

Министерство образования и науки Российской Федерации

---

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

---

*В.Л. Баденко*

Модельно-ориентированный системный  
инжиниринг для строителей: основные понятия  
и принципы

Учебное пособие

Санкт-Петербург  
2023

УДК 004.9

*Баденко В.Л.* **Модельно-ориентированный системный инжиниринг для строителей: основные понятия и принципы.** – СПб., 2023. – 44 с.

Модельно-ориентированный системный инжиниринг (Model Based System Engineering – MBSE) – современный этап развития системной инженерии. Цель 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 строительных объектов.

Пособие предназначено для студентов Инженерно-строительного института «Строительство». Пособие также будет полезно всем обучающимся, интересующимся современными инженерными методами цифровой трансформации предприятий.

Ил. 6. Библиогр.: 22 назв.

## Оглавление

Введение.....	3
Предпосылки использования модельно-ориентированного системного инжиниринга в строительстве.....	5
Основные принципы MBSE.....	9
Основные определения.....	17
Схема применения MBSE подхода .....	26
Роль и место MBSE подхода: точка зрения ГК Росатом .....	30
Литература: .....	42

## Введение

В формировании нового индустриального уклада Индустрия 4.0 [1] ключевую роль сыграла системная инженерия, представляющая собой междисциплинарный комплексный подход к созданию и эксплуатации сложных технических объектов, который охватывает все этапы жизненного цикла проекта и позволяет формализовать все сложные взаимодействия и взаимовлияния объектов и субъектов для удовлетворения потребностей заказчика [2]. В настоящее время наибольшие успехи системный инжиниринг демонстрирует в аэрокосмической отрасли, чему посвящены соответствующие учебные программы, развиваемые в Московском Физико-техническом институте – национальном исследовательском университете (МФТИ) [3-5]. Будущим инженерам строителям также полезно ориентироваться в системной инженерии при реализации современных проектов сложных технических систем.

Итак, системный инжиниринг — это междисциплинарная область инженерии, посвященная проектированию и управлению сложными инженерными проектами в соответствии с их жизненным циклом. На современном этапе развития данного направления мы говорим о развитии системной инженерии на новом уровне и говорим о модельно-ориентированной системной инженерии. Этот термин является переводом с английского Model Based System Engineering (MBSE – Системная инженерия на основе моделей). Существует соответствующая 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 и продолжая на протяжении всей разработки и более поздних фаз жизненного цикла [6, 7]. 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.

Концепция MBSE-подхода исходит из того, что достижения в области цифрового моделирования должны помочь преодолевать все возрастающую сложность современных проектов индустриальных систем и повысить эффективность новых и появляющихся вычислительных технологий для разработки все более сложных систем без снижения уровня их безопасности [8]. Именно поэтому MBSE подход получил широкое распространение на предприятиях ГК Росатом, в том числе при создании цифровых двойников [8].

В настоящем пособии собраны материалы, опубликованные в работах сотрудников МФТИ и ГК Росатом, которые не всегда могут быть доступны студентам строительного профиля.

Данное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Строительство». Оно также будет интересно для студентов других специальностей.

## Предпосылки использования модельно-ориентированного системного инжиниринга в строительстве

Одной из ключевых проблем при реализации строительных проектов по созданию сложных технических систем является наличие разрыва между теорией и практикой применения методов системного инжиниринга. В настоящее время для создания единой модели сложной системы, которая могла бы учитывать взаимосвязь компонентов, функций, процессов и требований начинают успешно применять модельно ориентированный системный инжиниринг – MBSE (Model-Based Systems Engineering) подход. По всему миру существуют примеры компаний, которые успешно внедрили MBSE подход при реализации строительных проектов ориентируясь в первую очередь на использование передовых цифровых технологий на всем жизненном цикле (ЖЦ) [9, 10]. MBSE подход предполагает переход от проектирования с помощью отдельных независимых моделей подсистем к формированию единой модели системы для поддержки принятия решений всех этапах жизненного цикла. Таким образом MBSE предлагается как эффективная методология описания текущего и будущего поведения сложных технических систем, которые принято называть системами систем (SoS – System of Systems).

Применение методологии MBSE позволяет проанализировать сложную техническую систему и понять, как различные подсистемы внутри SoS могут и должны взаимодействовать, исходя из формирующейся возможности принятия управленческих решений на основе балансировки требований и ограничений/ресурсов для SoS, обычно представляемой в виде многомерной матрицы. MBSE позволяет формализовать функциональные требования к SoS и преобразовать эти требования в онтологию, которая используется для определения связей и взаимного влияния внутри системы для поддержки ЖЦ SoS. MBSE способствует согласованности, коммуникации, ясности и адаптивности в рамках проектов системной инженерии для решения проблем,

связанных со стоимостью, сложностью, временем реализации и требованиями по безопасности. MBSE предлагает целостный подход к системной инженерии, основанный на развивающейся модели системы как SoS. Такая единая модель служит «единственным источником истины» о системе, который включает в себя спецификацию системы, описание поведения, проверку и управление конфигурацией [8]. Важной проблемой, решаемой в рамках MBSE, является появление возможности формирования эффективного инструмента вовлечения в процесс создания интегрированной модели широкого сообщества заинтересованных сторон, являющихся представителями экономических, юридических и других неинженерных аспектов функционирования SoS. В этой связи MBSE развивается в сторону расширения визуализации и включения эмпирических точек зрения, чтобы заинтересованные стороны, не являющиеся экспертами, могли понять модели и обеспечить своевременную и содержательную обратную связь. Более кратко, MBSE подход – это подход, обеспечивающий потребности комплексного проектирования и поддержки жизненного цикла сложной технической системы на основе перехода от проектирования на основе множества отдельных моделей к созданию единой модели SoS

Предшественник MBSE – это Document Based System Engineering (Системная Инженерия, Основанная на Документах). Традиционные ориентированные на документы подходы к описаниям систем имеют ряд ограничений, связанных с интеграцией обновлений системы, двусмысленность, противоречивая терминология и т.д. Часто соответствующие документы разрабатываются отдельно разными сотрудниками организации. Вследствие этого разные разделы документации, относящиеся к разным дисциплинам, могут быть не согласованы, что усложняет задачу принятия правильных управленческих решений. При этом следует отметить, что существует значительный пробел в данных, связанных с внедрением практик MBSE, а также возможность определить потенциальные проблемы для внедрения.

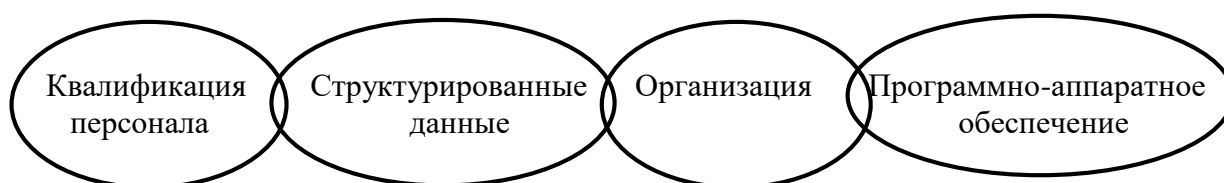
MBSE может являться эффективным инструментом поддержки внедрения новых производственных технологий. Так анализ текущего развития компаний, занятые в реальном секторе экономики, показывает, что они сталкиваются с проблемой динамично изменяющейся рыночной среды, вызванной, развитием цифровых технологий и новых материалов, а также трендом по переносу производства к месту потребления и трансформацией международной логистики, кастомизацией производимых продуктов. Таким образом, способность действовать на рынке быстро, гибко и эффективно становится важнейшим фактором успеха. Поэтому, чтобы организации оставались успешными и выживали в рыночной среде, они должны ускоренными темпами решать проблемы, связанные с внедрением цифровых технологий, инновациями, новыми наборами навыков и другими быстро появляющимися новыми технологиями. В рамках Индустрии 4.0 доступно множество исследований, которые могут позволить организациям проводить цифровизацию и внедрять инновации в свои процессы для повышения гибкости и эффективности на основе моделирования.

Что касается проблем применения подхода MBSE в проектах цифровой трансформации предприятий строительной отрасли, то существующие обзоры в первую очередь указывают на проблемы с верификацией и валидацией моделей, поддержанием баланса между сложностью моделей и необходимостью поддержания их производительности, а также проблемы с семантикой и унификацией языков моделирования. Эффективное внедрение подхода MBSE требует использования больших ресурсов и значительного времени вычислений в моделях, но также существуют неопределенности из-за упрощений при разработке моделей. Поэтому одной из наиболее важных задач, является проверка используемых моделей.

В качестве резюме к данному разделу следует подчеркнуть, что успешная трансформация строительной отрасли должна базироваться, в том числе, на квалифицированных кадрах, которые имеют расширенные фундаментальные знания по математике, физике и компьютерным наукам.



Внедрение MBSE подхода требует решения целого ряда проблем – относительно простых и достаточно сложных. Например, не составляет проблемы приобрести отдельные составные части программно-аппаратного обеспечения для моделирования компьютерное оборудование, базовое программное обеспечение (ПО) и т.д. Однако в любой организации применение компьютерных технологий будет эффективно, т. е. приносить прибыль, только при соблюдении целого комплекса условий. Например, должен быть обеспечен определенный уровень квалификации персонала, собраны необходимые данные, решены организационные проблемы, а ПО для моделирования настроено на решение конкретных, заранее сформулированных задач системной инженерии. Все эти аспекты взаимосвязаны (рис. 1) [11].



**Рис. 1. Взаимосвязанные звенья при цифровой трансформации предприятий строительной отрасли**

В качестве комментария к рис. 1 следует отметить следующее. В общем случае, задача по приобретению ПО и компьютерного оборудования важная, но достаточно хорошо определена. Однако часто руководители проектов упускают из виду важность обеспечения требуемой квалификации у будущих пользователей. Специалистам следует также помнить, что сбор необходимых данных требует значительных затрат времени и обходится дорого, а организационные проблемы являются самыми острыми [12, 13].

## Основные принципы MBSE

В работе [7] изложены современные взгляды INCOSE на принципы MBSE. В работе указывается, что принципы системной инженерии медленно формировались в течение последних 3 десятилетий. Иногда они появлялись как смесь эмпирических правил или эвристик для практики и зарождающихся принципов. Эти принципы обеспечивают основу для функционирования системы. Они стремятся сгруппировать научные аксиомы, законы и научные принципы в набор системных принципов. Благодаря систематическому исследованию специалистами рабочей группы INCOSE по принципам системной инженерии, удалось сформулировать набор из 15 принципов и 3 гипотез, изложенных в публикации [7].

Ниже представлен перечень этих принципов. В некоторых случаях добавлены комментарии по необходимости.

**ПРИНЦИП 1:** Системная инженерия в приложении специфична для потребностей заинтересованных сторон, пространства решений, итоговых системных решений и контекста на протяжении всего жизненного цикла системы.

Это первое и основополагающее утверждение системной инженерии. Рассматриваемая сложная техническая система и среда ее функционирования определяют конкретные реализации подходов системной инженерии. 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 системной инженерии учитывает конкретные потребности пользователя/заказчика системы и организационные характеристики при разработке или эксплуатации. Методы системной инженерии будут и должны различаться по

акценту и применению в зависимости от характера рассматриваемой системы, его физической среды приложения и его контекста.

**ПРИНЦИП 2:** Системная инженерия 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:** Системная инженерия 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 [14, 15] и других недетерминированных систем, где подходы к моделированию недетерминированных системных реакций четко не определены. При моделировании системы модель системы состоит из нескольких моделей аспектов этой системы, каждая из которых является приближением к реальности.

**ПРИНЦИП 6:** В центре внимания системной инженерии находится все более глубокое понимание взаимодействий, чувствительности и поведения системы, потребностей заинтересованных сторон и среды функционирования системы.

Системные инженеры вырабатывают требования по мере разработки системы. Таким образом, в то время как системные инженеры определяют требования миссии (часть понимания контекста миссии) в начале разработки, они постепенно определяют системные требования. Требования являются функцией выбора проектного решения, сделанного и осознанного постепенно на протяжении всей фазы 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 [16]. 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 заинтересованных сторон.

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): Системная инженерия достигает понимания всех системных функций и взаимодействий в операционной среде.

Подпринцип 6(g): Системная инженерия позволяет понять ценность системы для заинтересованных сторон.

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

ПРИНЦИП 7: Системная инженерия удовлетворяет изменяющиеся потребности заинтересованных сторон в течение жизненного цикла системы.

ПРИНЦИП 8: Системная инженерия удовлетворяет потребности заинтересованных сторон с учетом бюджета, ресурсов и технических потребностей, а также других ожиданий и ограничений.

Подпринцип 8(a): Системная инженерия 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: Системная инженерия охватывает весь жизненный цикл системы.

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

Подпринцип 11(a): Системная инженерия поддерживает понимание системы.

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

Подпринцип 11(c): Системная инженерия моделирует систему.

Системная инженерия 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): Системная инженерия проектирует и анализирует систему.

Подпринцип 11(e): Системная инженерия тестирует систему.

Подпринцип 11(f): Системная инженерия поддерживает производство системы.

Подпринцип 11(g): Системная инженерия 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:** Системная инженерия эффективно объединяет инженерные и научные дисциплины.

Дисциплина системной инженерии является отдельной инженерной дисциплиной, но также зависит от других инженерных, научных и социальных дисциплин. Системная инженерия стремится интегрировать и объединить эти другие дисциплины элегантным образом, чтобы создать элегантную систему на протяжении всего жизненного цикла системы. Взаимодействие дисциплин находится в центре внимания системной инженерии. 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:** Системная инженерия 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 создают свой аспект системы. Точно так же и в эксплуатации дисциплины должны работать вместе, чтобы обеспечить согласованную и запланированную работу и техническое обслуживание системы. Создание схемы этого информационного потока помогает понять, как этот поток происходит внутри организации. При выявлении трудностей системный инженер должен обсудить потенциальные изменения для улучшения с руководством проекта и организационным (линейным) руководством. В некоторых сложных ситуациях может помочь корректировка потоков процессов системного проектирования. Некоторые могут потребовать организационных изменений со стороны руководителя проекта или линейного руководства. Эти изменения могут решить одну проблему и затруднить другой путь потока информации 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:** Системная инженерия 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 системной инженерии. Вместо этого системная инженерия 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 киберсистемы, 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 угловая частота 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):** Системная инженерия имеет основу в теории систем [17].



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

ПОДПРИНЦИП 15(c): Системная инженерия имеет математическую основу.

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

Т.О. MBSE — это принципиальное изменение подхода к разработке изделия с этапа создания моделей и до проектирования. И эти модели непосредственно влияют на полученный результат. Подход к проектированию MBSE опирается на процессы управления жизненным циклом изделия, а не заменяет их. MBSE — это скачкообразный рост в процессном подходе проектирования, который не обновлялся в течении последних нескольких десятилетий. При использовании традиционных способов эскизы, которые были нарисованы главным конструктором, передавались на детальную проработку инженерам-конструкторам, и те, в свою очередь, создавали цифровой макет изделия. При модельно-ориентированном подходе генеральный конструктор оформляет свои идеи в моделях, и передает их в конструкторский отдел. Далее специалисты отдела создают цифровой макет. Раньше главный конструктор держал все в голове, а теперь в рамках MBSE он может создать несколько концептуальных моделей и выбирает оптимальную из них с учетом различных критериев.

Опыт внедрения иллюстрирует общую выгоду от использования модельно-ориентированной системной инженерии. Она способна увеличивать ценность продукта за счет ускорения его разработки и устранения конструктивных недостатков еще на этапе проектирования. Очевидно, что в условиях ускорения технологического развития MBSE-подход будет решающим аргументом в условиях жесткой конкурентной борьбы на рынке.

## Основные определения

Ключевым понятием в нашем обсуждении является понятие системной инженерии, которую можно определить как науку о создании крупных комплексных систем, которые соответствуют определенному набору экономических и технических требований. Согласно другому определению, системная инженерия – это междисциплинарный подход к переводу потребностей пользователей в рамки определения системы, проектирование с помощью итеративного процесса архитектуры, который приводит к эффективной системе, отвечающей нуждам пользователей. Системная инженерия применима ко всем этапам жизненного цикла, от разработки концепции до утилизации системы [8].

**Адекватность модели:** Соответствие модели моделируемому изделию (процессу, явлению) по обоснованному перечню характеристик. Факторы, влияющие на разработку цифровых моделей высокого уровня адекватности изделию: квалифицированные кадры (инженеры); технологии; высокопроизводительные вычислительные системы; сроки; финансирование. [ГОСТ Р 57700.37-2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения.]

**Валидация модели изделия:** Подтверждение адекватности модели моделируемому изделию. Валидация модели изделия выполняется для выбранного множества характеристик и заданной степени точности. Определение распространяется на математические, компьютерные, цифровые модели.

**Верификация программного обеспечения компьютерного моделирования:** Подтверждение того, что программное обеспечение компьютерного моделирования выполняет подготовку исходных данных, расчеты и обработку результатов таких расчетов в соответствии с указанной математической моделью. Верификация программного обеспечения

компьютерного моделирования является необходимым условием для его последующей валидации.

**Жизненный цикл изделия, жизненный цикл (life cycle):** Совокупность явлений и процессов, повторяющаяся с периодичностью, определяемой временем существования типовой конструкции изделия от ее замысла до утилизации или конкретного экземпляра изделия от момента завершения его производства до утилизации [ГОСТ Р 56136—2014 - Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Термины и определения, статья 3.16]

**Многоуровневая система требований:** Иерархическая система взаимосвязанных структур данных, содержащих формализованные требования к изделию и его составным частям. Требования верхних уровней декомпозируются, в том числе на целевые показатели и ресурсные ограничения для нижних уровней. Достижение целевых показателей и (или) удовлетворение ресурсным ограничениям всех нижних уровней должно обеспечивать удовлетворение требований более высокого уровня. Частным случаем многоуровневой системы требований является многоуровневая матрица требований. Данные, поступающие от эксплуатируемого изделия, используются для уточнения многоуровневой системы требований, доработки цифровых моделей с целью прогнозирования поведения изделия в различных условиях эксплуатации, оптимизации затрат на техническое обслуживание, ремонт, а также модернизации изделия.

**Требование:** Требуемая (ожидаемая) количественная или качественная характеристика или свойство объекта, а также связанные ограничения и условия. К требованиям также относятся целевые показатели — величины контролируемых параметров, необходимые для удовлетворения требований к изделию с заданной точностью.

**INCOSE:** Международный совет по системной инженерии – (International Council on Systems Engineering) – некоммерческая организация,

ставящая своей целью развитие системной инженерии и профессиональный рост системных инженеров

Применение MBSE связано с созданием целого ряда моделей, которые позволяют системному инженеру анализировать изучаемый объект, который рассматривается как система, с разных точек зрения. При этом важнейшая роль отводится формированию онтологической модели, которая, по сути, представляет собой описание основных терминов и определений. Ниже представлен примерный перечень основных определений, который носит инвариантный характер относительно решаемой задачи и составлен в том числе на основе работы [18].

**Технические системы:** характеризуются в инжиниринге заданием таких характеристик, как предназначение; исполняемые требования, устойчивые во времени функции по преобразованию вещества и энергии; функции по преобразованию информации; состав компонент системы, обеспечивающих исполнение функций и др. При этом машины, оборудование, инструменты в разных отраслях промышленности – машиностроение, приборостроение, авиастроение, автомобилестроение и т.д. рассматриваются в инжиниринге как искусственно созданные материальные объекты, изделия, продукты, обладающие ценностью для кого-либо.

**Изделие (продукт):** предмет / техническая система или набор предметов производства, подлежащих изготовлению в организации (обобщённом предприятии) по конструкторской документации [ГОСТ 2.101–2016 – ЕСКД, Виды изделий, пункт 3.1].

**Технология:** это способы и методы преобразования вещества, энергии и информации из заданного начального состояния в заданное конечное состояние с помощью применяемых методов и инструментов.

**Целевой объект (система):** это то, что представляет интерес для наблюдателя. Описания целевых объектов как систем показывают в заданных требованиях (предназначениях) состав и устройство их конструктивных

компонент (звеньев, блоков, узлов, агрегатов), сущностных характеристик и связанностей.

**Системы:** это целевые объекты, составленные из компонент и обладающие целостностью.

**Объектно-ориентированное моделирование:** предполагает представление с учетом накопленного опыта разнообразных технических объектов, их объединений и детализаций.

**Объектно-ориентированный инжиниринг:** как методология выделяет, аккумулирует, использует накопленные приёмы создания и применения целевых технических систем по изучаемым предметным сферам [3-5]. Рассматривается как прикладная методология, база знаний и практик для опорных предметных областей инжиниринга – машиностроение, приборостроение, судостроение, авиастроение, строительство гражданских и промышленных объектов и т.д.

**Системный инжиниринг:** обобщает методы и инструменты инжиниринга технических изделий разных предметных областей и формирует способы их локализации в предметных областях методом дедукции – от общих правил к конкретным решениям.

**Модельно-ориентированный системный инжиниринг (MBSE – Model Base System Engineering):** это системный инжиниринг, ориентированный на широкое, упорядоченное применение унифицированных модельных представлений, заменяющих или дополняющих традиционные инженерные способы представления информации – чертежи и техническую документацию.

**Модель:** это сущность, воспроизводящая явление, объект или свойство объекта реального мира [ГОСТ Р 57188–2016 – Численное моделирование физических процессов. Термины и определения, статья 2.1.1].

**Нотация моделирования:** объявленный для применения способ представления модели объекта. Моделей системного инжиниринга можно упорядочить по принципу вложенности– от более простых представлений к более сложным и детальным: 1) онтологические модели; 2) архитектурные модели; 3) параметризованные архитектурные модели; 4) математические модели; 5) компьютерные модели.

**Постановка задач модельно-ориентированного анализа системы:** реализуется через постановку требований к ожидаемым результатам описания системы выбранными средствами моделирования.

**Постановка задач модельно-ориентированного синтеза системы:** реализуется через постановку требований к ожидаемым результатам синтеза системы выбранными средствами моделирования.

**Онтологические модели:** в семантической форме задают термины и понятия сущностей и их связанностей, используемые при представлении предметной области и её объектов.

**Архитектурные модели:** задают состав и онтологии учитываемых сущностей, их декомпозиции и связанности. Представляются в виде таблично структурированных и упорядоченных фреймворков опорных семантических записей о системе: а) иерархических таксономий учитываемых сущностей системы; б) таблиц связанностей таксономий сущностей на уровнях иерархии системы.

**Инжиниринговая постановка задачи архитектурного моделирования:** постановка допускающих валидацию требований к результатам анализа и синтеза физической системы средствами архитектурного моделирования.

Параметризация архитектурных моделей дополняет архитектурные модели существенными для рассмотрения качественными и количественными параметрами – ситуационными данными, делает системы наблюдаемыми в пространстве параметров. Идентификация и фиксация ситуационных данных

опирается на возможности имеющихся в распоряжении способов наблюдения и учета.

**Математическая модель:** модель, в которой сведения об объекте моделирования представлены в виде математических символов и выражений [ГОСТ Р 57188–2016, статья 2.1.2]. Математические модели дополняют параметризованные архитектурные модели учитываемыми и математически представленными параметрами систем, их связанными и математически представленными алгоритмами.

**Математическое моделирование:** Исследование каких-либо явлений, процессов или систем объектов путем построения, применения и изучения их математических моделей.

**Компьютерная модель (электронная модель):** Модель, выполненная в компьютерной (вычислительной) среде и представляющая собой совокупность данных и программного кода, необходимого для работы с данными. В основе компьютерной модели лежит математическая модель, реализованная в виде программного кода, и данные, определяющие конкретный объект моделирования [ГОСТ Р 57412—2017 Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения и ГОСТ Р 57700.22—2020 Компьютерные модели и моделирование. Классификация]. Для применения компьютерной модели в процессе моделирования необходимо использовать программное обеспечение компьютерного моделирования и вычислительной техники. Компьютерные модели могут также формироваться и использоваться как модули информационных систем. В основе компьютерной модели лежат архитектурные модели, математические модели, реализованные в виде программного кода, и ситуационные данные, определяющие конкретный объект моделирования. Для применения компьютерной модели в процессе моделирования необходимо использовать программное обеспечение компьютерного моделирования и вычислительной техники [ГОСТ Р 57700.22-

2020 Компьютерные модели и моделирование. Классификация, пункт 3.1.3]. Компьютерное моделирование изделия выполняют с целью получения данных, необходимых для принятия решений в процессах разработки, проектирования, производства, сопровождения эксплуатации и других задач в ходе жизненного цикла изделия. [ГОСТ Р 57412–2017 Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения, п. 3.1.11].

**Цифровая модель изделия:** это система 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 [ГОСТ Р 57700.37-2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения.] Цифровая модель создается с использованием ПО компьютерного моделирования и (или) инструментальных программных и иных средств. Цифровая модель должна описывать структуру, функциональность и поведение разрабатываемого или эксплуатируемого изделия на тех стадиях жизненного цикла, которые установлены в соответствующих технических заданиях. Наполнение и функциональность цифровой модели зависит от стадии жизненного цикла изделия. Оценка соответствия цифровой модели изделия в общем случае включает в себя процедуры верификации и валидации математических моделей по ГОСТ Р 57188, компьютерных моделей и ПО КМ по ГОСТ Р 57700.1, ГОСТ Р 57700.2, ГОСТ Р 57700.24, ГОСТ Р 57700.25. Под электронными документами понимаются электронные документы по ГОСТ 2.001, ГОСТ 3.1001, ГОСТ 3.1102, ГОСТ 19.101, ГОСТ 34.601, ГОСТ Р 58301.



Продолжая рассмотрение моделей, используемых в MBSE подходе, следует отметить, что применяемые в инжиниринге математические представления могут быть выражены в форме:

**целевых требований в форме ограничений**, которые формируются путем идентификации и математического представления системных и физических условий, накладываемых на объекты рассмотрения, учета и использования накопленных профильных методик и практик математического моделирования;

**целевых критериев**, которые формулируются в виде параметров целевых параметров, сверток параметров в форме целевых функций с указанием в составе требований дополнений в терминах «по возможности больше», «по возможности меньше»;

**моделей многокритериальной оптимизации** – математических представлений совместно рассматриваемых моделей ограничений и критериев оптимизации;

**математическими алгоритмами** – действий, направленных на достижение требуемого результата.

**Задача модельно-ориентированного анализа системы:** предполагает постановку требований к ожидаемым результатам описания и анализа системы с применением выбранной методологии и средств моделирования, а также, по возможности, предполагает сбор и систематизацию исходных данных в целях модельно-ориентированного представления, анализа и сопоставления известных профильных кейсов.

**Задача модельно-ориентированного синтеза системы:** предполагает постановку, с учётом результатов анализа, требований к ожидаемым результатам синтеза (сборки итогового представления) рассматриваемой системы. В исполнении задач синтеза одновременно применяются разработанные на этапе анализа описания системы и выявленные на этапе сбора исходных данных и обзоров кейсы существующих решений. Синтез

происходит на основе совмещения этих представлений в исполнимой конфигурации системы.

## Схема применения MBSE подхода

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» [18].

Алгоритм анализа технической системы включает:

- сбор и анализ исходных данных;
- выделение функциональных подсистем и идентификацию их взаимосвязей;
- исполнение итерационных процедур унифицированного описания компонент системы и их взаимосвязей, иерархические и горизонтальные детализации формируемых представлений:
  - обзоры и анализы устройства и характеристик известных технических систем и условий их применения;
  - обличное 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» [3].

Опорный алгоритм модельно-ориентированного концептуального проектирования, выполненный в Центре прикладных систем искусственного интеллекта МФТИ имеет вид, представленный ниже [18].

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 [19, 20]:

- 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.

## Роль и место MBSE подхода: точка зрения ГК Росатом

В фундаментальной монографии [8] анализируется, в том числе роль и место в реализации проектов ГК Росатом. Ниже представлена эта точка зрения.

MBSE подход должен способствовать решению проблемы роста сложности рукотворны инженерных систем, которые необходимы человеку. Сложность изделий, которые создает человек, растет постоянно, однако изделия, содержащие миллионы деталей, – это явление нашего времени. Рост сложности можно изобразить следующей цепочкой: система механическая → электромеханическая → система, управляемая компьютером → подключенные сервисы → смарт продукт → интерактивное решение → «умные» системы.

Увеличение технической сложности приводит к новым проблемам в архитектуре проекта, аппаратном и программном обеспечении, а также в организации коллективной работы. Сбой в системе наступает тогда, когда неожиданное событие приводит к непредсказуемому взаимодействию элементов в системе, непромоделированному на стадии тестирования. Чем больше элементов в сложной системе, тем больше вариантов этих взаимодействий и тем больше проблема.

Преодоление роста сложности проектируемых систем невозможно без современных подходов системной инженерии. Можно сказать, что рост сложности изделий и способов организации деятельности по их созданию и привели к возникновению новой прикладной дисциплины – системной инженерии, позволяющей установить связь между стратегическими целями, конкретными задачами и измеримыми результатами инженерной деятельности по созданию систем различного назначения.

Этапы жизненного цикла разработки целевого объекта в рамках применения системной инженерии могут быть наглядно представлены с

помощью так называемой V-модели (рис. 2), которая используется для определения единой процедуры разработки сложных систем.

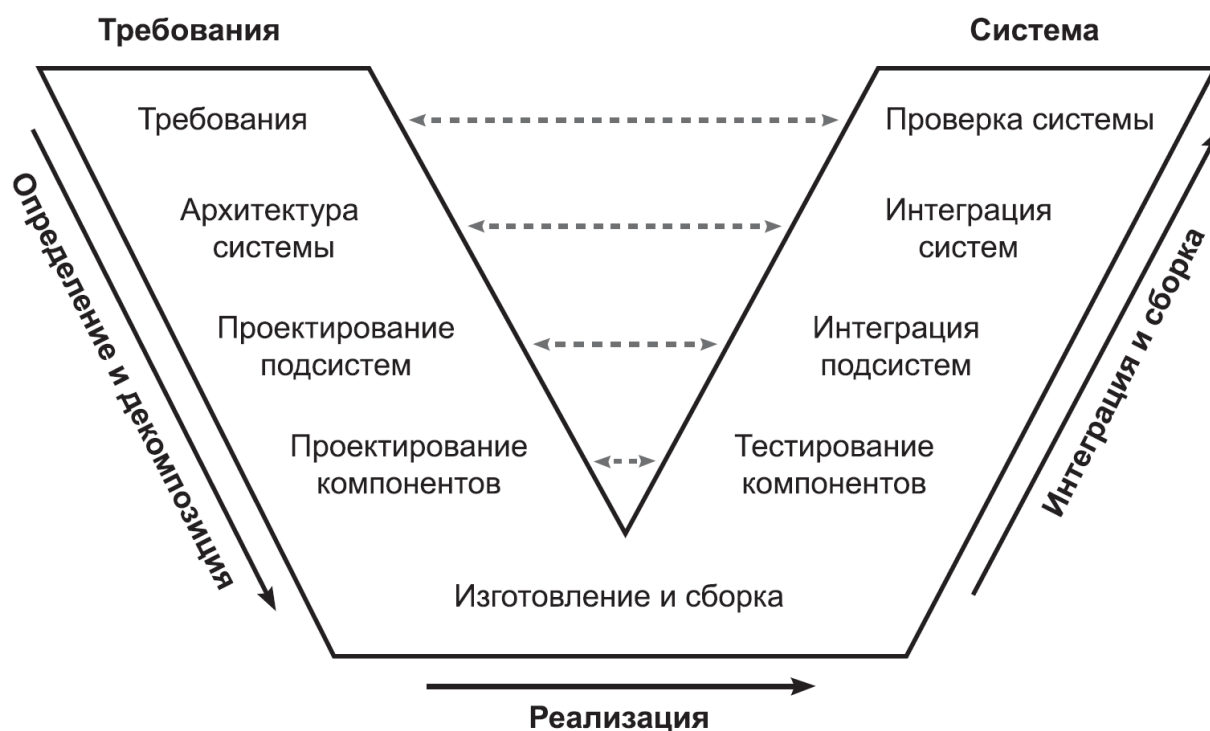


Рис. 2 V-модель процесса системной инженерии

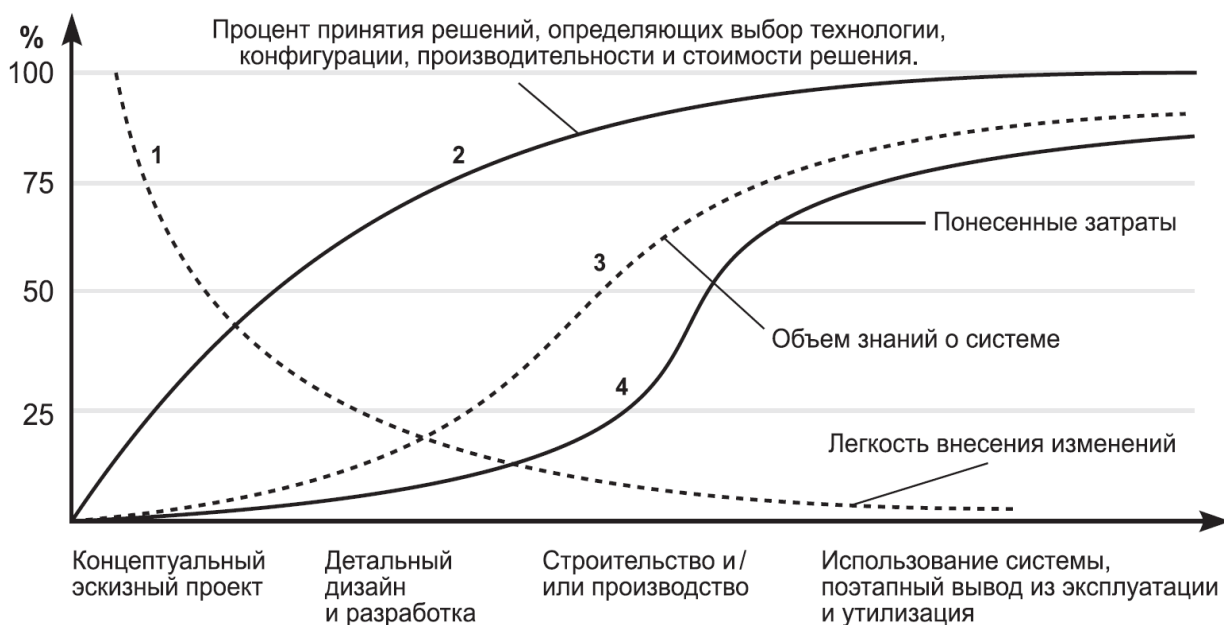
Представленная на рис.2 V-диаграмма является моделью разработки систем и используется для демонстрации разбиения этапов жизненного цикла системы на практики ее определения и воплощения (левая и правая ветви V-модели), каждая из которых в свою очередь разбивается на дополнительные подэтапы. Левая часть V-модели представляет декомпозицию требований заказчика на функции будущей системы, включает в себя архитектуру системы, проектирование подсистем, компонентов, а также изготовление и сборку. Правая часть отражает последовательность создания объекта гарантированной производительности, которая обеспечивается посредством тестирования компонентов, интеграции подсистем и проверки работоспособности интегрированной системы. Детализация проекта увеличивается при движении слева направо. Горизонтальные линии,



показывают, как результаты каждой из фаз разработки (на левой части диаграммы) влияют на этапы каждой из фаз тестирования (на правой части).

Концепция V-образной модели была разработана в Германии и США в конце 1980-х гг. независимо друг от друга. Немецкая V-модель была разработана аэрокосмической компанией IAVG для Министерства обороны Германии и с 1992 г. была принята для гражданских нужд. Американская V-Model была разработана национальным (а с 1995 г. – международным) советом по системной инженерии для спутниковых систем, включая оборудование, программное обеспечение и взаимодействие с пользователями.

V-диаграмма иллюстрирует процесс уточнения требований к проекту (рис. 3), когда идет последовательный процесс определения требований к системе: потребности заказчиков фиксируют требования к системе, требования определяют архитектуру, архитектура – рабочую документацию, при этом свобода в выборе инженерных решений на каждом уровне уменьшается.



**Рис.3 Процесс создания продукта на разных этапах жизненного цикла.**

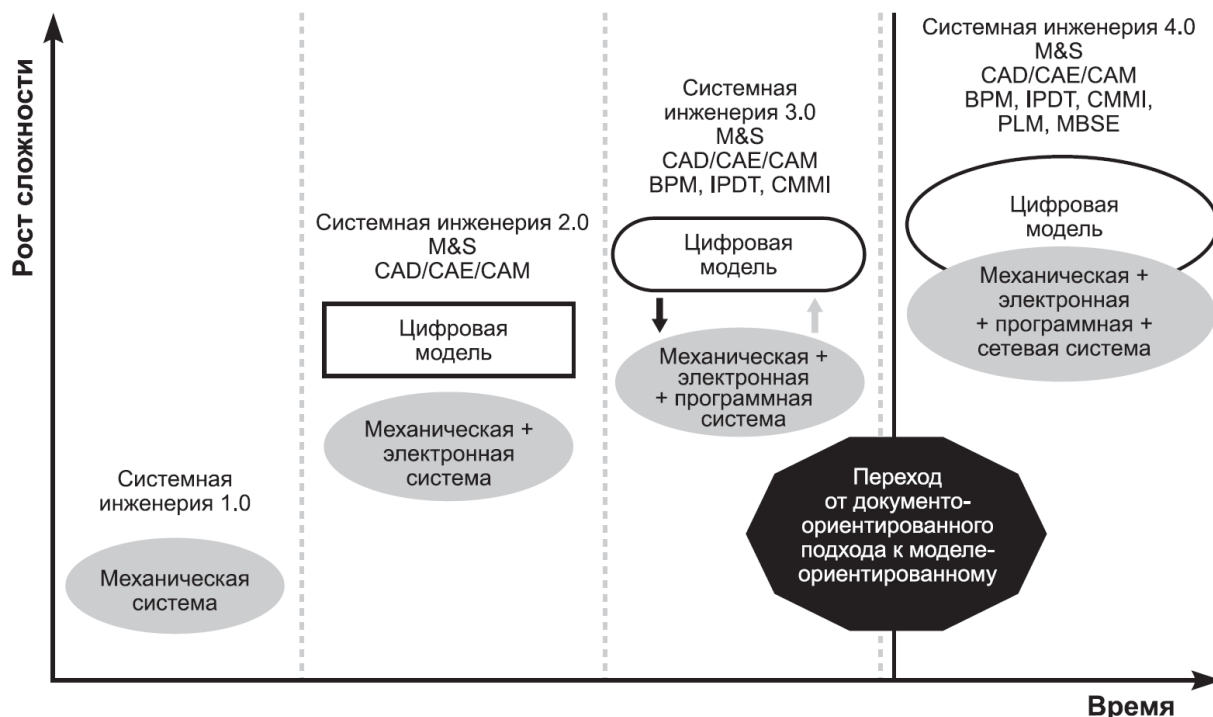
На рис. 3 показано, что в начале процесса концептуального проектирования возможности внесения изменений максимальны, но по мере фиксации технологических и архитектурных решений они снижаются. То есть, чем позже вносятся изменения в конструкцию изделия, тем бóльшие издержки несет компания. Кривая 2 показывает процент принятых решений, определяющих выбор технологии, конфигурации, производительности и стоимости решения. В начале процесса кривая резко растет, а затем рост замедляется, – то есть основные инженерно-технологические решения фиксируются именно на начальном этапе, и они диктуют логику дальнейшего проекта. Кривая 4 (рост затрат) носит s-образный характер, так как на этапе проектирования затраты минимальны, но они резко возрастают в момент передачи изделия на производство. Кривая 3 (объем знаний о системе) тоже имеет s-образный характер, хотя стадия быстрого роста на этой кривой менее выражена.

Одной из современных методологий системной инженерии является MBSE (Model Based System Engineering – системная инженерия на основе моделей). MBSE в качестве концепции обсуждается с конца 1990-х гг., как инициатива INCOSE – с 2006 г.; можно сказать, что ее современное толкование сформировалось на международной конференции по MBSE, которая состоялась в 2010 г. В самом общем плане MBSE – это развитие системной инженерии, опирающаяся на единую согласованную модель целевой системы, которая объединяет все данные и свойства о целевой системе. Это концепция формализованного применения моделирования для поддержки формирования требований к целевой системе, поддержки проектирования, анализа, верификации и валидации системы на всех фазах ее жизненного цикла.

Анализ системных катастроф [21] позволил выявить ряд проблем, возникающих при проектировании сложных многокомпонентных объектов, включая такие проблемы, как недостаточная коммуникация (особенно во время переходов и переключений между разными моделями), устаревшие спецификации или неполные требования к изделию, слабый контроль над

конфигурацией, недостаточное качество тестирования на наличие ошибок и, кроме того, неспособность обеспечить постепенную деградацию системы в случае отказа. Концепция MBSE является ответом на перечисленные вызовы и призвана обобщить модели знаний, улучшить коммуникации, обеспечиваемые моделями, лучше оценивать модели на предмет их согласованности, полноты и корректности; увеличить способность анализировать последствия изменений в системе; улучшить преодоление сложности и повысить качество создаваемой системы; усовершенствовать извлечение знаний и их повторное использование (что приводит к сокращению времени производственного цикла и снижению затрат на обслуживание), а также позволяет минимизировать потери знаний после ухода членов команды. Т.е. MBSE основано на применение моделирования для обеспечения реализации предъявляемых к системе требований на всех этапах жизненного цикла изделия. MBSE подразумевает концепцию непрерывного моделирования и переход на открытый обмен данными на всех этапах формирования изделия. Иными словами, MBSE появляется на верхней ступени развития инструментов системной инженерии (рис.4).

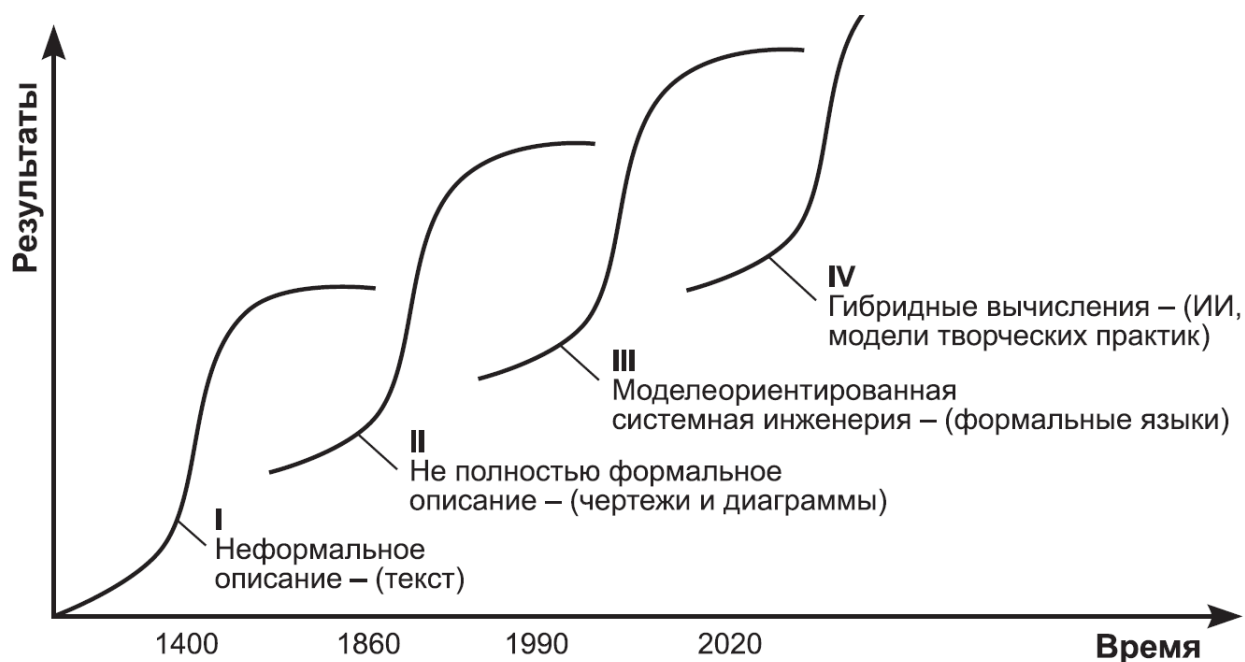
На рис. 4 показаны исторические этапы сближения цифровой модели и физического объекта, продемонстрировано усложнение физических систем (механические, мехатронные и т. п.), а также показаны типы программного обеспечения, используемого для создания цифровых моделей на соответствующих этапах. На первом этапе (цифровой модели еще нет) практически все продукты были механическими и проектировались они на основе инструментов докомпьютерной так называемой «системной инженерии 1.0» с помощью мало кому сегодня знакомых листов ватмана и кульманов. Второй этап – «системная инженерия 2.0» или стадия M&S (Modeling and Simulation) – проектирование и моделирование на основе инструментов CAD/CAE. Третий этап – «системная инженерия 3.0», где в дополнение к CAD/CAM/CAE добавляются различные концепции и методики управления бизнес-процессами



**Рис. 4. Переход от документо-ориентированного подхода к модели-ориентированному**

Ключевым событием в процессе перехода на MBSE является переход от документо-ориентированного подхода к модели-ориентированному. Большинство организаций давно полагаются на обмен документами в электронной форме. Это могут быть текстовые документы, таблицы Excel или чертежи в формате PDF. Но тот факт, что данные хранятся в электронных файлах, не означает, что они доступны в разных подсистемах проектирования изделия, поскольку для извлечения из этих файлов необходимой информации все еще требуется человек. При этом документ на естественном языке не предполагает извлечения однозначно определяемой информации.

Переход к модели-ориентированной инженерии как ключевой в развитии системной инженерии в книге [2] MBSE представлен как третий этап развития системной инженерии (рис. 5).



**Рис.5. Эволюция методов системной инженерии**

Согласно рисунку 5 эволюция методов системной инженерии проходит 4 этапа. Первый – неформальное описание (чертежей на этом этапе еще не было – обходились эскизами, макетами и пространственными текстовыми описаниями). Второй – не полностью формальное описание, его нельзя формально проверить, оно предназначено для чтения и интерпретации людьми, а не компьютерами. Третий – модели-ориентированная системная инженерия, предусматривает использование формальных моделей, которые могут быть обработаны компьютером. На данном этапе применяют не только физические, но и логические модели, использующие аппарат дискретной математики и алгоритмические модели на языках программирования. Четвертый – это этап, на котором появляется генеративный дизайн, когда моделируется творческая практика в процессе итерационного взаимодействия человеческого и компьютерного интеллекта. Особенностью рисунка 5 является то, что этапы даны в виде s-образных кривых, которые описывают закономерности появления на рынке новых технологий. На начальном этапе – это медленный рост (осведомленность о новой технологии невелика, и на нее

переходит незначительное число пользователей), затем быстрый рост (за счет перехода большинства) и, наконец, стадия насыщения.

Концепция MBSE – это в существенной мере концепция решения проблемы роста сложности. Увеличение числа участников с определенного момента перестает добавлять преимущества в решении задачи, хотя есть и экономические соображения, согласно которым немногие компании могут позволить себе увеличить штат сотрудников. При этом переход к 3D-моделям не является автоматически переходом к концепции MBSE.

Предприятие, внедряющее MBSE-подход, должно полагаться на доступность данных, поэтому 3D-модель должна базироваться на параметрах и форматах, которые позволяют другим приложениям читать их. Эти параметры должны быть доступны на этапах моделирования физических процессов в изделиях, в инструментарии оптимизации продукта и в инструментах для оптимизации производства. Во всех случаях параметры обеспечивают непрерывность данных между различными приложениями (решающими разные задачи), устраняя необходимость создавать новые представления в разных форматах. Это и есть основной шаг в направлении преодоления сложности.

В основе концепции MBSE лежит идея создания единой модели целевой системы, объединяющей все характеристики и свойства системы в рамках одной модели. Эта модель должна быть способна генерировать все документы, все свойства, все представления об изделии из этой объединенной модели, которая является «единым источником истины». Иными словами, изменения в одной системе должны автоматически отражаться в других, обеспечивая единую картину, «единую истину».

Из данного «источника истины» конкретные представления для различных нужд могут генерироваться автоматически в любой момент времени, на любом этапе эволюции модели. Если нужны последние версии каких-либо документов, они генерируются из модели как определенный «срез данных», основываясь на этом «источнике истины».

Это идеальная концепция, которая лежит в основе MBSE-подхода. Реальность состоит в том, что большинство современных разработчиков имеет дело с большим числом приложений от разных вендоров. Под разные задачи подбираются лучшие в классе решения, которые сложно интегрировать. Информация «рассыпана» по разным системам в CAD-, в Excel-файлах, в PDF-, в SysML-моделях. Это известно как «Silo problem» (Проблема колодцев данных) – проблема хранения данных в неинтегрированных системах.

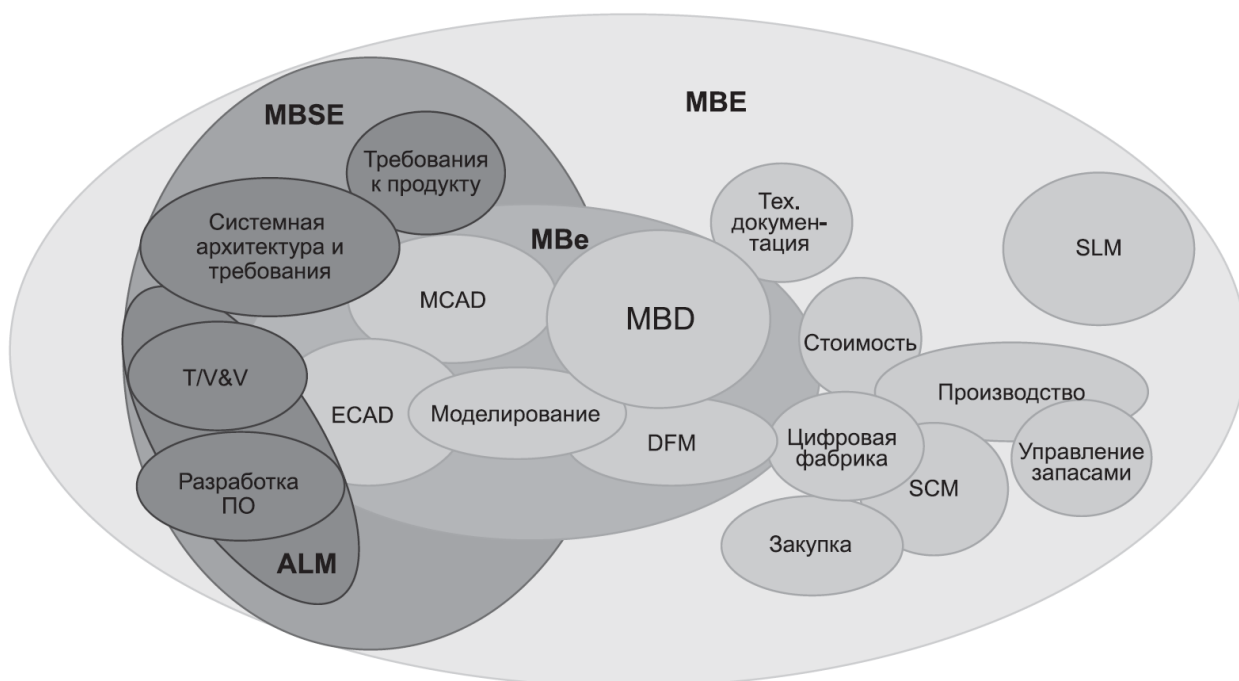
Ключевая характеристика MBSE – это поддержка одновременного использования множества методов описания (viewpoints), т. е. одновременного применения множества методов моделирования для получения множества групп описаний (views) для разных задач [22].

MBSE подход – это практика разработки набора связанных системных моделей, которые помогают определять, проектировать и документировать целевую систему. В таком сценарии модель становится основным источником обмена информацией для системных инженеров. При этом значительно сокращается зависимость от необходимости использовать традиционную документацию.

Цель MBSE состоит в том, чтобы создать единую, унифицированную модель системы, из которой могли бы быть сформированы все документы и представления об объекте. Эти документы должны быть непротиворечивыми, согласованными, сгенерированными из «единого источника истины». При этом концепция MBSE предполагает объединение в единой модели всех инструментов и баз данных.

Распространение концепции MBSE на все этапы жизненного цикла приводит к концепции MBE (Model Based Enterprise – предприятие, основанное на моделях), представленной на рис. 6. При этом важно отметить, что концепция MBE предполагает не просто использование моделей на всех этапах жизненного цикла, что было известно задолго до появления этих концепций, а означает появление унифицированной модели, которая объединяет в едином цифровом пространстве все инструменты и все

базы данных в рамках всего предприятия. Т.е. есть устанавливается сеть постоянных соединений между различными элементами общей модели, которые находятся в разных подмоделях и базах данных. Это дает возможность инженерам осуществлять поиск по всем подмоделям унифицированной модели, даже если они находятся в удаленных рабочих группах. Это позволяет бесшовно передавать данные из одного инструмента в другой и синхронизировать все параметры модели по мере развития общей модели, визуализировать процесс совместной работы и отслеживать точки принятия решений на разных этапах ЖЦ.



**Рис. 6. Соотношение основных понятий, имеющих отношение к MBE и MBSE**

МБЕ/МБСЕ-подход позволяет улучшить качество проектирования, снижает риск ошибок при внесении изменений, улучшает качество реализации и тестирования системы на этапе, когда еще не все компоненты системы доступны или внедрены, а также облегчает тестирование систем, когда тестируемые подсистемы разнесены географически. МБЕ/МБСЕ-подход позволяет повысить производительность труда команды разработчиков, обеспечить более высокую степень согласования с требованиями различных



заинтересованных сторон и, соответственно, более полно учесть потребности клиентов.

Следует отметить, что в последнее время появилось достаточно много аббревиатур, связанных с понятием МВЕ, и все они имеют общую часть «МВ – Model Based» (основанные на моделях): MBSE, MBD, MBe, MBE. Рис. 6 позволяет наглядно показать взаимосвязь и отличия этих терминов. На рисунке в неявном виде присутствует понятие времени, в том смысле, что в левой части диаграммы расположен инструментарий, соответствующий начальной стадии жизненного цикла (в основном, средства проектирования), в правой – инструментарий более поздних этапов жизненного цикла (производство и обслуживание). На рисунке представлено множество МВЕ (Model Based Enterprise) – унифицированная модель уровня предприятия, которая объединяет в едином пространстве все инструменты и все базы данных компании.

Наиболее крупными подмножествами МВЕ являются: MBSE; MBe (Model-Based engineering) – инжиниринг на основе моделей, в рамках которого используются математические мультимасштабные модели на всех этапах жизненного цикла; ALM (Application Lifecycle Management) – система управления жизненным циклом программных приложений, которая позволяет обеспечить понимание процесса разработки приложений и представить его в качестве одного из бизнес-процессов, что необходимо для автоматизации процесса разработки и интеграции различных инструментов и дает возможность производителям выполнять сбор требований и контроль постоянно растущего объема программного кода, в том числе встроенного в изделия. Как видно из рисунка, ALM включает в себя (почти полностью) такие подмножества, как «разработка ПО», а также систему тестирования и верификации моделей T/V&V (Test/Validation & Verification).

MBD (Model-Based Definition – определение на основе модели) относится к трехмерным САД-моделям, которые предоставляют спецификации для компонента или сборки (без дополнительных 2D-

чертежей). Эти спецификации содержат описание геометрии изделия, размеры и допуски, спецификации материалов, наборы технических данных и решений.

Пояснения требуют еще некоторые сокращения, используемые на рис.6. SLM (Service Level Management) – управление уровнем обслуживания, набор инструментов для определения оказываемых услуг, согласования уровней обслуживания (SLA). SCM (Supply Chain Management) – управление цепочками поставок. MCAD (Mechanical CAD) – механический CAD, автоматизированное проектирование механических устройств. ECAD (Electronic CAD) – электронный CAD, система автоматизации проектирования электроники. DFM (Design for Manufacturing) – комплекс мер, направленных на создание таких конструкций, услуг, процессов или систем, которые позволят производить данный продукт или услугу быстрее, дешевле и качественнее. Цифровая фабрика (Digital Factory) – набор средств управления, базирующихся на использовании технологий моделирования производственных процессов, позволяющий конфигурировать, анализировать, оценивать элементы производственной системы и удобство управления ей на ранней стадии (еще до того, как физическая фабрика будет построена).

Перспективы внедрения MBSE возрастают по мере распространения аддитивного производства, поскольку по мере сокращения производственных ограничений резко увеличиваются возможности для оптимизации изделий.

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

## Литература:

1. Баденко В.Л., Большаков Н.С., Федотов А.А., Ядыкин В.К. Цифровые двойники сложных технических систем в индустрии 4.0: базовые подходы // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. – 2020. – Т. 13. – №. 1. – С. 20-30.
2. Левенчук А. И. Системное мышление. М: Издательские решения. – 2018. – 398 с.
3. Романов А.А. Прикладной системный инжиниринг. М: Физматлит. – 2015. – 558 с.
4. Кондратьев В., Лоренц В. Даешь инжиниринг! Методология организации проектного бизнеса. М: Эксмо. – 2009. – 576 с.
5. Модельно-ориентированный системный инжиниринг 2.0 : учеб. пособие / В. В. Кондратьев. – Москва : МФТИ, 2021. – 102 с.
6. 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.
7. INCOSE Systems engineering principles; M. D. Watson - Chair et al., 2022; ISBN 978-1-937076-08-5
8. Прохоров А., Лысачев М., Боровков А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. М.: АльянсПринт. – 2020. – 401 с.
9. 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. – Т. 148. – №. 5. – С. 04022020.
10. 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.

11. Баденко В.Л. Геоинформационные технологии для решения задач природообустройства: Учеб. пособие. Санкт-Петербург: Изд-во СПбПУ, – 2013. – 147 с.
12. Баденко В.Л., Зотов Д.К., Федотов А.А. Построение информационных моделей существующих зданий на основе данных лазерного сканирования: учебное пособие. Санкт-Петербург: Изд-во СПбПУ, – 2019. – 74 с.
13. Баденко В.Л., Зотов Д.К., Федотов А.А. Информационные технологии для выбора места размещения объекта капитального строительства: учебное пособие. Санкт-Петербург: Изд-во СПбПУ, – 2019. – 164 с.
14. Бабкин А.В. Стратегическое управление развитием цифровой экономики на основе умных технологий. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, – 2021 – 794 с.
15. Nardelli P. H. J. Cyber-physical Systems: Theory, Methodology, and Applications. – John Wiley & Sons, 2022. – 271 с.
16. 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.
17. Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем: математические основы. М: Мир, – 1978. – 311 с.
18. Гаричев С.Н., Горбачев Р.А., Давыденко Е.В. Джапаров Б.А., Кондратьев В.В. Модельно-ориентированный инжиниринг физико-технических, информационных и интеллектуальных систем //Труды Московского физико-технического института. – 2022. – Т. 14. – №. 2 (54). – С. 149-161.
19. Баденко В.Л. Анализ экологических рисков в ГИС на основе нечетких множеств // Информация и космос. – 2013. – №3. – С. 78-84
20. Arefiev N., Terleev V., Badenko V. GIS-based fuzzy method for urban planning // Procedia Engineering. – 2015. – v. 117. – С. 39-44.

21. Oliver E., Mazzuchi T., Sarkani S. A resilience systemic model for assessing critical supply chain disruptions //Systems Engineering. – 2022. – T. 25. – №. 5. – C. 510-533.

22. Henderson K., Salado A. Value and benefits of model-based systems engineering (MBSE): Evidence from the literature //Systems Engineering. – 2021. – T. 24. – №. 1. – C. 51-66.