных процессов:

процессов соглашения – процессов приобретения и поставки продукции и услуг для системы;

процессов организационного обеспечения проекта – процессов управления моделью жизненного цикла, инфраструктурой, портфелем проектов, человеческими ресурсами, качеством, знаниями;

процессов технического управления – процессов планирования проекта, оценки и контроля проекта, управления решениями, рисками, конфигурацией, информацией, измерений, гарантии качества;

технических процессов – процессов анализа бизнеса или назначения, определения потребностей и требований заинтересованной стороны, определения системных требований, определения архитектуры, определения проекта, системного анализа (т. е. непосредственно к самому себе как к процессу), реализации, комплексирования, верификации, передачи системы, аттестации, функционирования, сопровождения, изъятия и списания системы.

Стандарт устанавливает основные требования системной инженерии по системному анализу процесса управления инфраструктурой системы, специальные требования к используемым количественным показателям, способам формализации, моделям, методам и используемым критериям при решении задач системного анализа. Для планируемого и реализуемого

процесса управления инфраструктурой применение настоящего стандарта при создании (модернизации, развитии), эксплуатации системы и выведении ее из эксплуатации обеспечивает решение задач системного анализа с использованием специальных показателей, связанных с критичными сущностями инфраструктуры системы, частных и обобщенного показателей прогнозируемых рисков.

ГОСТ Р 59340 – 2021 Системная инженерия. Защита информации в процессе управления конфигурацией системы. Настоящий стандарт расширяет комплекс национальных стандартов системной инженерии по защите информации при планировании и реализации процессов в жизненном цикле различных систем. Выбор и применение реализуемых процессов для системы в ее жизненном цикле осуществляют по ГОСТ Р 57193. Методы системной инженерии в интересах защиты информации применяют:

для процессов соглашения – процессов приобретения и поставки продукции и услуг для системы – ГОСТ Р 59329.

для процессов организационного обеспечения проекта – процессов управления моделью жизненного цикла, инфраструктурой, портфелем проектов, человеческими ресурсами, качеством, знаниями — по ГОСТ Р 59330. ГОСТ Р 59331. ГОСТ Р 59332. ГОСТ Р 59333. ГОСТ Р 59334. ГОСТ Р 59335;

для процессов технического управления – процессов планирования проекта, оценки и контроля проекта, управления решениями, управления рисками, управления информацией, измерений, гарантии качества – по ГОСТ Р 59336. ГОСТ Р 59337, ГОСТ Р 59338. ГОСТ Р 59339. ГОСТ Р 59341. ГОСТ Р 59342, ГОСТ Р 59343. Для процесса управления конфигурацией системы – по настоящему стандарту;

для технических процессов – процессов анализа бизнеса или назначения, определения потребностей и требований заинтересованной стороны, определения системных требований, определения архитектуры, определения проекта, системного анализа, реализации, комплексирования, верификации,

передачи системы, аттестации, функционирования, сопровождения, изъятия и списания системы – по ГОСТ Р 59344. ГОСТ Р 59345. ГОСТ Р 59346. ГОСТ Р 59347. ГОСТ Р 59348, ГОСТ Р 59349, ГОСТ Р 59350. ГОСТ Р 59351, ГОСТ Р 59352. ГОСТ Р 59353, ГОСТ Р 59354. ГОСТ Р 59355, ГОСТ Р 59356, ГОСТ Р 59357.

Стандарт устанавливает основные требования системной инженерии по защите информации в процессе управления конфигурацией системы и специальные требования к используемым количественным показателям. Для планируемого и реализуемого процесса управления конфигурацией системы применение настоящего стандарта при создании {модернизации, развитии) и эксплуатации систем обеспечивает проведение системного анализа, основанного на прогнозировании рисков.

ГОСТ Р 57193-2025. Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла систем. Дата введения 2025-06-30. Данный стандарт введен совсем недавно и связан с тем, что сложность искусственно создаваемых систем продолжает расти и достигает беспрецедентного уровня. С учетом "Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации", утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. № 145 создаваемые системы призваны открывать новые и расширять существующие прикладные возможности. Вместе с тем наблюдается рост проблем для организаций, которые создают и используют сложные системы. В условиях разнородных неопределенностей повышается актуальность использования риск-ориентированного подхода для разрешения возникающих проблем. Это обуславливает необходимость соответствующего совершенствования и развития стандартов по системной и программной инженерии.

В общем случае проблематика стандартов по системной и программной инженерии связана с решением задач создания, эффективного функционирования и развития сложных систем, включая задачи::

реализации государственной стратегии в экономике;

функционирования и развития сложных народнохозяйственных, инженерно-технических, энергетических, транспортных систем, систем связи и коммуникаций;

защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера;

развития критических технологий (например, базовых технологий силовой электротехники; компьютерного моделирования; информационных и когнитивных технологий; технологий атомной энергетики; технологий информационных, управляющих, навигационных систем; технологий и программного обеспечения распределенных и высокопроизводительных вычислительных систем; технологий мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения; технологий поиска, разведки, разработки месторождений полезных ископаемых и их добычи);

технической диагностики, управления ресурсом эксплуатации критически важных объектов и систем;

функционирования и развития топливно-энергетического комплекса, нефтяной, газовой и нефтехимической промышленности, электроэнергетики, трубопроводного транспорта;

качества и безопасности строительного комплекса, в том числе обоснования прочности и устойчивости создаваемых объектов и конструкций;

снижения экономических, экологических и социальных ущербов от природных и природно-техногенных катастроф и нарушений качества, безопасности и эффективности критически и стратегически важных систем.

На национальном уровне за последние годы были созданы десятки новых стандартов системной и программной инженерии. В ряде из них риск-ориентированный подход детализирован до уровня стандартизованных математических моделей и использования методов системного анализа применительно к каждому из рассматриваемых в настоящем стандарте

процессов (см. ГОСТ Р 59329 - ГОСТ Р 59357-2021, ГОСТ Р 59989 - ГОСТ Р 59994-2022).

Цель настоящего стандарта заключается в предоставлении понятийной, концептуальной и методической помощи организациям и специалистам в области системной и программной инженерии в определении множества реализуемых процессов в течение жизненного цикла различного рода систем. В стандарте представлена общая схема системных процессов в терминах целей, выходных результатов и выполняемых действий (решаемых задач). Стандарт применим к системам, в состав которых входят один или несколько из следующих элементов: аппаратные элементы, программные элементы, данные, люди, процессы, услуги, процедуры, объекты, материалы и иные естественно или искусственно возникающие сущности. Представленный жизненный цикл охватывает замысел и осуществление идей на уровне реализуемых процессов вплоть до выведения системы из эксплуатации. Процессы в настоящем стандарте образуют полное множество, из которого организация может конструировать модели жизненного цикла систем согласно их назначению. Организация в зависимости от ее целей может выбирать и применять любое приемлемое подмножество таких системных процессов для достижения своих целей.

Настоящий стандарт устанавливает общие основы описаний процессов и применяется в отношении жизненного цикла систем (ЖЦС), создаваемых человеком. Настоящий стандарт определяет с инженерной точки зрения множество системных процессов и соответствующую терминологию. Процессы могут быть применены на любом уровне иерархии в структуре рассматриваемой системы. Выбранные из них множества могут быть использованы в течение жизненного цикла (ЖЦ) для управления и осуществления стадий и этапов ЖЦС. Это реализуется путем вовлечения всех участников, заинтересованных в достижении конечных целей создания и применения систем. Системные процессы также могут быть рассмотрены с точки зрения совершенствования самих процессов ЖЦ, используемых в

пределах организации или проекта (т.е. в этом случае сам процесс может быть определен и рассмотрен как система).

Приложение А содержит нормативное руководство относительно приспособления процессов ЖЦС. В приложении Б приведен пример перечня угроз нарушения надежности реализации процесса, а в приложении В даны ссылки на типовые показатели, модели и методы прогнозирования рисков в условиях возможных угроз. В приложении Г сформулированы рекомендации по количественному определению допустимых вероятностных значений рисков, а в приложении Д даны ссылки на перечни рекомендуемых методик системного анализа. В приложении Е изложены особенности в применении процессов ЖЦ к системе систем.

Настоящий стандарт предназначен для использования:

организацией - для формирования среды необходимой поддержки процессов. Эти процессы могут поддерживаться инфраструктурой, методами, процедурами, методиками, иными различными способами, инструментальными средствами и обученным персоналом. Организация может использовать данную среду в интересах выполнения и управления проектами, для создания, эксплуатации, модернизации и развития систем;

в рамках проекта, осуществляемого организацией - для выбора, структуризации и применения элементов окружающей среды в интересах разработки и производства продукции и/или услуг;

заказчиком и поставщиком - для разработки соглашения, касающегося процессов и их реализации. В контексте настоящего стандарта с использованием соответствующего соглашения осуществляются отбор, согласование и выполнение конкретных процессов и действий;

системными аналитиками и оценщиками процессов - для использования в качестве эталонных ориентиров при выполнении работ по системному анализу, оценке процессов, поиску путей улучшения процессов, обеспечения и повышения качества, безопасности и эффективности систем.

Процессы в настоящем стандарте могут быть установлены с использованием бизнес-среды, состоящей из методов, процедур, методик и способов, инструментальных средств и обученного персонала.

Настоящий стандарт распространяется на полный ЖЦС, включая замысел, разработку, производство, эксплуатацию и снятие с эксплуатации систем, а также приобретение и поставку систем, осуществляемые внутри или вне организации. Процессы жизненного цикла, описанные в настоящем стандарте, могут быть применены однократно, многократно и рекурсивно по отношению к системе и ее элементам.

Существует широкий круг систем, отличающихся точки зрения области применения, назначения, сложности, масштаба, новизны, адаптируемости, количественных характеристик, места расположения, рассматриваемого фрагмента времени в жизни и эволюции. Настоящий стандарт применим для систем единичного и массового производства и систем, адаптируемых по требованиям заказчика. Это также относится к полностью автономной системе и системам, которые встраиваются в иные или комплексируются с иными, более сложными и интегрирующими системами, именуемыми системами систем.

Пользователи настоящего стандарта ответственны за выбор модели ЖЦ для конкретной системы, формулирование конкретных целей и выходных результатов процессов, выбор и применение соответствующих методов, моделей и методик с учетом специфики системы, содержания и качества выполняемых действий (задач).

Для определения содержания информационных объектов (документации) в процессах ЖЦС см. ГОСТ Р 56713.

## 6 Применение модельно-ориентированного системного инжиниринга

Современные предприятия сталкиваются со сложным набором проблем, которые не так-то просто решить. Пути решения основаны на комплексном социально-техническом подходе, которого зачастую не хватает многим специалистам по системной инженерии. Системная инженерия предприятий (СИП) может решать важнейшие проблемы, стоящие перед человечеством, для повышения качества жизни. Соответственно, специалистам по системной инженерии предприятий следует рассмотреть возможность выделения большего объема ресурсов на эти цели.

### 6.1 Ключевые понятия системного моделирования предприятия

Системный подход, которому, по-видимому, должны следовать хорошие системные инженеры представлен INCOSE [11]. Однако, существует мнение [93], что в этом подходе есть фатальный недостаток, который, возможно, объясняет, почему этот (ограниченный) классический, общепринятый или традиционный подход так часто терпит неудачу в реальной жизни: они не выявляют, не характеризуют и намеренно не включают всех ключевых заинтересованных лиц как внутренние, нетехнологические компоненты системы, подлежащей улучшению или развитию. Именно это делает успешную системную инженерию такой сложной и труднодостижимой, поскольку невозможно полностью предсказать поведение всех заинтересованных лиц, не говоря уже о том, чтобы контролировать их; можно только попытаться повлиять на них. На этапе валидации традиционной системной инженерии недостаточно просто привлечь несколько заинтересованных лиц. Более того, несмотря на акцент на MBSE в последние годы, популяризированной INCOSE, эта область далека от

возможности точного моделирования поведения человека, поэтому MBSE останется полезным подходом в некоторых обстоятельствах, но пока не является панацеей для успешной сложной системной инженерии или СИП.

Предприятие, которое обычно является более общим, чем система систем, состоит из целенаправленного объединения (например, сети) взаимозависимых ресурсов (например, людей, процессов, организаций, вспомогательных технологий и финансирования), которые взаимодействуют друг с другом для координации функций, обмена информацией, распределения финансирования, создания рабочих процессов, принятия решений и т.д. в своей среде (средах) для достижения бизнес-целей и операционных целей посредством сложной сети взаимодействий, распределенных в пространстве и времени.

В некоторых предприятиях нет легко идентифицируемых «организаций». Некоторые предприятия являются самоорганизующимися (т.е. не организованными внешним или вышестоящим мандатом), поскольку чувствующие существа на предприятии самостоятельно находят способы взаимодействия для достижения лучших результатов, чем те, которые могут быть достигнуты этими людьми в одиночку (Gorod et al. 2015, глава 1).

Системное проектирование предприятий – это предписанное применение инженерных методов для содействия успеху предприятия. Вместо того, чтобы сосредотачиваться на отдельных частях предприятия, системный инженер предприятия концентрируется на предприятии в целом и на том, как его проект, применяемый в данном случае, взаимодействует с окружающей средой. Такой подход позволяет избежать некоторых потенциально негативных аспектов традиционной системной инженерии, таких как концентрация на отдельных частях системы и их поведении в изоляции. В отличие от этого, этот подход фокусируется на том, как эти части взаимодействуют внутри системы и с внешней средой. Хотя большинство людей не стали бы заниматься проектированием, не стремясь к успеху,

некоторые методы, применяемые к предприятиям, например, редукционизм, часто оказываются безуспешными.

Сложная система непрерывно развивается и меняет своё поведение, часто неожиданным образом, часто приводя к совершенно разным результатам при небольших изменениях исходных условий. Взаимосвязи между её элементами изучены недостаточно и их сложно описать, понять, предсказать, управлять, контролировать, проектировать и/или изменять. Поэтому в СИП особое внимание уделяется целостным подходам и (неожиданным) эмерджентным свойствам, которые могут проявиться с некоторой задержкой. СИП может включать преднамеренные попытки создания менее устойчивого равновесия между взаимозависимыми компонентами системы в попытке стимулировать улучшения.

В работе [93] представлены основные принципы системной инженерии предприятий

Таблица 1. Основные принципы системной инженерии предприятий

#	Принцип	Комментарий
1	Смирение.	Признание недостатков и стремление к пониманию.
2	Следование холизму.	Фокус на предприятии в целом, а не на отдельных его частях.
3	Достижение баланса.	Избегание оптимальности, но улучшение общих возможностей.
4	Использование междисциплинарных подходов.	Применение эффективных методов смежных областей.
5	Принятие РОЕТ (Политика, операции, экономика и технологии)	Определение границ предприятия и сохранение общей картины.
6	Поддержка дискуссий.	Слушание других и поощрение обмена информацией.
7	Поиск возможностей.	Идти на осознанный риск при поиске альтернативных решений.
8	Формулирование эвристик.	Разработка практических правил и улучшение процесса принятия решений.
9	Развитие доверия.	Не бойтесь личной уязвимости при получении помощи от других.
10	Создание интерактивной среды.	Открытость и содействие содержательному взаимодействию.
11	Стимулирование самоорганизации.	Поддержка, поощрение и празднование сотрудничества.
12	Поиск простых элементов.	Разрешение наиболее распространенных общих проблем.
13	Внедрение многоуровневой архитектуры.	Создание эффективного руководства к прогрессу на раннем этапе.
14	Повышенные цели на будущее.	Стремление к сотрудничеству с другими для решения мировых проблем.

Актуальность рассматриваемой проблемы определяется тем, что успехи внедрения инноваций, и первую очередь цифровых технологий, для существующих промышленных предприятий (ПП), связаны, в частности, с формированием и постоянным совершенствованием системы поддержки принятия решений (СППР) [94]. Возникают расширенные требования к СППР, которые определяются появлением новых цифровых технологий, и, в частности, технологий искусственного интеллекта (ИИ). Перспективным направлением для совершенствования СППР является рассмотрение действующего ПП как сложной гетерогенной социотехнической системы, что также соответствует современным тенденциям постепенного перехода к Индустрии 5.0, где социальный фактор начинает играть более заметную роль [95-97]. При этом устойчивое развитие социотехнической системы ПП возможно только в случае, когда она имеет адекватные прямые и обратные связи с процессами и явлениями в динамично меняющемся социально-эколого-экономическом окружении. Т.е. речь идет о том, что СППР должна иметь возможность проактивно и результативно реагировать на потенциальные внешние и внутренние изменения [98]. Исследования показывают, что ответом на подобные глобальные вызовы для существующих ПП является широкое применение в проектировании и эксплуатации методов системной инженерии и ее современного этапом развития MBSE [81, 99, 100].

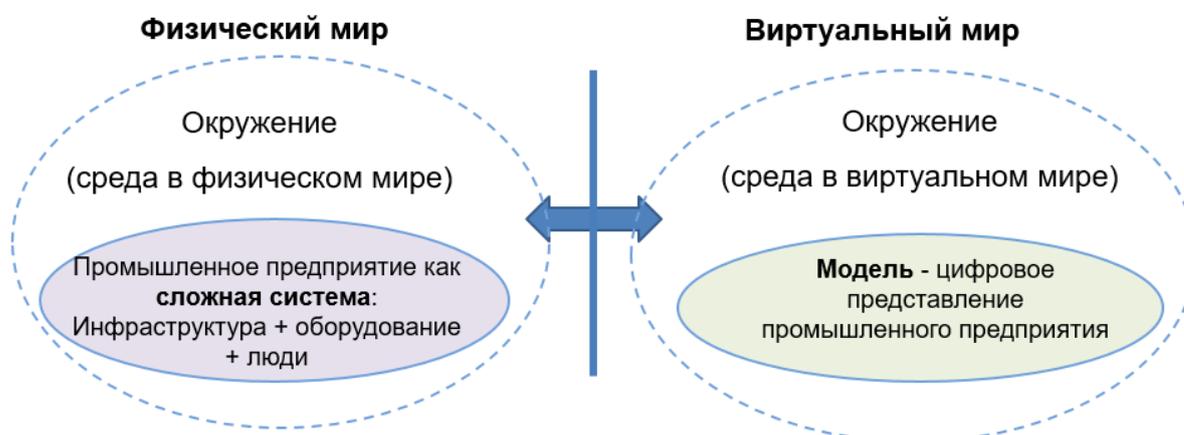
Таким образом СППР для ПП должны развиваться и совершенствоваться в соответствие с наблюдаемым в настоящее время экспоненциальным ростом технологического прогресса, включая такие передовые цифровые технологии, такие как ИИ, большие данные и интернет вещей [1]. В целом эти технологии, включая применение ИИ, позволяют преобразовать то, как предприятия накапливают, используют, и защищают знания о предметной области посредством их цифрового представления и семантической интеграции на базе развивающихся цифровых экосистем, что позволят ПП решать все более сложные задачи. При этом MBSE совместно с цифровой инженерией представляет собой явление, которое позволяет

соединять на основе единой системной модели деятельность людей, процессы, данные и технологии [1, 19, 26]. Поэтому развитие цифровой системной инженерии и ее потенциальная синергия с MBSE рассматриваются как важнейшие факторы, способствующие созданию цифрового предприятия [101, 102].

Расширение использования технологий создания системных моделей в рамках внедрения цифровой инженерии в СППР часто встречается с определенными трудностями, связанными с отсутствием единой онтологической модели на ПП. Часто даже само понимание термина онтологическая модель вызывает трудности. Мы понимаем онтологическую модель, или онтологию, как структурированное и формальное представление знаний о предметной области, используемое для описания понятий, объектов, их свойств и отношений между ними. Она помогает понять и представить, как разные элементы предметной области связаны между собой и какие отношения между ними существуют, что облегчает работу с данными и знаниями. Использование подходов ИИ в части формирования локальных семантических и онтологических моделей на ПП открывает вполне определенные перспективы по решению данной проблемы. Использование онтологических моделей помогает преодолеть препятствия по подключению в проект новых исполнителей и справиться со сложностью моделирования. Кроме того, появляется возможность интеграции моделей ИИ в части обработки естественного языка, с моделированием признаков при проектировании линейки продуктов в рамках MBSE, для формализации и моделирования изменчивости. Интеграция MBSE и ИИ помогает пользователям СППР ПП создавать модели признаков, которые сочетают качественные и количественные атрибуты.

В связи с тем, что современное ПП представляет собой сложную социотехническую систему, активно взаимодействующую с динамично меняющимся внешним социально-эколого-экономическим окружением для построения СППР целесообразно использовать методы MBSE [11]. При этом

происходит трансформация традиционных, существующих в настоящее время СППР, которые используют ЗС при принятии управленческих решений по развитию ПП. В связи с наблюдаемым в настоящее время во всей экономике высокой скоростью и широким охватом изменений внешней среды ПП повышается требования к СППР на всех уровнях (стратегическом, среднесрочном, оперативном), которое использует предприятие, чтобы соответствовать критериям сбалансированности, гибкости и адаптивности принимаемых решений. Такая СППР должна обеспечивать необходимый уровень интероперабельности внутри всех уровней принятия управленческих решений, чтобы обеспечить прослеживаемость (трассировку) данных и информации от места возникновения первичных данных до места использования (трансформации) на всех стадиях жизненного цикла как ПП, так и продукции им производимой. Базовым инструментом построения подобных СППР поэтому является цифровая системная инженерия, которая позволяет обеспечивать связь физического и реального миров (рис.33).



**Рис. 33** – Взаимосвязь реального и виртуального миров

При этом подход MBSE к созданию СППР, позволяет использовать в текущей деятельности предприятия многочисленных разнородных моделей процессов и явлений ПП в единый «источник истины» (рис. 34), что дает возможность реализовать все преимущества цифровой инженерии, включая обоснованное принятие решений, улучшенную коммуникацию,

«прозрачность» структуры и функций системы для всех заинтересованных сторон. Цифровая системная инженерия поддерживает и обеспечивает интегрированный цифровой подход, который также ориентируется на авторитетные источники системных данных и моделей как непрерывную связь между дисциплинами для поддержки устойчивости жизненного цикла от концепции до утилизации. Прогресс в развитии цифровой системной инженерии во многом связан с тем, что он опирается на представление о ПП как о сложных социотехнических системах и основывает свои решения на ответах на четыре основных вопроса «Почему?, Что?, Кто? и Как?», чтобы обеспечить фундаментальные сдвиги в организационной культуре, практиках и технологиях для достижения цифровой трансформации предприятия.



**Рис. 34** – Методология MBSE позволяет сформировать единый источник истины для поддержки принятия решений на ПП.

На рисунке 35 показаны этапы построения СППР на основе цифровой модели системы согласно MBSE.

Онтологическое описание предметной области: <b>понятия, термины, определения</b>	Архитектурные модели объекта в виде иерархий сущностей: <b>требований, функций, компонентов, процессов</b>	Архитектурные иерархические <b>параметризованные</b> модели объекта	Матрицы <b>связанностей</b> сущностей архитектурных параметризованных моделей	Математические <b>модели</b> Матрицы <b>связанностей</b> математических <b>моделей</b>	Компьютерные модели	Цифровые модели	Интеллектуальные модели
<b>Обликовое проектирование:</b> Онтология метамодели, онтология предметной области Справочники сущностей архитектурных моделей: требования, компоненты, функции, процессы Таблицы связанностей сущностей архитектурных моделей, параметры и атрибуты архитектурных моделей Математические модели, матрицы связанностей математических моделей							
<b>Цифровое и компьютерное проектирование:</b> Сборки, цифровые платформы и полигоны моделирования и виртуальных испытаний Балансировка параметров требований и ограничений							

**Рис. 35.** – Этапы построения СППР на основе цифровой системной инженерии согласно MBSE.

В качестве комментариев к рисунку 35 отметим следующее:

Все представленные этапы применяются итерационно.

Первые 3 этапа на рисунке 35 представляют собой так называемое «Обликовое» проектирование системы [8], включающее построение онтологии метамодели, онтологии предметной области, справочников сущностей архитектурных моделей: требований, компонентов, функций, процессов. Построение таблицы связанностей сущностей архитектурных моделей представляют обычно большие трудности и позволяют проводить балансировку параметров требований и ограничений. Цифровое и компьютерное проектирование включают сборки, цифровые платформы и полигоны моделирования и виртуальных испытаний. В общем случае использование MBSE в цифровой трансформации предприятий позволяет следующее:

- Весь состав используемых моделей возможно системно упорядочить и взаимно увязать между собой.
- Модели начинают рассматриваться совместно с физическими объектами как полноценные компоненты гибридного представления физической и виртуальной Вселенной, с двусторонними связями.
- Такой подход позволяет системно и упорядоченно представлять целевые объекты в разных взаимодополняющих и взаимопроникающих слоях моделирования.

- Создание такого описания системы позволяет оперативно встраивать систему в другие системы, достраивать, развивать цифровое представление предприятия как систему систем.

Важнейшим этапом, с которого все начинается является этап создания онтологической модели, которая, как и остальные системные модели, должна поддерживаться на всем протяжении жизненного цикла ПП [103].

Весь состав используемых моделей необходимо поддерживать в системно упорядоченном и взаимоувязанном виде, например, с помощью матриц взаимного влияния [1].

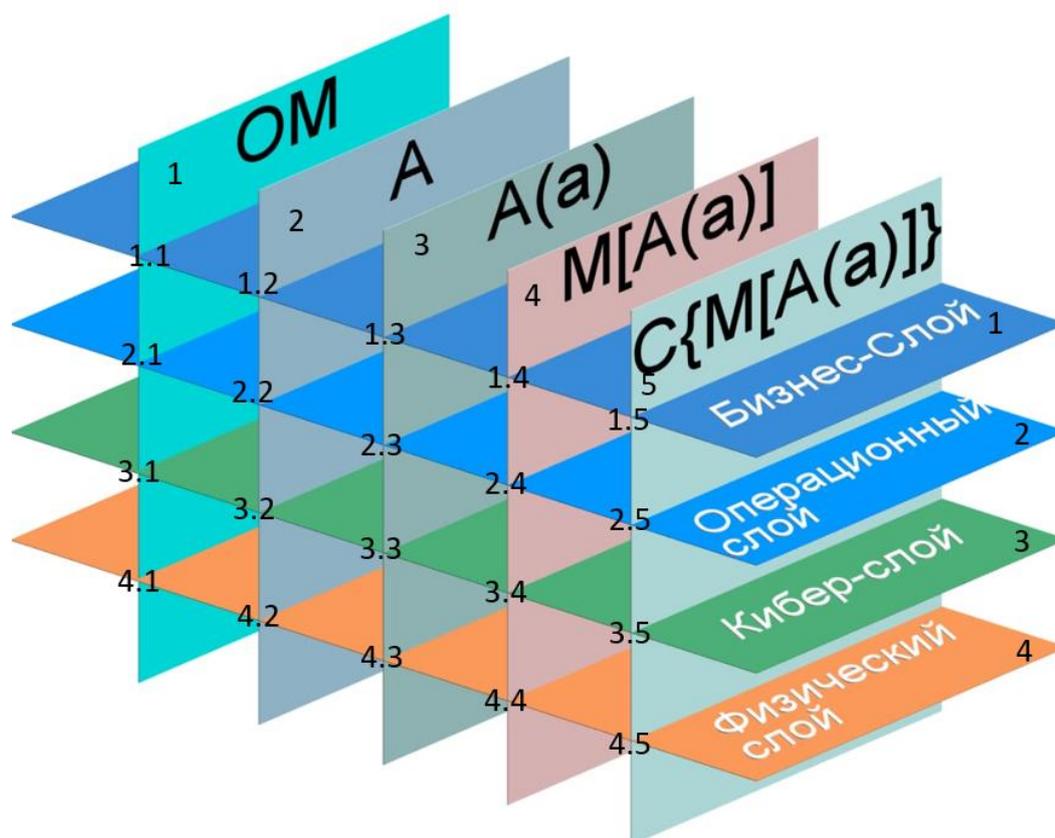
Модели начинают рассматриваться совместно с физическими объектами как полноценные компоненты гибридного представления физической и виртуальной цифровой вселенной, с двусторонними связями, что позволяет приближаться к формированию цифровых двойников.

Создание такого описания ПП позволяет оперативно встраивать в создаваемую на предприятии новую систему существующие системы, достраивать, развивать цифровое представление ПП как систему систем.

Таким образом основная концепция цифрового системного инжиниринга заключается в использовании, на основе единой онтологической модели ПП, цифровых моделей, многопрофильным анализом и дальнейшей интеграции с технологиями ИИ. При этом MBSE предоставляет общий язык и структуру для коммуникации и управления системными требованиями, проектированием и реализацией. MBSE также позволяет разработчикам и инженерам систем моделировать и тестировать поведение системы в виртуальной среде, что снижает потребность в физических прототипах. В целом это всего лишь часть более значительного сдвига в сторону цифровой трансформации ПП, что подразумевает фундаментальный сдвиг в мышлении и требует от ПП принятия перехода к комплексному подходу в СППР при котором заинтересованные стороны ПП работают вместе для разработки более эффективных, действенных и гибких решений в условиях быстро меняющихся требований рынка.

Важнейшим принципом создания СППР ПП на основе интеграции MBSE и ИИ является нацеленность на снижение стоимости владения (эксплуатации) предприятия и обеспечение высокой скорости реагирования на внешние и внутренние изменения. Результат достигается за счет установления общего понимания всеми участниками структуры и значения информации, использования точных семантически и синтаксически однозначных системных моделей, улучшения коммуникации, расширения знаний и повторного использования информации. Дополнительным результатом таких систем является возможность сценарного моделирования ситуаций и реакций на них, а также обучение персонала. Все это открывает возможность использовать в СППР ПП модели и алгоритмы ИИ. Такие модели должны быть «предобучены» на верифицированных данных, и использованы в дальнейшем как база знаний ПП.

Другим ключевым принципом построения СППР ПП на основе методологии MBSE является необходимость участия всех заинтересованных сторон с самого начала разработки системной модели начиная с верхнего уровня, с уровня бизнес полагания, с определения основных бизнес целей, бизнес-процессов, и стратегии, которые вместе определяют контекст рассмотрения модели, на основе которого строится онтологическая модель предприятия. Указанную особенность хорошо иллюстрирует интеграция слоев представления ПП (рис.36), которая хорошо согласуется с онтологией для описания его архитектуры, называемой моделью Закмана. На рисунке 35 представлены базовые модели системного представления ПП: онтологические модели, архитектурные системные модели основных системных сущностей (требования, функции, компоненты, процессы), атрибутированные архитектурные модели, математические модели и компьютерные модели. Нумерация на рисунке 35 показывает последовательность действий – сначала строятся онтологические модели для всех слоев.



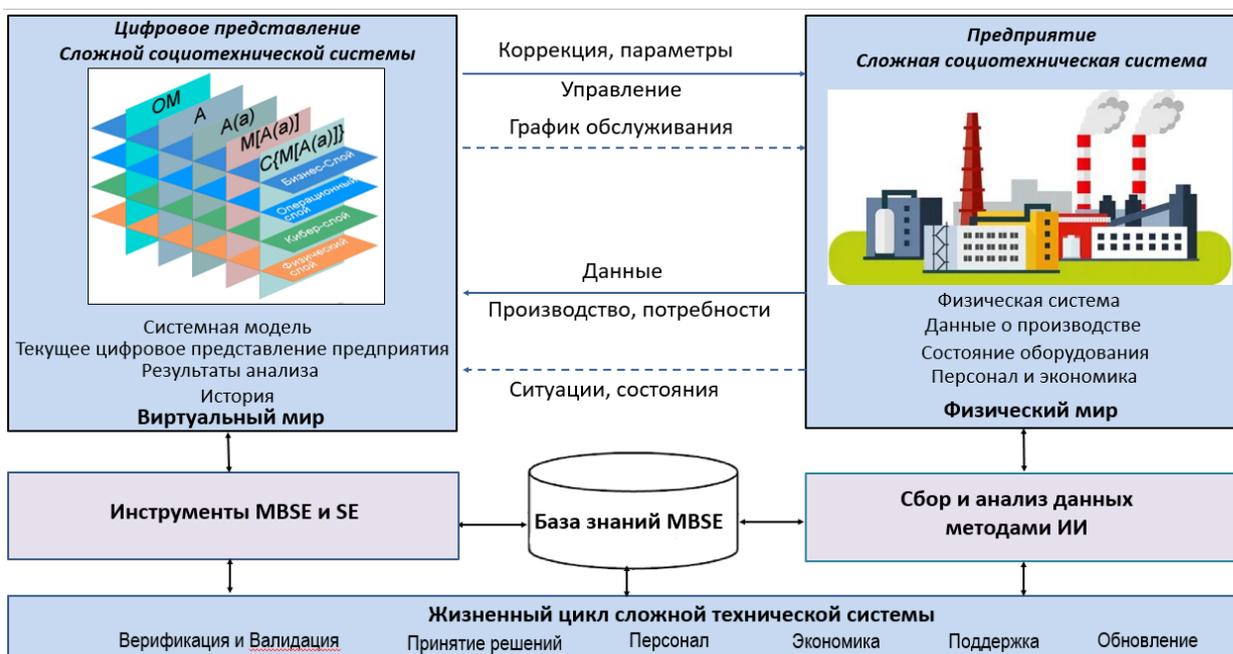
**Рис. 36.** – Взаимосвязь слоев ПП при применении MBSE. ОМ – онтологические модели, А – архитектурные модели, А(а) – атрибутированные архитектурные модели, М[А(а)] – математические модели, С{М[А(а)]} – компьютерные модели

Перечисленные выше модели являются базовыми для формирования моделей на всех уровнях, и корректируются в зависимости от внешних условий и внешней среды. Все системные сущности и отношения, используемые в модели, являются результатом семантики, определенной в онтологической модели предметной области, являющейся реализацией онтологии метамодели. При этом основным инструментом для представления взаимосвязи системных сущностей являются матрицы взаимного влияния (Design Structure Matrix), показывающих влияние сущностей друг на друга [42, 63].

Принцип использования технологий ИИ заключается в том, что в СППР ПП используются технологии ИИ, опирающиеся на извлечение закономерностей из данных мониторинга ПП и на использовании подходов

получения, хранения и обработки знаний в символьном виде. Таки образом расширяются возможности моделирования не только количественных параметров, но и качественных. Также модели ИИ являются участниками формирования онтологических моделей, которые не только служат важным инструментом установления коммуникаций всех заинтересованных сторон, но и устанавливают возможности для «бесшовного» вовлечения новых участников и специалистов различных специальностей. В этой связи открываются возможности по использованию на конкретном ПП накопленных системных знаний, представляемых в виде архитектурных моделей. ИИ служит основой для формирования интеллектуальных помощников, незаменимых в современных сложных производственных цепочках и обслуживании оборудования.

Все перечисленные выше принципы служат одной главной цели СППР – поддержание устойчивого предприятия на пути построения цифрового ПП на основе цифрового системного инжиниринга. Все цифровые технологии и их связь представлена на рисунке 37.



**Рис. 37.** – Структура взаимосвязи виртуального (цифрового) и физического миров.

## 6.2 Формирование системной архитектуры предприятия (функциональной, логической, физической). Примеры.

Изложенный в настоящем пособии метод прошел апробацию на примере существующей газораспределительная станция (ГРС). Такие объекты являются характерными для газовых сетей во многих странах по всему миру. В традиционном инжиниринге набор технических требований формируется на основе нормативных требований и практики эксплуатации объекта в реальных условиях. При таком подходе проверенные технические решения при изменении условий эксплуатации, проведении операционных улучшений, автоматизации, оптимизации полного жизненного цикла могут не обеспечивать заявленную эффективность работы ГРС, а возможности современного моделирования не используются в полной мере.

В целях применения предлагаемого подхода на первом шаге в соответствии с национальными стандартами и локальными требованиями ПАО «Газпром» (например, ГОСТ 34741-2021 Системы газораспределительные. Требования к эксплуатации сетей газораспределения природного газа (Издание с Поправками ред. от 01.12.2023)) которые рассматриваются как исходные данные было составлено семантическое представление предметной области в форме справочника основных терминов и понятий. Такой справочник необходим для максимально однозначного понимания смыслового содержания используемых слов, понятий, выражений. Фрагмент такого справочника представлен на рисунке 38.

Кроме того, был составлен справочник элементов системы, фрагмент которого представлен на рисунке 39.

### Справочник терминов и понятий

Термины	Пояснение	Комментарии и регистрация изменений
Газораспределительная станция	Технологический комплекс, присоединенный к линейной части магистрального газопровода, предназначенный для изменения параметров природного газа перед подачей в сети газораспределения, включая очистку, редуцирование, мероприятия по предотвращению гидратообразования (подогрев), одоризацию, а также измерения расхода газа	СТО Газпром 2-2.3-1122-2017
Узел редуцирования ГРС	Подсистема ГРС, выполняющая функцию уменьшения давления газа для подачи потребителю	Определение принято в рамках данного кейса

**Рис. 38** – Справочник терминов и понятий для системной модели ГРС.

#### Справочник элементов системы

	Индекс	Название	Определение	Параметры
Компоненты	Е.Р.1.1.1	Входной пневмоприводный запорный кран	Расположен на входе в узел редуцирования, используется для перекрытия подачи газа в узел. Может быть открыт (подача газа) или закрыт (нет подачи).	$k_1 = 1$ - открыт $k_1 = 0$ - закрыт
	Е.Р.1.1.2	Рабочий регулятор давления газа	Изменяет площадь проходного сечения и зависящие от него давление и температуру на выходе, регулируется процессом регулирования	Площадь проходного сечения $S_{пр.сеч.}$ : $S_2$ – конечная площадь проходного сечения $S_1$ – начальная площадь $\Delta S$ – изменение площадь проходного сечения
	Е.Р.1.1.3	Выходной запорный кран	Расположен на выходе из узла редуцирования, используется для перекрытия подачи газа далее по технологической линии ГРС. Может быть открыт (подача газа) или закрыт (нет подачи).	$k_2 = 1$ - открыт $k_2 = 0$ - закрыт
	Е.Р.1.2.1	Датчик давления перед регулятором давления	Измеряет давление до входного запорного крана, показывает оператору численное значение	Давление $p_1$
	Е.Р.1.2.2	Датчик температуры перед регулятором давления	Измеряет температуру до входного запорного крана, показывает оператору численное значение	Температура $T_1$
	Е.Р.1.2.3	Датчик давления после регулятора давления	Измеряет давление до выходного запорного крана, показывает оператору численное значение	Давление $p_2$

**Рис. 39** – Справочник элементов системы для системной модели ГРС

В соответствии со стандартами и нормативными документами были выявлены, систематизированы, иерархически упорядочены основные технические требования. Для визуализации представления требований (RBS) по разработанному методу используется граф в виде «дерева» (рисунок 40).

В зависимости от условий эксплуатации и требований ГРС состав компонентов может меняться. Пример фрагмента модели представления

физических компонентов (ФКБ) ГРС в виде графа «дерево» показан на рисунке 41.

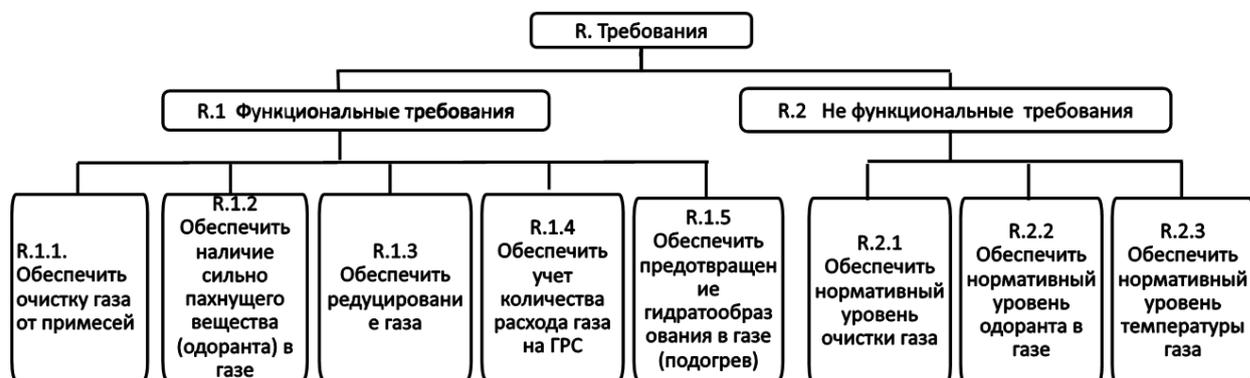


Рис. 40 – Пример фрагмента системной модели представления требований (RBS)

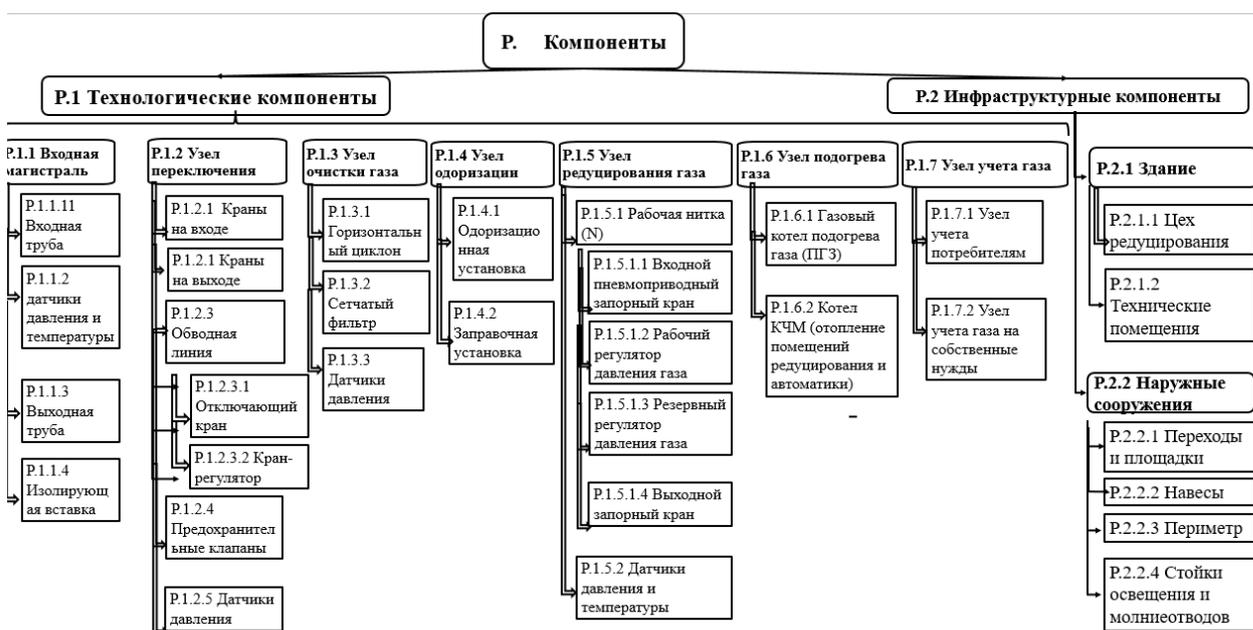


Рис. 41 – Пример фрагмента модели представления физических компонент ГРС (PBS)

На рисунке 42 представлена матрица связанностей требований (RBS на RBS), на рисунке 43 представлена матрица связанностей требований и физических компонент (RBS на PBS и PBS на RBS), на рисунке 44 представлена матрица связанностей и интерфейсов физических компонент

(PBS на PBS). На этом уровне иерархий выделялись только самые главные взаимосвязи. Это позволяет системному инженеру быстро составить описание архитектуры объекта. При дальнейшем моделировании и усложнении физической архитектуры, на следующих уровнях иерархий описания объекта, взаимосвязи требований и компонентов начинают проявляться более явно.

	R.1.1 Обеспечить очистку газа от примесей	R.1.2 Обеспечить наличие сильно пахнущего вещества (одоранта) в газе	R.1.3 Обеспечить редуцирова ние газа	R.1.4 Обеспечить учет количества расхода газа на ГРС	R.1.5 Обеспечить предотвращение гидратообразования в газе (подогрев)	R.2.1 Обеспечить нормативный уровень очистки газа	R.2.2 Обеспечить нормативный уровень одоранта в газе	R.2.3 Обеспечить нормативный уровень температуры газа
R.1.1 Обеспечить очистку газа от примесей			1			1		
R.1.2 Обеспечить наличие сильно пахнущего вещества (одоранта) в газе							1	
R.1.3 Обеспечить редуцирование газа	1				1			1
R.1.4 Обеспечить учет количества расхода газа на ГРС					1			1
R.1.5 Обеспечить предотвращение гидратообразования в газе (подогрев)			1	1				1
R.2.1 Обеспечить количества расхода газа на ГРС	1							
R.2.2 Обеспечить нормативный уровень одоранта в газе		1						
R.2.3 Обеспечить нормативный уровень температуры газа			1	1	1			

**Рис. 42** – Матрицы связанностей требований ГРС (RBS на RBS)

В матрице связанностей требований (рис.42) выделены связанности по функциональности. Например, требование R.1.3 «Обеспечить редуцирование газа» связано с требованиями R.1.1 «Обеспечить очистку газа от примесей», R.1.5 «Обеспечить предотвращение гидратообразования в газе (подогрев)» и R.2.3 «Обеспечить нормативный уровень температуры газа».

	<b>P.1.1</b> Входная магистраль	<b>P.1.2</b> Узел переключения	<b>P.1.3</b> Узел очистки газа	<b>P.1.4</b> Узел одоризации	<b>P.1.5</b> Узел редуцирования газа	<b>P.1.6</b> Узел подогрева газа	<b>P.1.7</b> Узел учета газа	<b>P.2.1</b> Здание	<b>P.2.2</b> Наружные сооружения
<b>R.1.1</b> Обеспечить очистку газа от примесей			1		1	1			1
<b>R.1.2</b> Обеспечить наличие сильно пахнущего вещества (одоранта) в газе				1			1		1
<b>R.1.3</b> Обеспечить редуцирование газа	1	1	1		1	1		1	
<b>R.1.4</b> Обеспечить учет количества расхода газа на ГРС						1	1		
<b>R.1.5</b> Обеспечить предотвращение гидратообразования в газе (подогрев)					1	1		1	
<b>R.2.1</b> Обеспечить нормативный уровень очистки газа			1		1	1			1
<b>R.2.2</b> Обеспечить нормативный уровень одоранта в газе				1			1		1
<b>R.2.3</b> Обеспечить нормативный уровень температуры газа					1	1		1	

**Рис. 43** – Матрицы связанностей требований и физических компонент ГРС (RBS на PBS)

	<b>P.1.1</b> Входная магистраль	<b>P.1.2</b> Узел переключения	<b>P.1.3</b> Узел очистки газа	<b>P.1.4</b> Узел одоризации	<b>P.1.5</b> Узел редуцирования газа	<b>P.1.6</b> Узел подогрева газа	<b>P.1.7</b> Узел учета газа	<b>P.2.1</b> Здание	<b>P.2.2</b> Наружные сооружения
<b>P.1.1</b> Входная магистраль		1							1
<b>P.1.2</b> Узел переключения	1		1		1	1			1
<b>P.1.3</b> Узел очистки газа		1			1	1			1
<b>P.1.4</b> Узел одоризации					1	1			1
<b>P.1.5</b> Узел редуцирования газа			1	1		1		1	
<b>P.1.6</b> Узел подогрева газа		1	1	1	1		1	1	1
<b>P.1.7</b> Узел учета газа						1		1	
<b>P.2.1</b> Здание					1	1	1		
<b>P.2.2</b> Наружные сооружения	1	1	1	1		1			

**Рис. 44** – Матрица связанностей и интерфейсов физических компонент (PBS на PBS)

Взаимосвязь компонентов (PBS к PBS) формируется для обозначения физического взаимодействия и порядка расположения в технологическом процессе (рис. 44). Например, P.1.5 «Установка редукиции газа» взаимосвязана

(расположена сразу за ней) с Р.1.3 «Блок очистки газа», функционально взаимосвязана с Р1.6 «Установка газового нагрева», расположенная в Р.2.1 «Здание», и расположен перед Р.1.4 «Узлом одоризации».

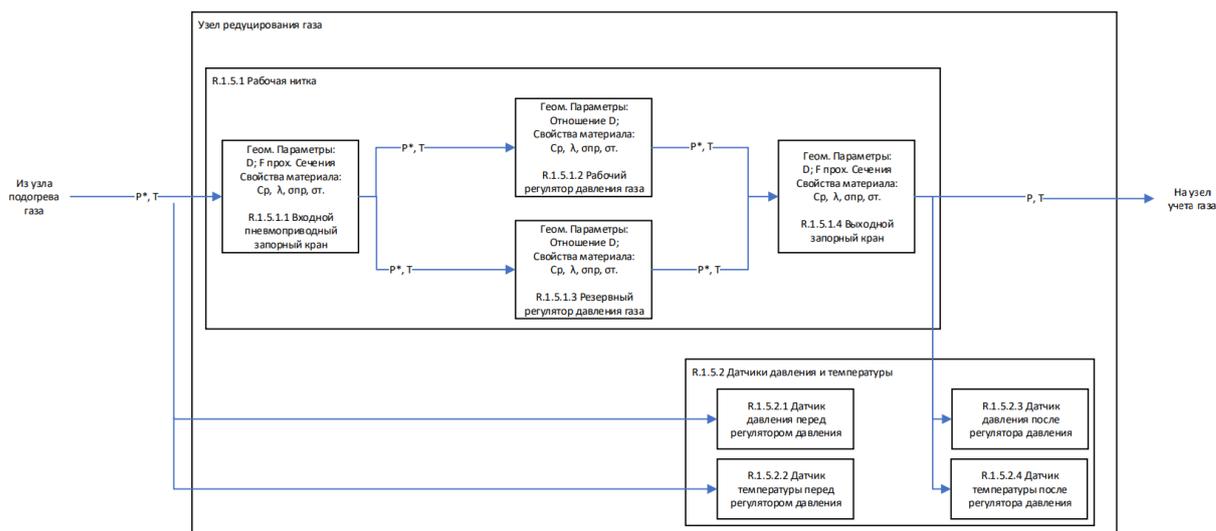
Матрица взаимосвязей требований и физических компонентов (RBS на PBS) определяет перечень компонентов, участвующих в реализации конкретного требования (рис. 43). Например, в выполнении требования Р.1.1 «Обеспечение очистки газа от примесей» принимают участие физические компоненты: Р.1.3 «Блок очистки газа», Р.1.5 «Блок редуцирования газа» и Р.1.6 «Блок подогрева газа», расположенный в Р.2.2 «Здание».

На следующем шаге архитектурные модели дополняются ключевыми атрибутами. На рисунке 45 представлен пример атрибутирования компонентов ГРС.

№	Компоненты ГРС	Параметры							
		6.1	Р1,1 Магистраль	Диаметр	мм	Толщина стенки	мм	Марка металла	марка
6.2	Р1,3 Узел переключения	Марка вентиля	Марка	Предельное давление клапана	МПа	Параметры обв. трубы	мм, марка		
6.3	Р1,3 Узел очистки	Размер ячейки фильтра	мм*мм	Радиус улитки	Мм	Перепад давления на фильтре (ур. Загрязнения)	50 Па		
6.4	Р1,4 Узел измерения	Марка выходного прибора	Марка	Марка прибора изм. На СН	Марка	Сбросное давление на свечу	МПа		
6.5	Р1,5 Узел редуцирования	Количество нитей	шт	Пропускная способность каждой нити	м3/сутки	Тип дросселя	марка	Тип турбогенератора	марка
6.6	Р1,6 Узел подогрева	Мощность котла подогрева	кВт	Мощность котла обогрева	кВт	Расход газа	м3/сутки		
6.7	Р1,7 Узел одоризации	Расход одоранта	г	Марка одоранта	Марка	Концентрация одоранта в газе	г/м3		
6.8	Р1,8 Энергетический узел	Мощность	кВт	Тип генератора	Марка	Тип преобразователя	Марка		

Рис. 45 – Атрибуты компонентов ГРС

На рисунке 46 представлен пример связанности параметров узла редуцирования газа ГРС.



**Рис. 46** – Пример связанности параметров узла редуцирования газа ГРС

Следующим шагом для создания цифрового представления объекта является определение типологии применяемых математических моделей, и их описание. На рисунке 47 приведен пример описания таких моделей для ГРС и атрибуты этих моделей.

На рисунке 47 показаны только газодинамические и тепловые математические модели. Кроме них в процессе цифровой трансформации GDS для физических компонент используются энергетические, прочностные, эргономические и ресурсные математические модели.

Далее разрабатывается архитектура математических моделей. Пример архитектуры математических моделей приведен на рисунке 48.

Следующим шагом является описание параметров и характеристик математических моделей в виде многоуровневой матрицы требований, связанностей и ограничений, как система взаимосвязанных структур данных, содержащих формализованные требования. Таким образом формируется математические модели и многоуровневая матрица требований. Далее для создания цифрового представления промышленного предприятия на основе математических моделей строятся компьютерные и цифровые модели.

**Legend:**

$P^*$  — total gas pressure,  $n/m^2$   
 $T$  — static gas temperature, K  
 $D$  — pipeline diameter, m  
 $Ffs$  — flow section area,  $m^2$   
 $Cp$  — isobaric heat capacity, J/K  
 $\lambda$  — thermal conductivity, W/ (m K)  
 $\sigma_t$  — tensile strength, MPa  
 $\sigma_{yt}$  — yield strength, Pa

**Газодинамические математические модели:**

- уравнение Навье-Стокса —  $\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f}$
- уравнение движения Эйлера —  $\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \mathbf{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p$
- уравнение неразрывности потока —  $\rho_1 S_1 v_1 = \rho_2 S_2 v_2$
- уравнение Бернулли —  $\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = \text{const}$

**Тепловые математические модели:**

- уравнение сохранения энергии —  $\frac{mv_1^2}{2} + mgh_1 = \frac{mv_2^2}{2} + mgh_2$
- уравнение Майера (теплоемкость) —  $C = \frac{dQ}{dT}$
- уравнение теплопроводности —  $\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 T + \frac{q_v}{c \cdot \rho}$
- уравнение теплового баланса —  $Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots = 0$
- законы термодинамики —  $\Delta U = Q + A \quad \Delta S = \frac{Q}{T}$

**Энергетические математические модели:**

- уравнение КПД —  $\eta = \frac{A_n}{A_s} \cdot 100\%$
- уравнение мощности —  $N = \frac{A}{t}$

**Прочностные математические модели:**

- свойства материала
- предел прочности —  $\sigma_B = \frac{P_{\max}}{F_0}$

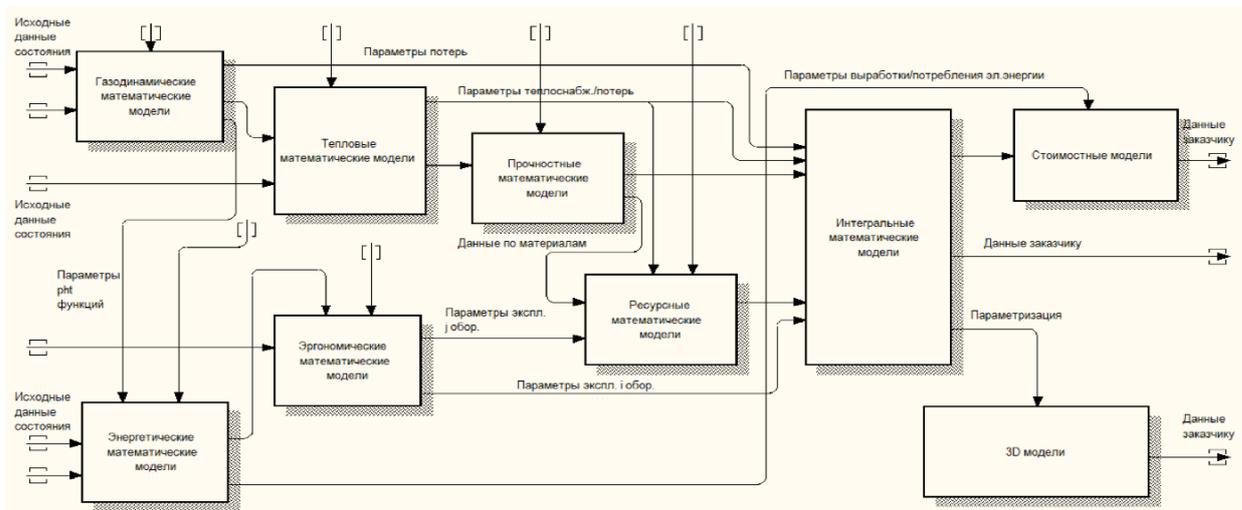
**Эргономические математические модели:**

- зависимость эргономики ГРС от ее максимальной пропускной способности

**Ресурсные математические модели:**

- ресурс оборудования (t, часов)

**Рис. 47** — Пример описания математических моделей для ГРС и их атрибутов



**Рис. 48** — Пример архитектуры математических моделей для ГРС

### 6.3 Формализация взаимосвязи физического, киберфизического и бизнес слоев в системной модели.

Системная инженерия занимается разработкой сложных систем, сложность которых, как правило, определяется областью применения продукта. Поэтому зачастую не удается интегрировать дисциплины машиностроения и электротехники с компьютерными науками, включая культурные аспекты. Однако успех будущих киберфизических систем зависит не только от функциональности оборудования, но и, в конечном итоге, от его интеграции в распределенное программное обеспечение. Представленный далее усовершенствованный цифровой двойник сочетает в себе необходимые условия для эффективной интеграции оборудования и программного обеспечения, особенно для больших и сложных систем, таких как киберфизические системы. Поэтому он основан на усовершенствованной системной модели, которая включает в себя соответствующие архитектурные решения, необходимые для соответствующих областей. Благодаря этой устойчивой интегрированной архитектуре, возникающие артефакты могут быть повторно использованы, что делает применение методов, основанных на моделях, экономически оправданным. Это позволяет осуществлять автоматизированный контроль качества, моделирование, применять искусственный интеллект и анализ больших данных, а также служит связующим звеном между необходимыми культурными изменениями для организации кросс-функционального взаимодействия.

Общеизвестно, что уже как минимум последние 30 лет механические системы становятся всё сложнее. Некоторые утверждают, что они следуют закону Мура, согласно которому количество транзисторов в плотных интегральных схемах удваивается как минимум каждые два года. Однако для механических систем это не означает, что количество деталей удваивается каждые два года. Из соображений стоимости всё даже наоборот. Фактически, это означает, что количество предоставляемых функций растёт экспоненциально. Эти функции обеспечиваются совместными усилиями

механики, электротехники/электроники (Э/Э) и информатики. В дальнейшем такие комбинированные системы будем в этом разделе называть киберфизическими.

Киберфизические системы (КФС) [104] включают в себя самые впечатляющие инновационные технические продукты, такие как автомобили, самолёты, поезда, корабли, космические аппараты, спутники и т. д., включая киберфункции, такие как управление дорожным движением, межсистемная связь и информирование клиентов. Это означает, что они широко распространены и вносят огромный вклад в нашу экономическую мощь и развитие. К сожалению, сегодня инженерия механических систем по-прежнему не готова к удовлетворению изменчивых, неопределённых, сложных и неоднозначных (*volatile, uncertain, complex, and ambiguous* – «VUCA») требований к продукции современных КФС.

Например, в автомобильной промышленности пробел в VUCA, рассматриваемый в этом разделе, обусловлен не только современными функциями, такими как помощь водителю, коммуникация и подключение, такими как сетевые функции (*car2car*) или коммуникация с ближней и дальней средой (*car2x*). Он также решает действительно новую задачу автономного вождения с его огромным набором необходимых безопасных функций распознавания и коммуникации в ближней и дальней зоне, которые однажды заменят водителя.

Кроме того, многие ранее чисто механические функции/компоненты, например, подвеска, рулевое управление, торможение и система сгорания, сегодня также управляются программным обеспечением. Более того, эти функции всё больше защищаются функциями безопасности и диагностики. Для повышения комфорта клиентов и качества продукции требуются дополнительные функции, такие как аналитика данных, анализ больших данных и искусственный интеллект. Как справиться со всеми этими функциями? Как надёжно управлять их взаимодействием и взаимосвязями?

Экономический дарвинизм заставляет машиностроительные отрасли проверять свои текущие процессы разработки продукции на предмет их применимости к разработке компьютерно-физических систем (CPS), то есть к интенсивной и надежной интеграции аппаратного и программного обеспечения. Чтобы не стать динозавром экономического дарвинизма, подход, представленный в этой главе, предлагает способ непрерывной адаптации соответствующего процесса разработки продукции и необходимой культуры сотрудничества к текущему уровню развития инженерии компьютерно-физических систем и новым рыночным условиям [105].

Представляет интерес комплексный подход к интегрированному моделированию, который упрощает интеграцию аппаратного и программного обеспечения с помощью усовершенствованной системной модели (Advanced System Model). Он также позволяет оптимизировать время и бюджет, необходимые для индустриализации киберфизической системы с помощью специализированного усовершенствованного цифрового двойника (Advanced Digital Twin). Кроме того, он повышает качество продукции за счёт применения превентивных мер и способствует эффективному выполнению возможных необходимых ретроспективных мер. Подход основан на функционально-ориентированной системной инженерии в сочетании с ориентированным на решение дополнением на основе модели [105].

Представленный в этом разделе подход к комплексному моделированию называется «киберфизическая системная инженерия на основе моделей» (MBCPSE). Он объединяет соответствующие преимущества базовых дисциплин – машиностроения, электротехники и информатики – для преодоления технических и культурных пробелов в сотрудничестве и растущей сложности систем киберфизического моделирования. Он должен применяться в качестве комплексного подхода к разработке, охватывающего области применения, поскольку ни киберфизическое моделирование, ни применение MBCPSE больше не могут рассматриваться как специфичные для конкретной области. MBCPSE фокусируется на сложных системах, таких как

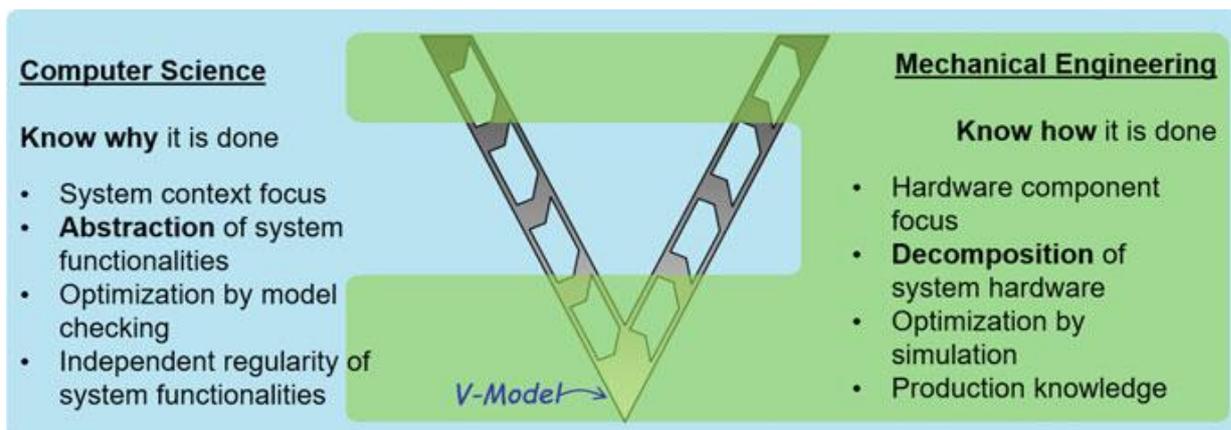
кибербезопасность, и в этой статье автомобиль является примером. Более подробное рассмотрение термина КФС показывает, что он охватывает области «кибер», «физика» и «система». Система определяется как «комбинация взаимодействующих элементов, организованных для достижения одной или нескольких поставленных целей». Киберсистемы относятся к программным системам и характеризуются использованием компьютеров и информационных технологий, отсюда и название дисциплины «информатика». Физические системы относятся к действию сил природы в целом, отсюда и названия дисциплин «механика» и «электротехника». КФС объединяет все три дисциплины, что приводит к высокой степени сложности системы.

Каждая из участвующих дисциплин имеет свой подход к решению проблем и принятию решений, то есть к культуре и психологии. В КФС эти различия часто приводят к недопониманию, разочарованию, задержкам и, как следствие, увеличению времени разработки и высоким затратам. Чтобы избежать этих проблем, необходимо выявить потенциальные препятствия, а также сосредоточиться на преимуществах каждой дисциплины, чтобы сохранить их преимущества.

Помимо различных навыков и знаний, дисциплины используют различные методы управления сложностью, основанные на опыте разработчиков. В электротехнике и машиностроении обычно используется физическая декомпозиция систем, основанная на (геометрических) компонентах. Для этого декомпозиция начинается со всей системы, которая итеративно разлагается на подсистемы до тех пор, пока возникающие компоненты не станут управляемыми для независимой разработки.

В отличие от этого, специалисты по информатике обычно декомпозируют систему в соответствии с её функциональным поведением. Для этого специалисты по информатике рекурсивно разбивают систему на разные уровни абстракции, пока они не станут достаточно простыми для независимого решения. Для последующего структурного и поведенческого

моделирования широко используется унифицированный язык моделирования (UML) или язык системного моделирования (SysML) [39, 41, 70], который часто оптимизируется с помощью инструментов проверки моделей и генерации кода. На рисунке 49 показан ряд сильных сторон методов разработки продуктов в информатике и машиностроении. Они приблизительно соответствуют хорошо известной базовой V-модели [32].



**Рис. 49** – Сильные стороны компьютерной науки и машиностроения в контексте базовой V-модели.

Однако применимое решение для любого подхода к системной инженерии сложных систем должно сочетать в себе все три дисциплины со всеми их характеристиками, упомянутыми выше. Инженеры-механики и электротехники фокусируются на аппаратных компонентах, решают проблемы сложности путём декомпозиции системного оборудования, оптимизируют компоненты путём моделирования и обладают особыми знаниями о системах производства оборудования. В отличие от этого, специалисты по информатике фокусируются на системном контексте, решают проблемы сложности путём абстракции системных функций, оптимизированных путём проверки моделей, и обладают особыми знаниями о повторном использовании независимых системных функций.

Независимо от цели, роль моделирования и качество моделей чрезвычайно важны не только в рамках дисциплин, но и для разработки

киберфизической системы в целом. Интеграция различных моделей затруднена, а точнее, невозможна, поскольку отсутствует общая «семантическая связь». Термин «семантическая связь» охватывает лингвистические аспекты, такие как выражения и понимание слов, а также модели, архитектуры и их элементы [106]. Для успешного проекта, основанного на моделях, единого разговорного языка недостаточно. Помимо глоссария с точным определением часто используемых терминов, необходимо также определить модели, архитектуры и их элементы, такие как интерфейсы, информация и т. д., а также точно указать их взаимосвязи. В противном случае, вероятно возникновение упомянутых выше недопониманий и разочарований, что поставит под угрозу успех проекта. Более того, даже при наличии семантической связи интеграция различных моделей технически невозможна из-за различий в языках моделирования, руководствах по моделированию, фокусах моделирования, а также несовпадения архитектурных принципов и интерфейсов. Моделирование в данном случае требует значительных затрат, а сами модели непригодны для комплексного моделирования. Кроме того, повторное использование моделей ограничено, поэтому окупаемость инвестиций невелика.

Для решения этой задачи MBCPSE объединяет все модели в комплексную модель разработки – Advanced System Model. Интеграция применяемых моделей осуществляется в соответствии с известными методами компьютерной науки. Встроенность в методы компьютерной науки была выбрана, поскольку последовательное использование сложных моделей повысило качество и эффективность разработки программного обеспечения в компьютерной науке за последние десятилетия. Это обеспечивает последовательную методологию, основанную на моделях, и направлено на значительное повышение окупаемости инвестиций.

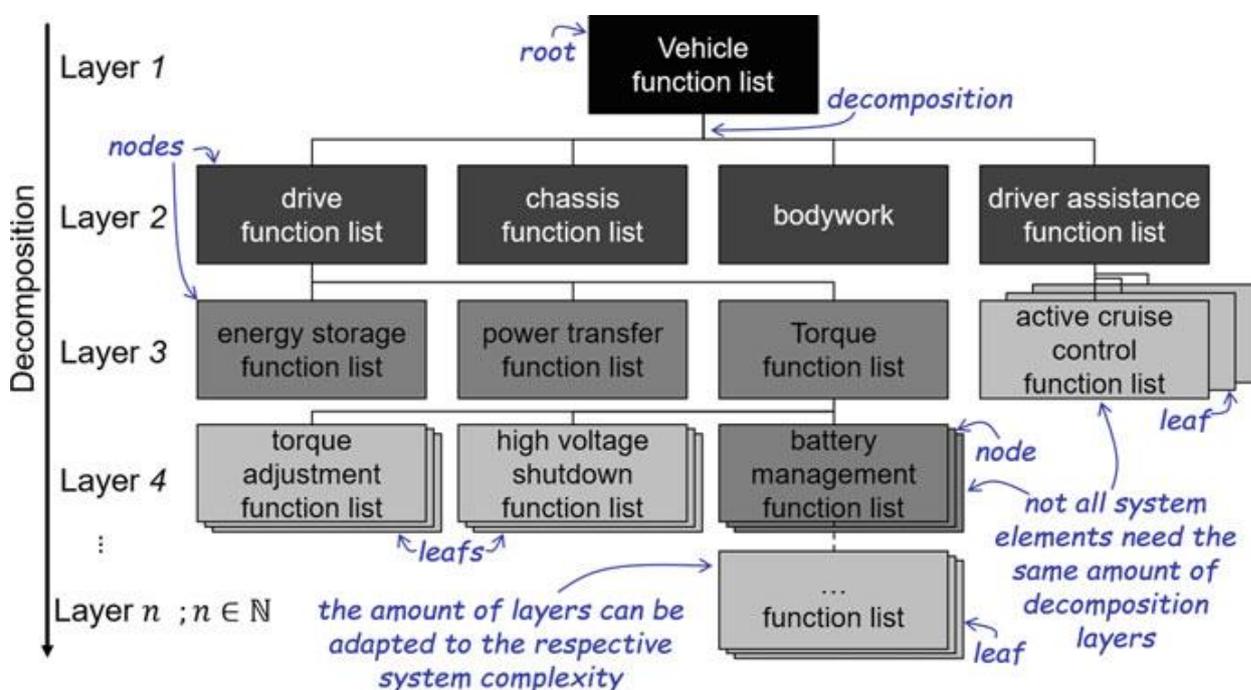
Целью декомпозиции как архитектурного инструмента является разделение сложной системы на менее сложные подсистемы. Обычно это делается, начиная с корневого элемента системы, проходя через один или

несколько промежуточных уровней в зависимости от сложности системы, пока не будет достигнут листовой элемент системы. Необходимое количество уровней декомпозиции зависит от сложности продукта. Таким образом, транспортное средство может быть декомпозировано на три-пять уровней, а самолет или космический корабль — более чем на восемь. Количество уровней может быть переменным и при необходимости может быть асимметричным. Результирующее представление представляет собой системную архитектуру продукта, которая структурирована системными элементами типов «корень», «узел» и «лист», как показано ниже.

*Корень:* В MBCPSE декомпозиция системы начинается со слоя 1, представляющего весь продукт. Он содержит один системный элемент типа «корень», поскольку он является отправной точкой для всей декомпозиции продукта. В дальнейшем термин КФС будет использоваться для продукта, предназначенного для передачи заказчику. Следовательно, границы КФС определяются корнем. Внешние функции, такие как поддержка бэкенда, рассматриваются как часть среды КФС, но не самой КФС. Следовательно, КФС может работать в системной среде более высокого уровня в системном режиме. Однако заказчиком она воспринимается как самостоятельный продукт. Бэкенд-часть корня определяет интерфейс на уровне продукта и более подробно определяется последующими слоями, заканчивающимися на уровне компонентов. Клиентская часть корня содержит необходимое содержимое для руководства по продукту.

*Узел:* Обычно для реализации функциональности киберфизической системы требуется несколько соединённых промежуточных слоёв. Например, разгон электромобиля представляет собой сложное взаимодействие шасси, трансмиссии, силовой электроники, электрической машины и высоковольтного накопителя. В MBCPSE класс этих промежуточных слоёв декомпозиции называется «узлами». В зависимости от сложности узла, дополнительная декомпозиция в соответствии с архитектурой системы может привести к появлению подчинённых узлов.

*Лист:* Системные элементы последнего уровня декомпозиции относятся к типу «лист». Они определяют самые нижние элементы системной архитектуры рассматриваемой системы управления процессом – компоненты. Листы обычно передаются на субподряд или изготавливаются собственными силами при промышленном внедрении системы управления процессом. На рисунке 50 показан фрагмент архитектуры транспортной системы, полученной в результате декомпозиции, с упором на функциональность крутящего момента в качестве примера.

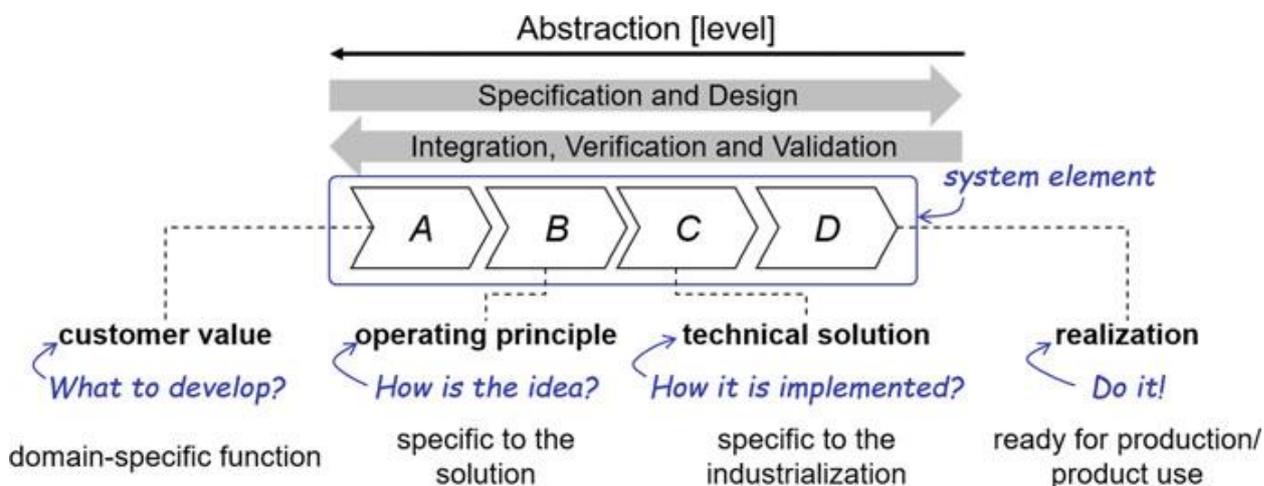


**Рис. 50** – Фрагмент архитектуры системы транспортного средства с упором на функциональность крутящего момента

Выражение «список функций» (“function list”) в блоках, показанных на рисунке 50, было выбрано намеренно, чтобы подчеркнуть, что каждый отдельный элемент архитектуры системы должен обеспечивать определённую функциональность независимо от его типа, то есть корня, узла или листа. Полное, но краткое описание функциональности элемента системы является одним из ключевых моментов в системной инженерии и, конечно же, ещё более важно при работе с КФС.

Каждому элементу системы в слое  $n$  могут быть назначены требования из слоя  $n-1$ . Следовательно, не все требования должны быть смоделированы или реализованы в одном конкретном слое. Например, функции транспортного средства могут быть реализованы клиентами, то есть конечными потребителями, в то время как функции безопасности, связанные с синхронизацией, обычно реализуются только в последовательных слоях. Аналогичным образом можно обрабатывать механические требования. Например, импульс силового агрегата задаётся в слое  $n$  и далее задаётся в слое  $n + 1$  для определения того, генерируется ли импульс электрическим способом или традиционным способом, двигателем внутреннего сгорания. Конечно, они могут использовать ту же коробку передач, указанную на уровне  $n + 1$ , как часть силовой передачи на уровне  $n$ . Постоянное использование иерархической декомпозиции элементов системы в функционально-ориентированном подходе способствует эффективной обработке вариантов.

В MBCPSE функционал используется для интеграции декомпозиции и абстракции. В отличие от переменного количества слоёв декомпозиции, количество уровней абстракции определено равным четырём, как показано на рисунке 51. Эти четыре уровня абстракции реализуются для каждого элемента системы следующим образом.



**Рис. 51** – Спецификация элемента системы: уровни абстракции и их назначение

Потребительская ценность (Customer Value): Цель уровня А — определить потребительскую ценность системного элемента посредством требуемых функций, что приводит к составлению списка функций. Для каждой функции определяются условия окружающей среды и контекстные условия. Важно отметить, что эти функции не зависят от дисциплин, необходимых для их разработки. Другими словами, это могут быть механические, мехатронные и программные функции. Для этой цели элементы спецификации уровня А реализуются следующим образом:

- Диаграммы вариантов использования SysML для представления обзора всей системы на высоком уровне абстракции с сервисами, предоставляемыми с точки зрения пользователя.
- Текстовые требования, дополняющие диаграммы вариантов использования.

Модель включает в себя как диаграммы, так и текстовые требования. Текстовые требования дополняют диаграммы информацией, которую невозможно или не предполагается моделировать. Следовательно, между диаграммами и текстовыми требованиями не должно быть избыточности. Если требования требуются вне модели, они экспортируются из модели и не адаптируются, поскольку модель является единственным источником достоверной информации.

Принцип действия (Operating Principle): Каждая функция из списка функций, созданного на уровне А, дополнительно специфицируется принципом действия на уровне В (см. рис. 51). Требуемые функции разбиваются на подчиненные функции, которые либо являются локальными, т.е. внутри системного элемента, либо функциями дочернего системного элемента, выделенного на следующем уровне декомпозиции. Полученные функции затем логически интегрируются на уровне функций. Для достижения функциональной согласованности на уровне системных элементов все

логически интегрированные функции списка функций должны быть интегрированы в логическую архитектуру.

По возможности, принцип действия не предполагает предвосхищения технического решения, хотя могут применяться определенные условия продукта. Такие условия продукта могут быть довольно простыми, но могут оказывать существенное влияние, например, автомобиль имеет четыре колеса и приводится в движение (электрическим) двигателем, а не турбиной. При необходимости они добавляются в виде (текстовых) требований. Элементы спецификации уровня В реализуются с помощью:

- Диаграмм активности SysML для моделирования последовательностей действий.
- Диаграммы состояний SysML для моделирования состояний рассматриваемой системы и диаграммы последовательности SysML для моделирования потока вариантов использования с акцентом на взаимодействия.
- Текстовые требования к диаграммам SysML.

Техническое решение (Technical Solution): На уровне С функционально-ориентированное представление принципа действия сопоставляется с механическим представлением системы, т.е. функции из списка функций назначаются предоставленным техническим элементам. Другими словами, определяется, как функция и её принцип действия технически реализуются. Технические элементы представляют собой абстрактное представление одной из возможных схем индустриализации. Это подразумевает, что технические элементы соответствуют элементам системы. Однако возможно объединение нескольких элементов системы в один технический элемент или распределение одного элемента системы по нескольким техническим элементам в одном варианте. Например, регулировка крутящего момента включает в себя функциональные возможности, электронику для регулирования, механические части, такие как электрическая машина, и программное обеспечение для интеллектуального управления. Все эти

технические элементы могут быть сопоставлены одному элементу системы, например, компоненту. Или же электроника и программное обеспечение могут быть переданы на аутсорсинг другому элементу системы по соображениям электромагнитной совместимости. Поскольку обслуживание архитектуры требует усилий, рекомендуется сопоставлять технические элементы с элементами системы в соотношении 1:1. В противном случае техническую и системную архитектуры придется поддерживать отдельно, что приведет к значительным дополнительным усилиям и может привести к несоответствиям.

Требуемые технические элементы далее специфицируются локально, то есть внутри уровня декомпозиции, или с использованием функциональности дочернего технического элемента, выделенного в последующем уровне декомпозиции. Кроме того, технические элементы определяют, какие элементы будут реализованы аппаратно или программно, если принцип работы в соответствующем уровне уже достаточно детализирован. Результирующая техническая архитектура объединяет все технические элементы для достижения технической согласованности. Элементы спецификации уровня C реализуются посредством:

- Диаграммы определения блоков SysML для описания взаимосвязей между техническими элементами.
- Внутренние блок-схемы SysML для описания интерфейсов и информационных потоков между техническими элементами.
- Текстовые требования к диаграммам SysML.

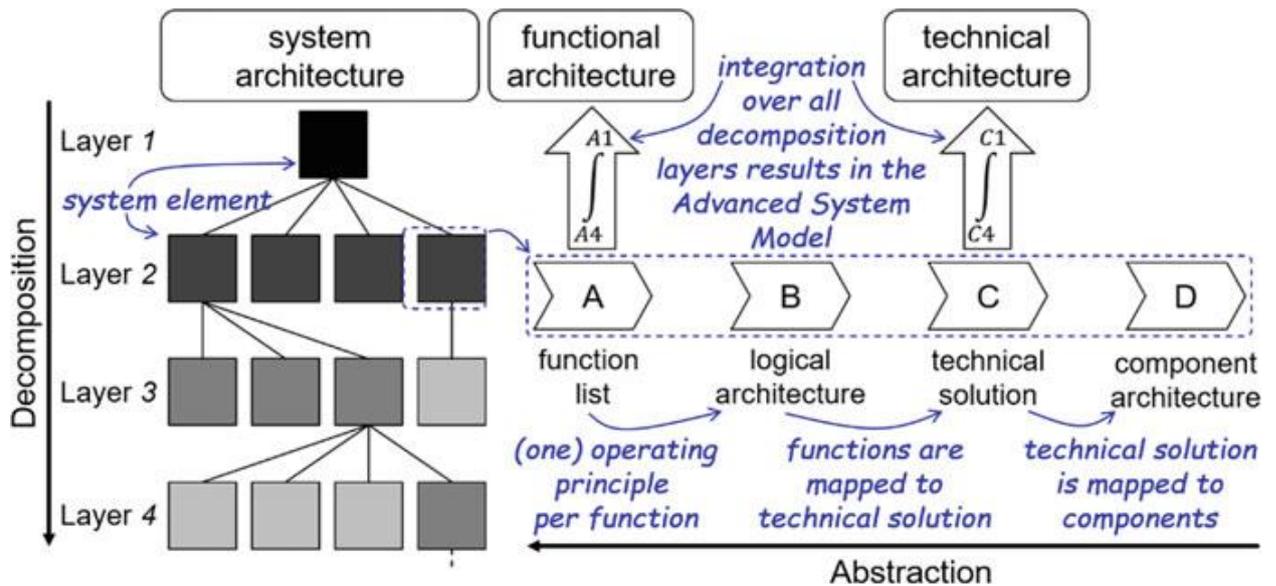
Реализация (Realization): На основе технического решения реализация технических элементов определяется на уровне D. Основное внимание на этом уровне уделяется определению и документированию необходимых деталей аппаратного и программного обеспечения для обеспечения их эффективной индустриализации. Структура называется компонентной архитектурой и остаётся локальной в пределах уровня декомпозиции технического элемента. Необходимые компоненты далее определяются локально, то есть внутри технического элемента, или с использованием функциональности дочернего

технического элемента, выделенного на следующем уровне декомпозиции. Архитектура компонентов консолидируется итоговым техническим решением, которое объединяет все технические элементы на одном уровне декомпозиции для достижения технической согласованности. Прозрачный и документированный процесс уточнения и принятия решений от уровня А до уровня D приводит к созданию интегрированной спецификации системного элемента. Это позволяет быстро реагировать на запросы на изменения в любых обстоятельствах и допускает повторное использование. В случае появления новых технических решений можно быстро выбрать другой тип реализации без изменения базовой функциональности технических элементов. Благодаря этому локальные изменения могут быть протестированы и утверждены локально, не изменяя интерфейсы. Это оказывает огромное влияние на возможное снижение затрат при индустриализации продукта.

Расширенная системная модель (Advanced System Model) является важнейшим элементом системной инженерии в рамках MBSE. Она предоставляет все необходимые архитектурные представления и информацию о КФС. Она включает в себя архитектуру системы, функциональную архитектуру, логическую архитектуру, техническую архитектуру, архитектуру компонентов и части архитектуры электроники и электроники, как показано на рисунке 52. Таким образом, расширенная системная модель обеспечивает семантическую связь для интеграции всех упомянутых дисциплин.

Все подробности по использованию MBSE можно найти в работе [105], находящейся в свободном доступе.

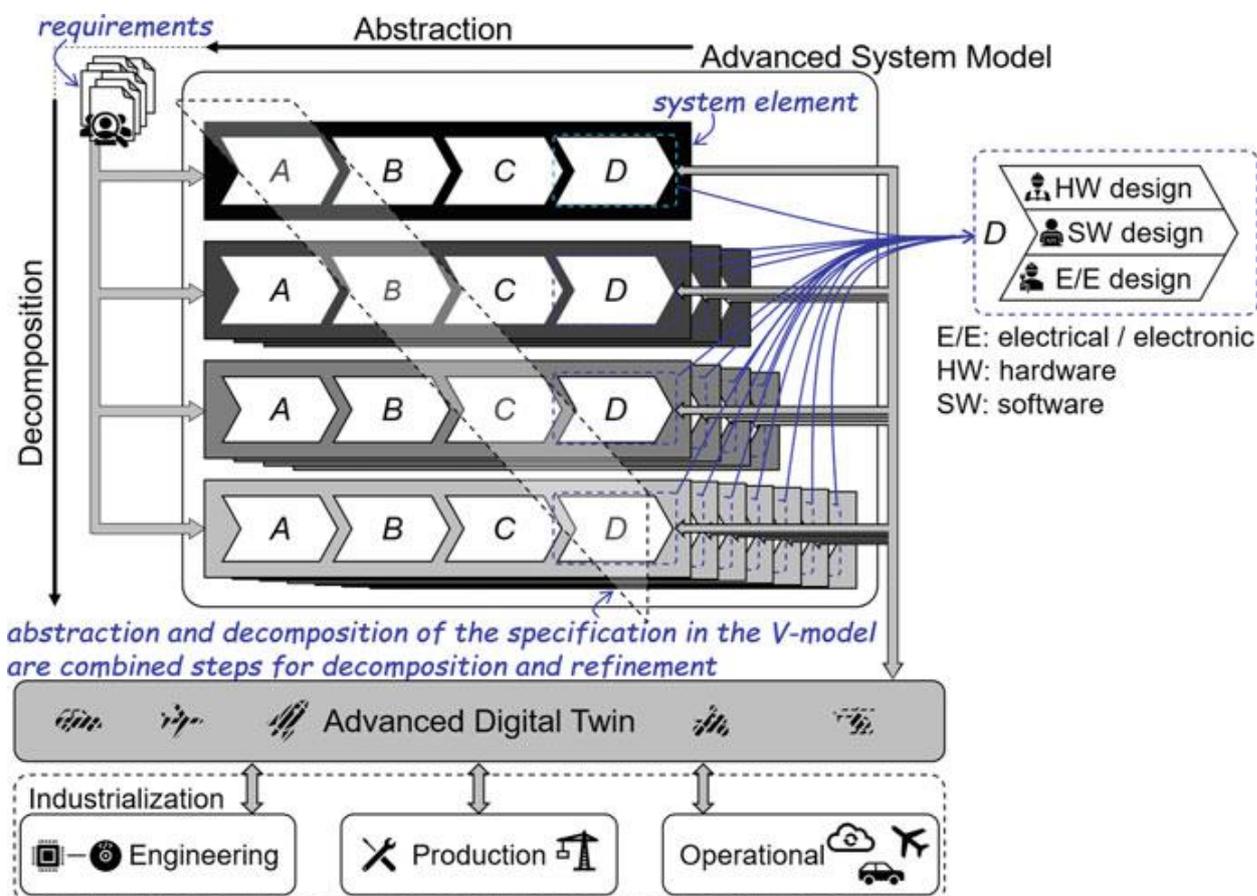
Далее в работе [105] указывается, что поскольку все данные, относящиеся к продукту, являются полными и согласованными, а также доступны в едином шаблоне, т.е. семантически связаны, усовершенствованный цифровой двойник по сути обеспечивает согласованность для интегрированных подходов к проектированию, производству и эксплуатации, как показано на рисунке 52.



**Рис. 52** – Расширенная системная модель (Advanced System Model)

На рисунке 53 показано, как все элементы MBCPSE связаны между собой, образуя структуру системной инженерии. Он показывает, как декомпозиция и абстракция охватывают документацию CPS. Основываясь на структуре базовой V-модели, элементы системы четко определены усовершенствованной системной моделью. Диагональ на рисунке 53 демонстрирует очевидную экономию средств, упомянутую в разделе «Усовершенствованная системная модель», т.е. этапы декомпозиции и абстракции разрабатываются и документируются за один шаг. Это не позволяет осуществлять итеративную разработку из-за сложности каждого шага. Следовательно, «диагональная разработка» пропускает как минимум 75% этапов разработки и, следовательно, кажется эффективной, но не является устойчивой. Сходство с так называемой каскадной моделью очевидно. При такой грубой документации повторное использование артефактов разработки невозможно с точки зрения надёжного тестирования и утверждения. В отличие от диагонального пути, разделённые этапы абстракции и декомпозиции в MBCPSE предназначены не только для уточнения, но и для возможности повторного разбиения элементов на части для модификации или технической замены. Поэтому необходимо указать всю матрицу абстракции и

декомпозиции на рисунке 53 со всеми её системными элементами. Более того, различные системные элементы расширенной системной модели, например, уровень 2/уровень А и уровень 3/уровень С, могут быть подвержены различным стилям разработки, например, гибким или традиционным, при условии, что это не повлияет на их интерфейсы и результаты документирования. Ещё одним важным моментом, конечно же, является то, что все структурные изменения должны выполняться в расширенной системной модели, а не в расширенном цифровом двойнике, т.е. после её разветвления.



**Рис. 53** – Усовершенствованный цифровой двойник является ответвлением от многократно используемой усовершенствованной системной модели (Advanced System Model) и предоставляет всю информацию и документацию для эффективной индустриализации одной конкретной версии КФС.

Далее в работе [105] представлен пример разработки функции помощи в удержании полосы движения (ЛКА), с которым читатель может ознакомиться самостоятельно, чтобы убедиться в успешности применения MBSE подхода в решении практических задач. ЛКА – это (продуктовая) функция, разрабатываемая в разных областях и, следовательно, имеющая междисциплинарные требования. Для этой цели в [105] приведены уровни абстракции, соответствующие разделу «Абстракция», и различные представления в рамках выбранного фреймворка SysML. Слой декомпозиции может иметь тип «узел», что означает, что функция ЛКА является частью КФС, или тип «корень», что означает, что функция ЛКА сама по себе является КФС. Он не может иметь тип «лист», поскольку компоненты недостаточно определены. В любом случае, в качестве примера, представленное моделирование представляет собой произвольный слой декомпозиции, представляющий перспективу ЛКА, которая должна быть интегрирована в расширенную системную модель КФС на соответствующем уровне декомпозиции. Другими словами, функция ЛКА интегрируется сначала в функциональную архитектуру, а затем – в системную архитектуру. Содержимое представляет собой примерную версию артефактов разработки и призвано проиллюстрировать методологию моделирования MBSE, не претендуя на полноту информации о функциях.

#### 6.4 Модельно-ориентированный системный инжиниринг и цифровая трансформация

Цифровая трансформация бизнеса в общем и существующих промышленных предприятия являются актуальными проблемами в современном мире [10, 94, 107-110]. При этом современные тенденции связаны с развитием кибер-физических технологий и автоматизации в рамках Индустрии 4.0 и перехода к Индустрии 5.0, технологий цифровых двойников,

созданием и оценкой цифровых активов, а также возможным переходом в рамках цифровой экономики от конкуренции к стратегии кооперации [111].

Для оценки цифровой трансформации в России считается важным внедрение цифрового паспорта промышленного предприятия и соответствующей цифровой зрелости [112] в том числе на основе Государственной информационной системы промышленности. Таким образом для существующего промышленного предприятия актуальной является построение цифрового образа предприятия в рамках процесса реинжиниринга для реализации внедрения инновационных цифровых технологий.

Анализ практики создания цифрового представления существующих промышленных предприятий в рамках их цифровой трансформации позволяет сделать следующие выводы [113-114]:

- Сегодня практически не существует предприятия, не затронутого цифровой трансформацией, и нет вида работы, который не был бы изменен, пусть и незначительно, цифровыми инструментами, хотя во многом это касается процессов управления.
- Стандартных технических навыков и глубокого интереса к новым компьютерным технологиям недостаточно для процветания в цифровой экономике, необходимо использование инструментов системного инжиниринга.
- Современные цифровые технологии постоянно совершенствуются, в том числе за счет использования технологий искусственного интеллекта, и соответственно меняются и способы их применения. Это означает, что предприятия и их персонал находятся в состоянии постоянных изменений, что требует привлечения дополнительных ресурсов.

В современном мире, когда повышается значимость данных, информации и алгоритмов, невозможным оставаться конкурентоспособным и добиться успеха в развитии предприятия без перехода на цифровое мышление, позволяющего по-новому взглянуть на мир и изменить свое поведение, в

первую очередь управленческого персонала. Цифровым мышлением будем называть набор подходов, которые используются на предприятии для использования данных, информации, алгоритмов и компьютерных технологий как ресурса.

С экономической точки зрения цифровая трансформация существующего предприятия является всегда затратной статьёй, которая требует специальной поддержки со стороны акционеров. В этой связи актуальной является задача по созданию такого цифрового представления сложного технического объекта, которое базируется на рассмотрении такого объекта как сложной технической системы, что позволит комплексно рассматривать как будут создаваться новые кооперационные цепочки в рамках формируемой цифровой экономики. В настоящее время развитие современных инструментов MBSE позволяет решить такие проблемы. При этом следует отметить, что в общем случае принятие решений по цифровой трансформации должно базироваться на комплексной оценке с учетом технологических, экологических, экономических и социальных критериев. Но в настоящее время для оценки экономической составляющей не хватает алгоритмов и соответствующих компьютерных решений. MBSE подход, который используется для описания и представления систем различной природы: технических, организационно-технических, социально-экономических и т.д. должен послужить таким эффективным инструментом.

Растущее понимание необходимости цифровой трансформации промышленности активно формирует новые методы и инструменты цифрового системного инжиниринга. Практическое применение методов MBSE при разработке адекватных цифровых представлений, существующих сложных технических объектов, показал, что при этом используются разные модели – вербальные, экспертные, математические, цифровые, интеллектуальные, которые результативно дополняют друг друга, и поэтому надо расширять MBSE инструменты, чтобы системно и быстро совмещать это множество моделей [9, 13]. MBSE в настоящее время развивается в сторону

унификации, чтобы совмещать и использовать в инжиниринге «все» типы моделей (рис.15).

При принятии решений по цифровой трансформации, следует опираться на общую методологию инжиниринга совместно с MBSE инструментами, формализующих процессы создания новых цифровых объектов и их применения. Такая деятельность всегда проводится с целевым объектом специалистами с определенными компетенциями в выбранной предметной области. Для существующих промышленных объектов в качестве предметной области целесообразно выделять собственно объекты и процессы, которые в них протекают. При этом собираются ранее накопленные исходные данные и представления о предметной области, включая данные наблюдения, экспериментирования и испытаний, а также субъективные представления о целевом объекте и его среде – модели.

Для построения математических моделей наибольший практический интерес представляют архитектурные атрибутированные модели, однако их формированию предшествуют онтологические модели, которые задают термины и понятия, которые используются для представления предметной области и её объектов при формировании сущностей и их связанностей.

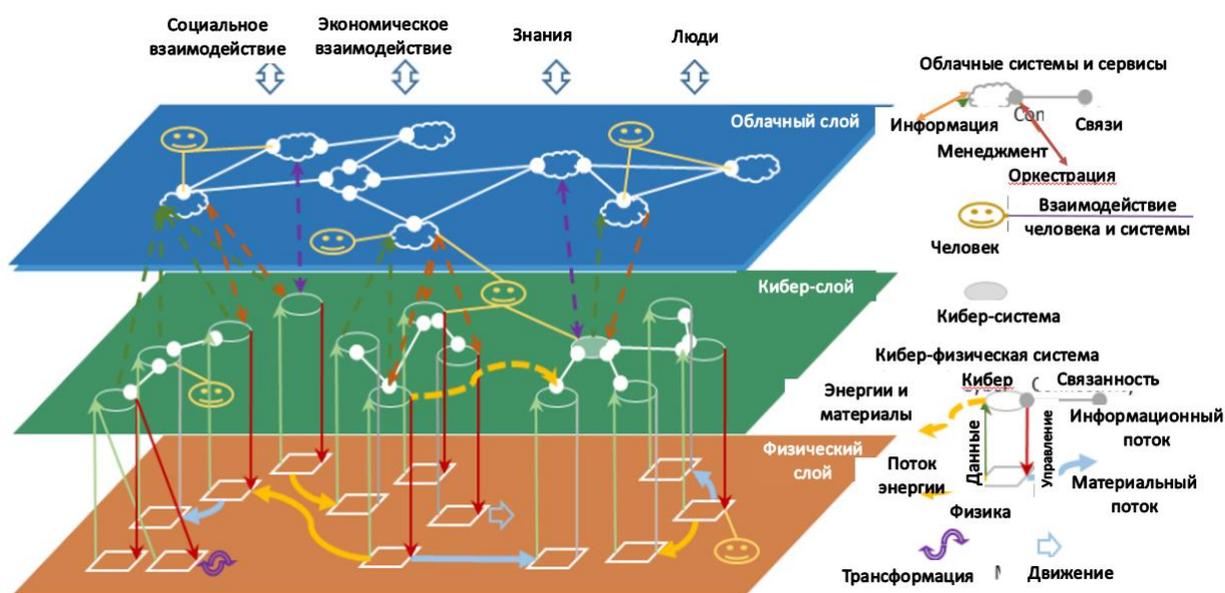
В целом методология основана на упорядочивании методов и инструменты архитектурного моделирования целевых технических объектов как систем. Уже на начальных стадиях разработки подход позволяет упорядочить представление структуры объектов и быстро формировать и оценивать облик рассматриваемого объекта, в рамках построения цифрового представления согласно общих подходов интеллектуальной цифровой экономики (рис.16).

В проектах цифровой трансформации существующих объектов этом следует учитывать, что в типичном наборе сущностей MBSE подхода: требования – функции – компоненты, последние являются самыми очевидно выделяемыми, с которых рекомендуется начинать построение архитектурных системных моделей. При этом, как уже неоднократно указывалось суть

архитектурного метода состоит в иерархическом разделении проблемной области на более мелкие, а структурирование вербальных представлений в форме архитектурных моделей представлено на рисунке 21.

Такое структурирование позволяет легче моделировать объекты и, следовательно, легче оценивать их экономическую эффективность и понимать все взаимосвязи как внутри системы, так и с внешней средой функционирования.

Уровни абстракции описывают переход от моделей высокого уровня к более подробным моделям. Такой методический подход позволяет представить существующее промышленное предприятие как систему в виде многослойной структуры, представленной на рисунке 54.



**Рис. 54** – Представление предприятия как системы.

Таким образом весь состав используемых моделей возможно системно упорядочить и взаимно увязать между собой. Модели начинают рассматриваться совместно с физическими объектами как полноценные компоненты гибридного представления физической и виртуальной вселенной. Такой подход позволяет системно и упорядоченно представлять целевые

объекты в разных взаимодополняющих и взаимопроникающих слоях моделирования (рис.24).

Итак, в общем случае выбор стратегии по цифровой трансформации по методологии MBSE начинают с построения онтологических моделей, что создает основу для балансировки совокупности стратегических сценариев, которые возможны в случае успешной трансформации с горизонтом планирования 10-20 лет. Эти сценарии строятся с учетом перехода к Индустрии 5.0, которая рассматривается как обновленная, ориентированная на человека технология, изменяющая процессы промышленного производства и раскрывающая роль человека в киберфизических системах [107, 115].

Понятие требований к целевому объекту входит в состав ключевых сущностей (требования, функции, компоненты), используемых в MBSE. Т.к. рассматриваются существующие объекты, то требования отображают в виде компактных текстовых записей представления инженера о качественных и количественных характеристиках предприятия после цифровой трансформации. Требования формулируются как однозначное указание в повелительном наклонении на то, что должно быть и ряд конкретных, измеряемых, достижимых условий, существенных на выбранном уровне иерархии рассмотрения и доступных для анализа. Выявление и идентификация требований основывается на собираемых системным инженером исходных данных. Записи формируются в виде индексированного иерархически упорядоченного справочника требований, которые называют еще моделями требований.

В мировой практике разработан и применяется целый ряд средств автоматизации цикла управления требованиями. На основе сформулированных в виде иерархической структуры требований, формируется схожая структура следующей сущности системной модели – функций, которые реализуют данные требования. Сущности-функции определяют сущности-компоненты, которые реализуют функции. В целом следует отметить, что при формировании основных сущностей системной модели,

обычно организовывается определенный итерационный процесс (см. рис. 16), т.к. не всегда возможно сразу адекватно их структурировать, даже для уже существующих объектов. Выявление и идентификация состава физических компонент предприятия опирается на собираемые инженером исходные данные и формируется так, чтобы обеспечивать гармонию с требованиями. Текстовые записи о компонентах также упорядочиваются в виде индексированного иерархического справочника физических компонент.

Для существующего промышленного предприятия цель обликвого проекта – расширить проектную область во временном и техническом измерениях, качественно и концептуально согласовать проектные характеристики узлов кооперационных цепочек, исключить необоснованные целевые установки и риски, что придаст индивидуальность обликвым задачам. Такой подход является отражением развития в настоящее время практического применения технологий искусственного интеллекта, связанного с реализацией первого этапа известной пирамиды трансформации данных в мудрость, связанных со структуризацией и обобщением: данные → информация → знания → мудрость. В этой связи в процессах цифровой трансформации, которые связаны в первую очередь с правильным выбором стратегии развития использование искусственного интеллекта позволяет ускорить сбор необходимой информации или другими словами использовать только SmartData. При этом именно ChatGPT практически продемонстрировал как языковые, вербальные модели вносят существенный вклад в развитие методов MBSE и открыл окно новых возможностей искусственного интеллекта.

Таким образом, суть предлагаемого подхода к цифровой трансформации существующих промышленных предприятий состоит в том, чтобы придерживаться итерационного процесса, составляющего основу методологического подхода MBSE, который уже показал свою результативность (рис. 16): Онтологические модели → Архитектурные

модели → Параметризованные архитектурные модели → Математические модели → Компьютерные модели → Цифровые модели.

Для существующих предприятий рекомендуется начинать с архитектурных моделей компонентов, т.к. на они обычно достаточно ясно видны. При этом итерационный процесс, представленный на рисунке 16 предлагается не доводить всегда до последнего этапа, а возвращаться на предыдущие этапы с любого шага в случае неудачи. Результаты практического применения методологии MBSE, показывают, что в состав требований следует первоначально включать только те, которые соответствуют текущему состоянию, а на последующих итерациях расширять требования в соответствие со стратегией цифровой трансформации. При этом горизонт стратегии развития рекомендуется устанавливать не менее 10 лет и ориентироваться на наблюдаемые в настоящее время фундаментальные тренды, обогащающие образ будущего и помогающие выстраивать стратегию. В результате соединения трех современных фундаментальных трендов – цифровая трансформация, искусственный интеллект (когнитивные технологии) и индустриальная глобализация следует сделать вывод о том, что сегодня происходит трансформация индустриального устройства социально-экономической системы и возникает новый когнитивный мир, на основе когнитивного цифрового двойника.

Принципы MBSE являются основой разработки как матрицы ресурсов и ограничений, так и поддержки движения по известной V-диаграмме разработки (рис. 55), которая распределяет обязанности по разработке системы на уровни, показывая итерационные процессы и этапы перехода на следующий уровень. Такие диаграммы, популярные в системной инженерии, показывают жизненный цикл разработки, в котором прослеживаются связи между требованиями и системной архитектурной моделью и испытанием системы на практике.



**Рис. 55** – V-образная модель разработки: уровни системы, от концепции до вывода на рынок

Цифровая трансформация всегда должна ориентироваться на формирование цифрового актива и на то, что как показывают современные тенденции развития экономики, наблюдается успех у тех компаний, которые переходят от принципов конкуренции к принципам кооперации.

Так по материалам ГК Росатом можно сделать вывод, что его предприятия широко используют MBSE подход, хотя и не используя этот термин. Например, на одной из презентаций Атомэнергопроекта в СПбПУ в марте 2024 года был представлен слайд (рис. 56), который показывает истинность этого тезиса.

Такой подход позволяет предприятию решать следующие задачи:

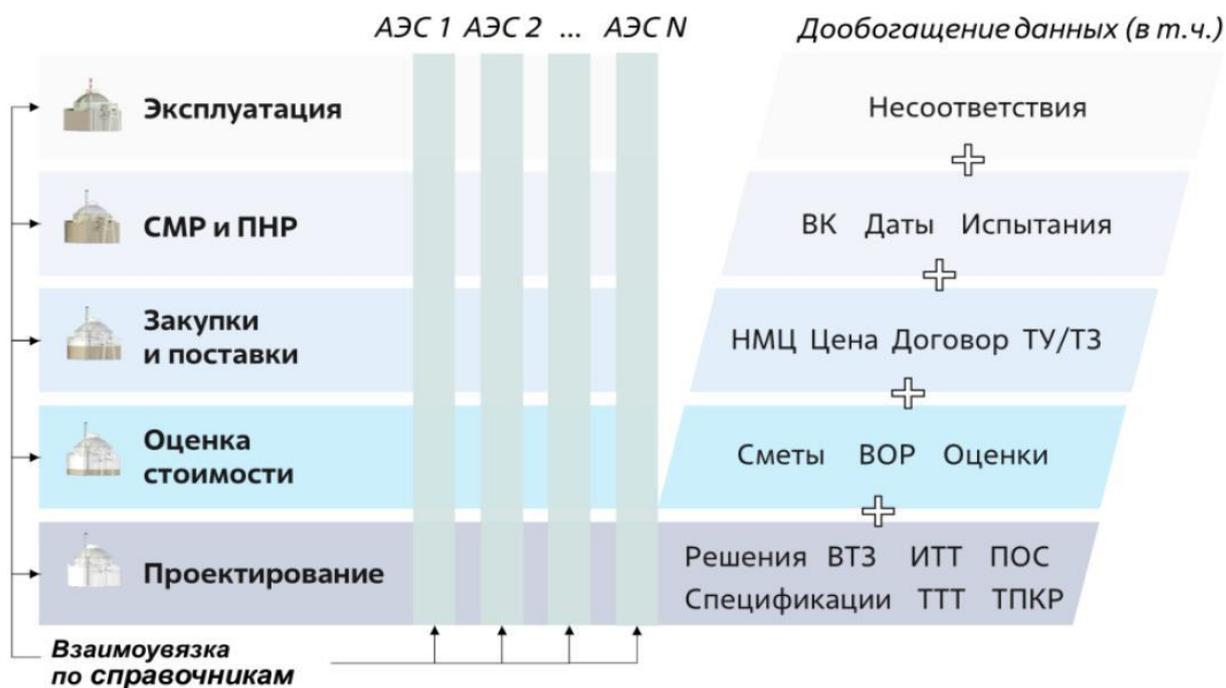
Поддерживать цифровое представление всех элементов АЭС.

Поддерживать единую онтологию на основе использования единых каталогов и справочников.

Постоянно внедрять новые и поддерживать существующие цифровые процессы.

Обеспечивать целостность и согласование данных по АЭС за счет автоматизации.

Обеспечивать постоянную верификацию и валидацию данных по проектируемому объекту.



**Рис. 56** – Формирование цифровой информационной модели АЭС.

Другим примером успешного внедрения системного инжиниринга является ООО «ЗАРУБЕЖНЕФТЬ-добыча Харьяга», которая запустила цифровую трансформацию производств в 2018 году. Это дочернее общество является одним из первых предприятий Группы ЗАРУБЕЖНЕФТЬ на котором разрабатываются и внедряются инструменты цифрового месторождения. В рамках стратегии в 2018–2020 гг. сотрудниками компании обработано более 17 тыс. файлов и визуализировано 30 тыс. единиц оборудования, которые легли в основу цифрового ландшафта месторождения. В целом деятельность компании по цифровой трансформации ложится в рамки MBSE методологии, хотя об этом прямо не заявляется. При этом при создании электронного технического цифрового паспорта для существующего объекта было выявлено 46 замечаний к рабочей документации по 5 и 6 стадиям III очереди Газовой программы, что позволило решить следующие задачи:

Выдача журналов несоответствий и замечаний к рабочей документации и 3D моделям проектного института.

Выдача рекомендаций по вовлечению проектного института в проект реконструкции Газовой программы 5-6 очереди строительства.

Подготовка данных для выпуска и комплектации исполнительной документации.

Выдача рекомендаций в виде отчета отклонений фактического состояния конструкций объектов (действующее производство) по отношению к эксплуатационной документации.

Проведение ревизии действующего технологического регламента с выдачей рекомендацию по приведению в соответствии с действующим производством.

Профессор МФТИ д.т.н Кондратьев В.В. предоставил авторам пример разработки по принципам MBSE модификации существующей системы управления беспилотным транспортным средством (рис.57).



**Рис. 57** – Архитектура компонентов системы управления беспилотным транспортным средством.

На рисунке 57 представлен фрагмент иерархической структуры компонентов существующей системы, в которую встраиваются новые

компоненты (выделены красным пунктиром). Такой подход позволяет подбирать по требованиям, оценивать, дополнять и заменять, балансировать состав автоматизированной подсистемы управления на основе развития фреймворка полезных представлений.

Таким образом, для реализации стратегии цифровой трансформации существующего предприятия на основе MBSE подхода представлены соответствующие рекомендации, основанные на передовых разработках. Рассмотренный подход, доступен для быстрого освоения разработчиками и допускает широкое применение в построении цифрового представления существующих сложных технических объектов в процессе цифровой трансформации предприятий. Подход к моделированию физических архитектур объектов может быть расширен за счет учета других способов целевых объектов – математических, киберфизических, цифровых, интеллектуальных моделей и алгоритмов.

В настоящее время системная инженерия в общем и MBSE в частности все больше проникает в процессы цифровой трансформации существующих промышленных предприятий. Не всегда эти процессы полностью отвечают принципам MBSE. Развитие таких подходов и расширение использования унифицированных методик позволит с большей эффективностью передавать опыт системной инженерии между отраслями.

Авторы осознают, что основным барьером на пути широкого внедрения MBSE в практику цифровой трансформации является отсутствие широко распространённых средств автоматизации. При этом несомненно следует уделить особое внимание созданию адекватных языковых моделей отраслевой направленности. Поэтому направлениями дальнейших исследований авторы видят в разработке технологий по автоматизации построения атрибутированной системной архитектуры предприятия, в том числе с использованием языковых моделей искусственного интеллекта.

В заявлении INCOSE Vision 2035 [116] представлен анализ глобального контекста развития социальной сферы, выделены ключевые тенденции и

факторы, которые, как ожидается, будут способствовать изменениям в практике социальной сферы. Среди основных выводов можно отметить, помимо прочего, влияние цифровой трансформации:

- Цифровая трансформация, устойчивое развитие, интеллектуальные системы и рост сложности, а также достижения в моделировании, имитации и визуализации — это тенденции, которые влияют на конкурентоспособность предприятий.

- Будущая SE будет использовать цифровую трансформацию в своих инструментах и методах и переходить к среде SE, полностью основанной на моделях.

- Изменение характера систем включает в себя больше встроенного и прикладного программного обеспечения, увеличение объемов обрабатываемых данных и киберфизических систем.

- Системы будущего будут создаваться развивающейся, разнообразной рабочей силой, преобразованной цифровой трансформацией и системами систем.

- Методы науки о данных будут внедрены в практику SE, при этом надежные данные будут управляться как критически важный актив.

- Цифровые технологии, включая более широкое применение искусственного интеллекта, позволяют преобразовать то, как предприятия собирают, повторно используют, используют и защищают знания посредством цифрового представления и семантической интеграции всей информации.

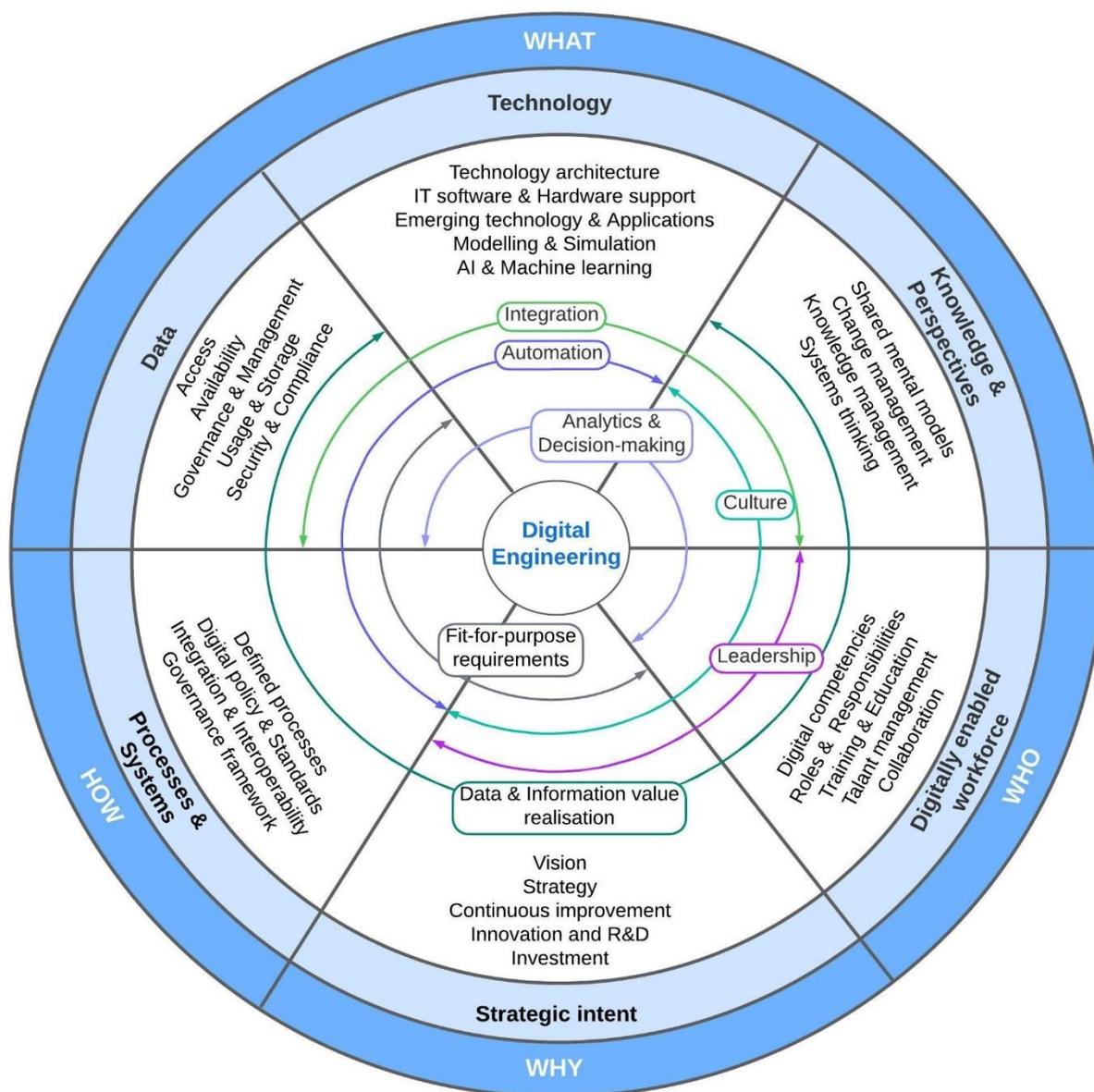
- Развивающиеся цифровые экосистемы обеспечат автоматизацию и автономность для выполнения все более сложных задач.

Все современные инженерные дисциплины эволюционировали, и современная инженерная инженерия нуждается в поддержке больших объёмов данных. Это требует трансформации практики инженерной инженерии в цифровую инженерию (DE), в рамках которой технологические инновации объединяются для реализации интегрированного цифрового подхода, поддерживающего деятельность на протяжении всего жизненного

цикла и формирующего культуру более эффективной и производительной работы среди заинтересованных сторон. DE — это не конечный пункт, а путь к цифровой трансформации инженерии и предприятий. Этот путь требует смены парадигмы от традиционной бумажной SE к более интегрированному подходу, использующему цифровые технологии для ускорения формализации и интеграции знаний, стимулирования совместной работы и внедрения более гибкого подхода к SE.

DE обеспечивает комплексный цифровой подход, использующий авторитетные источники системных данных и моделей как континуум между дисциплинами для поддержки деятельности на протяжении всего жизненного цикла, от концепции до утилизации. DE – совместный подход к работе, использующий цифровые процессы для повышения производительности планирования, проектирования, строительства, эксплуатации и обслуживания активов. DE улучшает взаимодействие с поставщиками и партнерами, снижая риск ошибок и задержек. DE меняет подход к проектированию и управлению возможностями, активами и проектами во многих отраслях, включая оборону, транспорт, строительство, здравоохранение и другие.

В основе цифровой трансформации и DE лежит представление о предприятиях как о социокультурно-технических системах. DE – это системное вмешательство, включающее четыре фундаментальных компонента: «Почему», «Что», «Кто» и «Как». Эти компоненты работают вместе, обеспечивая фундаментальные изменения в организационной культуре, практиках и технологиях для достижения цифровой трансформации предприятия. На рисунке 58 представлено целостное представление об измерениях и элементах, составляющих DE.



**Рис. 58** – Системная структура цифровой инженерии

Почему (WHY): Стратегический замысел

Этот компонент критически важен для определения целей и задач инициативы DE, а также для обеспечения её соответствия более широкой стратегии организации. DE – это не только технологии, но и тот факт, что технологии позволяют организациям трансформировать свои бизнес-процессы и системы, а также принимать более обоснованные решения, соответствующие целям и стратегии организации. В рамках этого процесса непосредственные цели трансформации практик системной инженерии

включают цифровизацию инженерных артефактов, информации и обмена моделями, в то время как долгосрочное стратегическое видение сосредоточено на согласовании инвестиций в технологические инновации и передовые инженерные практики с целями и задачами организации. Организационное видение возможностей цифровой трансформации и инноваций следует рассматривать как часть более масштабного процесса непрерывного совершенствования. Чёткая стратегия цифровой трансформации представляет собой дорожную карту цифровой трансформации, описывающую шаги, необходимые для достижения организационных результатов. Она также должна учитывать культуру организации и то, как трансформация цифровой трансформации повлияет на персонал, а также на её существующие системы и процессы. Успешная стратегия предполагает сотрудничество с заинтересованными сторонами для обеспечения поддержки и соответствия целям организации, а также развития лидерских качеств. Стратегия Министерства обороны США определяет следующие цели, которые могут быть применены к деятельности DE: (i) использование модели для принятия решений; (ii) разработка авторитетного источника истины; (iii) стимулирование технологических инноваций; (iv) создание среды для совместной работы; и (v) преобразование рабочей силы и культуры. Системный подход к DE способствует переходу от технологически ориентированного подхода к приобретению данных к целостному экосистемному подходу, поддерживающему все факторы, способствующие подлинной трансформации, включая готовность персонала и осведомлённость о правовой и политической среде. Более того, стратегический подход к ЦЭ позволяет организациям осознать ценность данных и информации. Отрасли должны коллективно признать важность оценки и управления данными и информацией как критически важными активами.

Кто (WHO): сотрудники с цифровыми возможностями

Этот компонент DE ориентирован на рабочую силу. Этот компонент критически важен для обеспечения отраслей необходимыми навыками и

возможностями для перехода к цифровому развитию. Он включает в себя определение навыков, ролей, обязанностей и возможностей, необходимых для успешной цифровой трансформации инженерных и промышленных предприятий. Крайне важно иметь подготовленных к цифровым технологиям сотрудников, способных эффективно использовать технологические инновации для эффективного использования цифровых инструментов и методов. DE требует нового комплексного набора навыков и компетенций, выходящего за рамки традиционных SE и IT. Для этого требуется сочетание технических и специальных знаний в области управления данными, таких как моделирование и имитация, аналитика данных, ИИ и кибербезопасность, а также гибких навыков, таких как коммуникация, сотрудничество и лидерство. Разработанная Хатчисоном и Тао структура компетенций DE [117] определяет основополагающие цифровые компетенции: (i) цифровая грамотность; (ii) ценностное предложение DE; (iii) политика/руководство Министерства обороны; (iv) принятие решений; (v) грамотность в области программного обеспечения. Социальные и культурные аспекты DE также включают необходимость изменения образа мышления и культуры. DE требует более гибкого подхода к проектированию, разработке и развертыванию сложных систем, а также готовности адаптироваться и принимать изменения. Это также требует культуры инноваций, постоянного совершенствования и обучения, поскольку технологии и инструменты быстро развиваются. Растущий во всем мире спрос на цифровых и системных инженеров превышает имеющееся предложение. Многие предприятия инициируют внутренние программы обучения для дальнейшего развития своей рабочей силы. Тем не менее, существует потребность в программах обучения и образования, а также в непрерывном обучении, которые дадут большему количеству системных инженеров сильные много- и трансдисциплинарные компетенции, включая цифровые технологии, бизнес, лидерство и системное мышление, необходимые для обеспечения сотрудничества между широким кругом инженерных и управленческих кадров во всем мире.

Что: данные, технологии, знания и перспективы

Этот компонент охватывает аспекты интеграции, включая данные, технологии, знания и перспективы. Сегодня программная инженерия сталкивается с серьезным препятствием из-за значительной фрагментации инженерных инструментов и ландшафта данных. В сфере инженерии использование общих интегрированных моделей помогает преодолеть эти трудности. Интеграция различных инструментов, технологических решений и данных становится ключевым фактором для обеспечения совместной работы, аналитики и принятия решений на основе данных. Интеграция также обеспечивает стандартизацию данных, генерируемых различными инструментами, и возможность их беспрепятственного использования в различных инженерных дисциплинах. Данные лежат в основе цифровой трансформации, и предприятиям необходимо инвестировать в возможности бесперебойного сбора, управления и анализа данных для поддержки цифровой трансформации. Данные в режиме реального времени могут улучшить работу сложных систем и активов, обеспечить принятие обоснованных решений и более эффективное реагирование на сбои, отказы и экологические проблемы. Тем не менее, одного лишь сбора достоверных данных недостаточно для совершенствования методов цифровой трансформации. Ключевым моментом является поддержка комплексного подхода, позволяющего использовать высококачественные данные, обеспечивать безопасность, конфиденциальность и доступность в форме, позволяющей обмениваться данными, визуализировать их и анализировать. Для эффективного управления системами и активами крайне важно обеспечить согласованное и обоснованное принятие решений на основе высококачественных и надежных данных. Аналитика организации зависит от качества ее данных. Другими словами, для максимизации ценности физической системы требуется максимизация ценности данных и информации. Оценка и управление данными и информацией как критически важными активами позволяет осуществить фундаментальный переход к принятию решений на основе данных,

основанному на культуре «цифровизации по умолчанию». Знания – ещё один критически важный актив предприятия. Для того чтобы предприятие продолжало учиться и развиваться, необходимо правильно управлять как данными, так и знаниями. Компонент «Знания и перспективы» в DE включает в себя важность понимания и распространения общих ментальных моделей среди заинтересованных сторон, а также формирование общего понимания DE. Неспособность учесть глубинные культурные изменения, изменение образа мышления и новый образ мышления приведёт к «нанесению нового слоя технологической краски на те же разрушающиеся организационные стены» [118]. Следовательно, DE следует рассматривать как культурную трансформацию, побуждая заинтересованных лиц по всему предприятию перенимать новые способы мышления и работать вместе. Это требует приверженности новому подходу сверху вниз и инвестиций в обучение, образование и инструменты, чтобы все заинтересованные стороны могли понять новую парадигму и работать в её рамках. Этот сдвиг в образе мышления и культуре может быть сложным и требует руководства, способного управлять изменениями. Технологический компонент критически важен для обеспечения организаций инфраструктурой, инструментами и платформами для поддержки DE. Технологии преобразуют способы сбора, повторного использования, использования и защиты знаний предприятиями посредством цифрового представления и семантической интеграции всей информации. Развивающиеся технологии, включая цифровые двойники, инструменты моделирования и имитации, а также инструменты аналитики и визуализации данных с более широким применением искусственного интеллекта, машинного обучения и Интернета вещей, позволят автоматизировать и автономизировать выполнение всё более сложных задач, предоставляя людям дополнительные возможности для создания ценности посредством инноваций. Ключевым изменением, обеспечиваемым DE как комплексным подходом, является переход к коллективным методам решения проблем на основе данных. Это способствует трансформации культуры и

приверженности организации принципу «единого источника истины» при принятии решений.

Как (HOW): процессы и системы

Этот компонент DE фокусируется на процессах и системах. DE, будучи будущим SE, основан на моделях, используя моделирование и имитацию нового поколения, основанные на глобальной цифровой трансформации. Правильно подобранные процессы и системы обеспечивают последовательную цифровую трансформацию, создавая ценность для всех элементов системы, дисциплин, жизненного цикла и предприятия в целом. Чётко определённые процессы и структурированные процедуры гарантируют, что информация соответствует своему назначению и может быть совместно использована и повторно использована. Более того, организациям необходимо разработать системный подход к интеграции инструментов и методов DE в существующие процессы и системы для обеспечения бесперебойного обмена данными, информацией, знаниями и опытом. Цифровая инженерия открывает новые возможности, но также порождает новые проблемы интеграции. Одна из важнейших проблем – необходимость взаимодействия и стандартизации. Стандартизированные или общедоступные формы цифрового представления, семантика и словарь критически важны для обмена цифровыми инженерными артефактами, особенно цифровыми моделями. Основная концепция DE заключается в использовании цифровых моделей, интегрированных с моделированием, междисциплинарным анализом и средами иммерсивной визуализации. Другими словами, одним из ключевых технических аспектов DE является использование системной инженерии на основе моделей (MBSE). MBSE предоставляет общий язык и фреймворк для передачи и управления системными требованиями, проектированием и реализацией. MBSE также позволяет разработчикам и инженерам систем моделировать и тестировать поведение системы в виртуальной среде, сокращая потребность в физических прототипах. Переход к DE происходит поэтапно, и эта эволюция выходит за рамки MBSE. Хотя MBSE является важнейшим компонентом DE, это лишь

часть более значительного перехода к цифровой трансформации [34, 119]. DE подразумевает фундаментальное изменение мышления и требует от организаций более совместного подхода к решению проблем, когда заинтересованные стороны из всех подразделений организации совместно работают над разработкой более эффективных, производительных и адаптивных решений для быстро меняющихся требований отрасли. Ключевым изменением, обеспечиваемым процессами и системами цифрового моделирования, является переход к сквозному цифровому представлению предприятия для решения давних проблем, связанных со сложностью, неопределенностью и быстрыми изменениями при развертывании и использовании систем. DE также способствует переходу от ограниченного и ситуативного использования моделей к получению немедленной выгоды, к постоянному и последовательному использованию моделей на протяжении всего жизненного цикла для стимулирования и ускорения организационных результатов

Итак, цифровая трансформация предприятий и DE выходит за рамки использования конкретных программных инструментов и моделей. Оно основано на принципах SE, используя технологии и методы моделирования для улучшения принятия решений на основе данных и оптимизации производительности систем. DE направлено на создание культуры инноваций, совместного решения проблем и постоянного совершенствования, меняя то, как мы взаимодействуем, понимаем и ориентируемся в окружающей среде.

## Заключение

В документе INCOSE Systems Engineering Vision 2025 текущее состояние MBSE описывается следующим образом: «Системная инженерия на основе моделей приобрела популярность как способ преодоления ограничений подходов, основанных на документах, но все еще находится на ранней стадии зрелости, аналогичной ранним дням CAD/CAE». В документе SE Vision 2025 также описывается продолжающийся переход SE к дисциплине, основанной на моделях, в которой: «Формальное системное моделирование является стандартной практикой для спецификации, анализа, проектирования и проверки систем и полностью интегрировано с другими инженерными моделями. Системные модели адаптированы к прикладной области и включают в себя широкий спектр моделей для представления всех аспектов систем. Использование представления знаний на основе Интернета и интерактивных технологий обеспечивает высокоэффективное и общее понимание человеком систем в виртуальной среде, охватывающей полный жизненный цикл от концепции до разработки, производства, эксплуатации и поддержки». Переход к дисциплине, более основанной на моделях, не обходится без проблем. Это требует как развития практики, так и более широкого внедрения MBSE в организациях различных отраслей. В документе INCOSE Systems Engineering Vision 2035 говорится, что «будущее системной инженерии преимущественно основано на моделях». Далее обсуждается прогноз о том, что «системные инженеры регулярно создают виртуальные модели для решения конкретных задач, используя онтологически связанные модели-активы на основе цифровых двойников. Эти связанные модели обновляются в режиме реального времени, обеспечивая интерактивное пространство для проектирования и исследований, основанное на виртуальной реальности. Это виртуальное глобальное пространство для совместной работы основано на облаке, моделировании как сервисе и поддерживает масштабное моделирование, используя облачную высокопроизводительную вычислительную инфраструктуру. Существуют семейства унифицированных

фреймворков ModSim, которые позволяют малому и среднему бизнесу, а также государственным учреждениям сотрудничать».

Развитие практики требует совершенствования языков, методов и инструментов моделирования. Языки моделирования должны продолжать совершенствоваться с точки зрения выразительности, точности и удобства использования. Методы MBSE, продолжают развиваться, но требуют дальнейшего совершенствования для обеспечения строгого подхода к моделированию системы на протяжении всего жизненного цикла, обеспечивая при этом большую адаптируемость к широкому спектру областей применения. Инструменты моделирования также должны продолжать развиваться для поддержки языков и методов моделирования и интеграции с другими междисциплинарными инженерными моделями и инструментами для поддержки более широких инженерных усилий на основе моделей. Движение к более широкому использованию стандартов моделирования, которые более широко доступны в коммерческих инструментах, и строгих методологий на основе моделей повышает перспективы MBSE. Внедрение MBSE требует наличия специалистов, владеющих навыками применения MBSE. Для этого организациям необходимо обеспечить инфраструктуру, включающую методы, инструменты и обучение MBSE, а также взять на себя обязательство внедрить эти возможности в свои программы. Как и к любым организационным изменениям, к этому необходимо подходить стратегически, чтобы развивать эти возможности и извлекать уроки из опыта. Как и в других инженерных дисциплинах, переход системной инженерии к дисциплине, основанной на моделях, широко признан необходимым для решения задач, связанных с растущей сложностью систем, и достижения повышения производительности и качества.

## Литература

1. Madni A. M., Augustine N., Sievers M. (ed.). Handbook of Model-Based Systems Engineering. – Springer Nature, 2023.
2. Романов А.А. Прикладной системный инжиниринг. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 555 с.
3. Баденко В.Л., Кондратьев В.В., Ядыкин В.К. Модельно-ориентированная системная инженерия и интеллектуальная цифровая экономика // Сборник трудов X Международной научно-практической конференции «Интеллектуальная инженерная экономика и Индустрия 5.0» (ИНПРОМ), 25-28 апреля 2024, Санкт-Петербург. В 2 т. Т.1 / Под ред. д-ра экон. наук Родионова Д.Г., д-ра экон. наук Бабкина А.В. – СПб.: Издательство ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024.– стр. 169-173. ISBN 978-5-7422-8535-9
4. Henderson K., Salado A. Value and benefits of model-based systems engineering (MBSE): Evidence from the literature //Systems Engineering. – 2021. – Т. 24. – №. 1. – С. 51-66.
5. Халл Э., Джексон К., Дик Д. Инженерия требований. – М: ДМК Пресс, 2017. – 218 с.
6. Косяков А., Свит У., Сеймур С., Бимер С. (2017). Системная инженерия. Принципы и практика. – М: ДМК Пресс, 2014. – 624 с.
7. Боровков А.И., Рябов Ю.А., Гамзикова А.А. Цифровые двойники в нефтегазовом машиностроении //Деловой журнал Neftegaz. RU. – 2020. – №. 6. – С. 30-36.
8. Гаричев С.Н. и др. Модельно-ориентированный инжиниринг физико-технических, информационных и интеллектуальных систем //Труды Московского физико-технического института. – 2022. – Т. 14. – №. 2 (54). – С. 149-161.
9. Кондратьев В.В. Модельно-ориентированный системный инжиниринг 2.0. – М.: МФТИ, 2021. 102 с.
10. Баденко В.Л., Тищенко Е.Б., Ядыкин В.К. Модельно-ориентированный системный инжиниринг как инструмент цифровой

трансформации промышленного предприятия // Стратегическое управление цифровой трансформацией интеллектуальной экономики и промышленности в новой реальности: монография / под ред. д-ра экон. наук, проф. А.В. Бабкина. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. стр. 603-625 ISBN 978-5-7422-8606-6. DOI 10.18720/IEP/2024.3/23

11. Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK) v.2.12. [http://ssebokwiki.org/wiki/Guide\\_to\\_the\\_Systems\\_Engineering\\_Body\\_of\\_Knowledge\\_\(SEBoK\)](http://ssebokwiki.org/wiki/Guide_to_the_Systems_Engineering_Body_of_Knowledge_(SEBoK)) Дата обращения 30.04.2025

12. Левенчук А. И. Системное мышление. М: Издательские решения. – 2018. – 398 с.

13. Кондратьев В., Лоренц В. Даешь инжиниринг! Методология организации проектного бизнеса. М: Эксмо. – 2009. – 576 с.

14. Walden D. D., Roedler G. J., Forsberg K. INCOSE systems engineering handbook version 4: updating the reference for practitioners //INCOSE International Symposium. – 2015. – Т. 25. – №. 1. – С. 678-686.

15. INCOSE Systems engineering principles; M. D. Watson - Chair et al., 2022; ISBN 978-1-937076-08-5

16. Прохоров А., Лысачев М., Боровков А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. М.: АльянсПринт. – 2020. – 401 с.

17. Madni A. M., Madni C. S., Lucero S. D. Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering //Systems. – 2019. – Т. 7. – №. 1. – С. 7.

18. Стрельцова Г.А., Исаева Г.Н. Применение MBSE-методологий при создании аэрокосмических систем // Информационно-технологический вестник. – 2023. – № 4(38). – С. 123-136.

19. Madni A. M., Sievers M. Model-based systems engineering: Motivation, current status, and research opportunities //Systems Engineering. – 2018. – Т. 21. – №. 3. – С. 172-190.

20. Сухомлин В.А. Анализ исследований математических основ модельно-ориентированной системной инженерии // Вестник Санкт-

Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. – 2024. – Т. 20, № 3. – С. 350-365.

21. Введение в модельно-ориентированную системную и программную инженерию (MBSSE): учебник / В.А. Сухомлин, В.Ю. Романов, Д.А. Гапанович. – Москва : Фонд «Лига интернет-медиа»; МАКС Пресс, 2024. – 672 с.

22. Вернадский В. И. Биосфера и ноосфера. – Рипол Классик, 2017.

23. Моисеев Н. Человек и ноосфера. – Litres, 2017.

24. Майсак О. С. SWOT-анализ: объект, факторы, стратегии. Проблема поиска связей между факторами // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2013. – №. 1. – С. 151-157.

25. Охтилев М. Ю. и др. Методологические и методические основы проактивного управления жизненным циклом сложных технических объектов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2022. – Т. 65. – №. 11. – С. 781-788.

26. Боровков А.И., Кулемин В.Ю. Цифровой инжиниринг для создания изделий высокой степени технологической сложности на основе цифровых двойников // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2024. – № 3(133). – С. 98-104.

27. Бабкин А.В. Стратегическое управление развитием цифровой экономики на основе умных технологий. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, – 2021 – 794 с.

28. Nardelli P. H. J. Cyber-physical Systems: Theory, Methodology, and Applications. – John Wiley & Sons, 2022. – 271 с.

29. Watson M.D., Mesmer B.L., Farrington P.A. Engineering Elegant Systems: Theory of Systems Engineering. – 2020. NASA\_TP\_20205003644, NASA, Washington, D.C. – 278 с.

30. Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем: математические основы. М: Мир, – 1978. – 311 с.

31. Royce W. W. Managing the development of large software systems: concepts and techniques //Proceedings of the 9th international conference on Software Engineering. – 1987. – С. 328-338.
32. Boehm B., Hansen W. The spiral model as a tool for evolutionary acquisition //CrossTalk. – 2001. – Т. 14. – №. 5. – С. 4-11.
33. Forsberg K., Mooz H. The relationship of systems engineering to the project cycle //Engineering Management Journal. – 1992. – Т. 4. – №. 3. – С. 36-43.
34. McDermott T. et al. Digital engineering measures: Research and guidance //Insight. – 2022. – Т. 25. – №. 1. – С. 12-18.
35. Schwaninger M. Model-based Management: A cybernetic concept //Systems Research and Behavioral Science. – 2015. – Т. 32. – №. 6. – С. 564-578.
36. Зеленцов В. А. и др. Модельно-ориентированная система оперативного прогнозирования речных наводнений //Вестник Российской академии наук. – 2019. – Т. 89. – №. 8. – С. 831-843.
37. Estefan J. A. et al. Survey of model-based systems engineering (MBSE) methodologies //IncoSE MBSE Focus Group. – 2007. – Т. 25. – №. 8. – С. 1-12.
38. Хейг К. Введение в объектно-ориентированную системную инженерию //Открытые системы. – 2003. – №. 11. – С. 35-41.
39. Захарова О. И., Бедняк С. Г., Захаров С. В. Предметно-ориентированный язык моделирования SysML в системной инженерии //Естественные и технические науки. – 2019. – №. 3. – С. 204-206.
40. Badenko V. et al. Method for Developing the System Architecture of Existing Industrial Objects for Digital Representation Tasks //Systems. – 2024. – Т. 12. – №. 9. – С. 355.
41. Swickline C., Mazzuchi T. A., Sarkani S. A methodology for developing SoS architectures using SysML model federation //Systems Engineering. – 2024. – Т. 27. – №. 2. – С. 368-385.
42. Purohit S., Madni A. M. A model-based systems architecting and integration approach using interlevel and intralevel dependency matrix //IEEE Systems Journal. – 2021. – Т. 16. – №. 1. – С. 747-754.

43. ГОСТ Р 57700.37-2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения»: Национальный стандарт Российской Федерации. М., 2021.
44. Баденко В. Л., Ядыкин В. К. Цифровая трансформация промышленности и предприятий: роль и место BIM технологий //Цифровая трансформация экономики и промышленности. – 2019. – С. 506-516.
45. Dunbar D. et al. Driving digital engineering integration and interoperability through semantic integration of models with ontologies //Systems Engineering. – 2023. – Т. 26. – №. 4. – С. 365-378.
46. Tudorache T. et al. WebProtégé: A collaborative ontology editor and knowledge acquisition tool for the web //Semantic web. – 2013. – Т. 4. – №. 1. – С. 89-99.
47. Wardhana H., Ashari A., Sari A. K. Transformation of sysml requirement diagram into owl ontologies //International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2020. – Т. 11. – №. 4. – С. 106-114
48. Sure Y., Staab S., Studer R. Ontology engineering methodology //Handbook on ontologies. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. – С. 135-152.
49. Авдеев Т. В., Бакаев М. А. Гибридная модель представления знаний для реализации вывода во фреймовой онтологии //Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2013. – №. 3. – С. 84-90.
50. Corcho O., Fernández-López M., Gómez-Pérez A. Methodologies, tools and languages for building ontologies. Where is their meeting point? //Data & knowledge engineering. – 2003. – Т. 46. – №. 1. – С. 41-64.
51. Lara J. D., Guerra E., Kienzle J. Facet-oriented modelling //ACM Transactions on Software Engineering and Methodology (TOSEM). – 2021. – Т. 30. – №. 3. – С. 1-59.
52. Пашковский Д.А., Быков А.А. Методические подходы и особенности построения фасетно-иерархической классификации рисков

вертикально интегрированной компании // Газовая промышленность. 2021. № 11 (824). С. 104-117.

53. Баденко В.Л. Модельно-ориентированный системный инжиниринг для строителей: основные понятия и принципы: учебное пособие. – СПбПУ. – 2023. – 48 с.

54. Madni A. M., Purohit S. Economic analysis of model-based systems engineering //Systems. – 2019. – Т. 7. – №. 1. – С. 12.

55. Gómez-Pérez A. Ontological engineering: A state of the art //Expert Update: Knowledge Based Systems and Applied Artificial Intelligence. – 1999. – Т. 2. – №. 3. – С. 33-43.

56. Devedzić V. Understanding ontological engineering //Communications of the ACM. – 2002. – Т. 45. – №. 4. – С. 136-144.

57. Iqbal R. et al. An analysis of ontology engineering methodologies: A literature review //Research journal of applied sciences, engineering and technology. – 2013. – Т. 6. – №. 16. – С. 2993-3000.

58. Мисник А. Е. Применение метаграфов для онтологического инжиниринга сложных систем //Прикладная информатика. – 2022. – Т. 17. – №. 2. – С. 120-132.

59. Mohsin A. et al. Modeling approaches for system-of-systems dynamic architecture: Overview, taxonomy and future prospects //2019 14th Annual Conference System of Systems Engineering (SoSE). – IEEE, 2019. – С. 49-56.

60. Christopher D. et al. Review and framework for the engineering of Business Models for Sustainability: A System of Systems perspective //Sustainable Production and Consumption. – 2024.

61. Aly E. et al. MBSE for robust decision support systems: A resilient, mission-centric reference model //Digital Engineering. – 2025. – С. 100044.

62. Dahmann J. Current Landscape of System of Systems Engineering //2024 19th Annual System of Systems Engineering Conference (SoSE). – IEEE, 2024. – С. 1-9.

63. Browning T. R. Design structure matrix extensions and innovations: a survey and new opportunities //IEEE Transactions on engineering management. – 2015. – T. 63. – №. 1. – C. 27-52.
64. Madni A. M. Exploiting augmented intelligence in systems engineering and engineered systems //Insight. – 2020. – T. 23. – №. 1. – C. 31-36.
65. Allen T. US department of defense modeling and simulation: new approaches and initiatives //Information & Security an International Journal. – 2009. – T. 23. – №. 23. – C. 32-48.
66. Almeida J. P. A. et al. An Analysis of the Semantic Foundation of KerML and SysML v2 //International Conference on Conceptual Modeling. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2024. – C. 133-151.
67. Keskin B., Salman B., Koseoglu O. Architecting a BIM-Based Digital Twin Platform for Airport Asset Management: A Model-Based System Engineering with SysML Approach //Journal of Construction Engineering and Management. – 2022. – T. 148. – №. 5. – C. 04022020.
68. Weilkiens T. et al. Evaluating and comparing MBSE methodologies for practitioners //2016 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE). – IEEE, 2016. – C. 1-8.
69. Cederbladh J., Cicchetti A., Suryadevara J. Early validation and verification of system behaviour in model-based systems engineering: a systematic literature review //ACM Transactions on Software Engineering and Methodology. – 2024. – T. 33. – №. 3. – C. 1-67.
70. Schumacher T., Müller C. K., Inkermann D. SysML Process Chains in MBSE: Systematic Literature Review and Future Research Directions //Digital Engineering. – 2025. – C. 100037.
71. Boelsen K. et al. SysML v2 based modelling guidelines for mechanical system elements //Forschung im Ingenieurwesen. – 2025. – T. 89. – №. 1. – C. 60.
72. Sarioğlu A., Metin H., Bork D. Accessibility in conceptual modeling— A systematic literature review, a keyboard-only UML modeling tool, and a research roadmap //Data & Knowledge Engineering. – 2025. – C. 102423.

73. Medvidović N., Taylor R. N., Dashofy E. M. Software Architecture Description Revisited //IEEE Transactions on Software Engineering. – 2025. – T. 51. – №. 3. – C. 789-794.
74. Bonnet S. et al. Not (strictly) relying on SysML for MBSE: Language, tooling and development perspectives: The Arcadia/Capella rationale //2016 Annual IEEE Systems Conference (SysCon). – IEEE, 2016. – C. 1-6.
75. Feng Y. et al. Towards model-based requirements engineering: Construction method of stakeholder value networks model based on MBSE //Computers & Industrial Engineering. – 2024. – T. 195. – C. 110398.
76. Torkjazi M., Raz A. K. Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodology for Integrating Autonomy into a System of Systems Using the Unified Architecture Framework //INCOSE International Symposium. – 2024. – T. 34. – №. 1. – C. 1051-1070.
77. Wilking F. et al. Utilization of system models in model-based systems engineering: Definition, classes and research directions based on a systematic literature review //Design Science. – 2024. – T. 10. – C. e6.
78. Fisher A. et al. 3.1. 1 model lifecycle management for MBSE //INCOSE International Symposium. – 2014. – T. 24. – №. 1. – C. 207-229.
79. Torres W., Van den Brand M. G. J., Serebrenik A. A systematic literature review of cross-domain model consistency checking by model management tools //Software and Systems Modeling. – 2021. – T. 20. – C. 897-916.
80. Akundi A. et al. Perceptions and the extent of Model-Based Systems Engineering (MBSE) use—An industry survey //2022 IEEE International Systems Conference (SysCon). – IEEE, 2022. – C. 1-7.
81. Campo K. X. et al. Model-based systems engineering: Evaluating perceived value, metrics, and evidence through literature //Systems Engineering. – 2023. – T. 26. – №. 1. – C. 104-129.
82. Santos J. L., Martins L. E. G., Molléri J. S. Requirements extraction from model-based systems engineering: A systematic literature review //Journal of Systems and Software. – 2025. – C. 112407.

83. Terry Bahill A., Henderson S.J. Requirements development, verification, and validation exhibited in famous failures //Systems engineering. – 2005. – Т. 8. – №. 1. – С. 1-14.
84. Ma J. et al. Systematic literature review of MBSE tool-chains //Applied Sciences. – 2022. – Т. 12. – №. 7. – С. 3431.
85. Schluse M., Atorf L., Rossmann J. Experimentable digital twins for model-based systems engineering and simulation-based development //2017 annual ieee international systems conference (syscon). – IEEE, 2017. – С. 1-8.
86. Oliveira A. C. A., Borges R. A. A Categorization of Digital Twin and Model-Based System Engineering Interactions //Applied Sciences. – 2025. – Т. 15. – №. 10. – С. 5333.
87. Badenko V.L. et al. Integration of digital twin and BIM technologies within factories of the future //Magazine of Civil Engineering. – 2021. – №. 1 (101). – С. 10114.
88. Боровков А.И. и др. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников (Digital Twins) CML-Bench® (часть 6) // САПР и графика. – 2024. – № 8(336). – С. 12-25.
89. Strobbe C. et al. Towards a novel model-based multi-disciplinary design approach for human cyber-physical systems //Journal of Integrated Design and Process Science. – 2023. – Т. 27. – №. 3-4. – С. 221-234.
90. Баденко В.Л. Анализ экологических рисков в ГИС на основе нечетких множеств // Информация и космос. – 2013. – №3. – С. 78-84
91. Кондрин А. В., Кукарцев А. В. Стратегия внедрения CALS-технологий //Сибирский аэрокосмический журнал. – 2011. – №. 3 (36). – С. 210-214.
92. Díaz Vargas D. A. et al. Is There Any Agility in Systems Engineering? //Insight. – 2017. – Т. 20. – №. 4.
93. White B.E. Enterprise Systems Engineering // Metcalf, G.S., Kijima, K., Deguchi, H. (eds) Handbook of Systems Sciences. Springer, Singapore. – 2021– С. 1201-1225.

94. Ядыкин В.К., Баденко В.Л. Принципы применения искусственного интеллекта в системах поддержки принятия решений промышленного предприятия // Развитие интеллектуальной экономики и промышленности на основе искусственного интеллекта: Монография. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, – 2025. – С. 677-694.
95. Pennock M. J., Bodner D. A. A methodology for modeling sociotechnical systems to facilitate exploratory policy analysis //Systems engineering. – 2020. – Т. 23. – №. 4. – С. 409-422.
96. Юдина Л. Н., Яцко В. А. Экономические аспекты совершенствования социотехнической системы предприятия //В мире научных открытий. – 2012. – №. 3. – С. 148-162.
97. Agote-Garrido A., Martín-Gómez A. M., Lama-Ruiz J. R. Manufacturing system design in industry 5.0: incorporating sociotechnical systems and social metabolism for human-centered, sustainable, and resilient production //Systems. – 2023. – Т. 11. – №. 11. – С. 537.
98. Liu C. et al. Exploring the socio-technical interactions associated with lean implementation: a systematic literature review //Production Planning & Control. – 2025. – С. 1-33.
99. Cederbladh J., Cicchetti A., Suryadevara J. Early validation and verification of system behaviour in model-based systems engineering: A systematic literature review //ACM Transactions on Software Engineering and Methodology. – 2024. – Т. 33. – №. 3. – С. 1-67.
100. Henderson K. et al. Towards developing metrics to evaluate digital engineering //Systems Engineering. – 2023. – Т. 26. – №. 1. – С. 3-31.
101. Madni A. M. Mbse testbed for rapid, cost-effective prototyping and evaluation of system modeling approaches //Applied Sciences. – 2021. – Т. 11. – №. 5. – С. 2321.
102. Henderson K., McDermott T., Salado A. MBSE adoption experiences in organizations: Lessons learned //Systems Engineering. – 2024. – Т. 27. – №. 1. – С. 214-239.

103. Wu S. et al. Design ontology for cognitive thread supporting traceability management in model-based systems engineering //Journal of Industrial Information Integration. – 2024. – Т. 40. – С. 100619.

104. Kirchof J. C. et al. Model-driven digital twin construction: synthesizing the integration of cyber-physical systems with their information systems //Proceedings of the 23rd ACM/IEEE international conference on model driven engineering languages and systems. – 2020. – С. 90-101.

105. Kriebel S. et al. Modeling Hardware and Software Integration by an Advanced Digital Twin for Cyber-Physical Systems: Applied to the Automotive Domain: Applied to the Automotive Domain //Handbook of Model-Based Systems Engineering. – Cham : Springer International Publishing, 2023. – С. 1-38.

106. Xu T. et al. A MBSE-enhanced Semantically Integration Method for populating MDAO design processes //2025 IEEE International systems Conference (SysCon). – IEEE, 2025. – С. 1-8.

107. Фролов К.В., Бабкин А.В., Фролов А.К. Понятие и сущность цифровизации и цифровой трансформации на основе фундаментальных и прикладных аспектов системно-кибернетической теории //π-Economy. – 2024. – Т. 17. – №. 1. – С. 7-26.

108. Потанина М.В. Особенности цифровой трансформации современной экономики России // Экономика и предпринимательство. – 2022. – № 9(146). – С. 1457-1463.

109. Черепанов В.В., Попов Е.В. Концепция цифровой трансформации промышленного предприятия //Экономика и управление. – 2022. – Т. 28. – №. 10. – С. 1021-1036.

110. Martinez J. et al. Accelerating Digital Transformation through MBSE, Multi-physics Simulation and Digital Twin in Industry //INCOSE International Symposium. – 2024. – Т. 34. – №. 1. – С. 691-715.

111. Yadykin V., Barykin S., Badenko V., Bolshakov N., de la Poza E., Fedotov A. Global Challenges of Digital Transformation of Markets: Collaboration and Digital Assets // Sustainability. – 2021. – Т. 13. – №. 19. – С. 10619.

112. Слесаренко Г.В. Необходимость внедрения цифровых паспортов промышленных предприятий //Вестник Удмуртского университета. Серия «Экономика и право». – 2023. – Т. 33. – №. 1. – С. 75-80.
113. Kukushkin K., Ryabov Y., Borovkov A. Digital twins: A systematic literature review based on data analysis and topic modeling //Data. – 2022. – Т. 7. – №. 12. – С. 173.
114. Боровков А. И. и др. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников (Digital Twins) CML-Bench®(часть 3) //САПРиГрафика. – 2023. – №. 10. – С. 50-62.
115. Cheng Y. et al. Cyber-physical integration for moving digital factories forward towards smart manufacturing: a survey //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Т. 97. – С. 1209-1221.
116. Miller W. D. The future of systems engineering: Realizing the systems engineering vision 2035 //Transdisciplinarity and the Future of Engineering. – IOS Press, 2022. – С. 739-747.
117. Hutchison N., Tao H. Y. S. The Digital Engineering Competency Framework (DECF): Critical Skillsets to Support Digital Transformation //INSIGHT. – 2022. – Т. 25. – №. 3. – С. 35-39.
118. Forsythe J., Rafoth J. Being digital: why addressing culture and creating a digital mindset are critical to successful transformation //Insight. – 2022. – Т. 25. – №. 1. – С. 25-28.
119. Jung S., Salado A. Accuracy of Citation Patterns in the Field of Systems Engineering: Benefits of MBSE //Systems Engineering. – 2025. – С. e70008.