

Эталонная модель модельно-ориентированной системной и программной инженерии (model-based systems and software engineering - MBSSE) и ее связь с процессными стандартами системной инженерии

В.А. Сухомлин, Д.А. Гапанович

Аннотация— Системная инженерия на основе моделей (Model-Based System Engineering - MBSE) — это формализованное применение моделирования для поддержки системного проектирования на протяжении всего жизненного цикла интересующих систем (systems of interest - SoI). Подход MBSE – сформировался в целостную методологию, направленную на агрессивное применение методов и средств моделирования для определения, анализа и эволюции моделей на протяжении всего жизненного цикла системы, что способствует повышению уровня технологичности выполнения стадий определения концепции и определения системы, повышению эффективности и качества процесса управления жизненным циклом системы, включая стадии эксплуатации и сопровождения. Это достигается, благодаря: возможности применения анализа с помощью моделирования на этапах разработки, автоматизации тестирования и валидации моделей, поддержки аналитики многих точек зрения на каждом шаге жизненного цикла системы. А главное – данный подход обеспечивает возможность повторного использования репозитория моделей одного проекта в других проектах. В последние годы различные инженерные области успешно использовали подход MBSE для разработки сложных систем; например, в области Интернета вещей, разработки миссий, кибер-физических систем (CPS), систем систем (SoS), цифровых двойников и др. Однако, несмотря на многолетний в целом успешный опыт применения MBSE на практике, фундаментальных методологических стандартов международного уровня для подхода MBSE, аналогичных известным стандартам системной инженерии ISO/IEC/IEEE 15288 и ISO/IEC/IEEE 12207, до недавнего времени не было. Новый стандарт ISO/IEC/IEEE 24641:2023 — Системная и программная инженерия. Методы и инструменты для модельно-ориентированной системной и программной инженерии, - один из первых стандартов, который может претендовать на эту роль. Статья посвящена описанию основных положений данного стандарта, а также

рассмотрению его взаимосвязей с другими основными стандартами системной инженерии.

Ключевые слова— Model-Based Systems Engineering (MBSE), system life cycle management process, MBSSE, ISO/IEC/IEEE 24641:2023, ISO/IEC/IEEE 15288, ISO/IEC/IEEE 12207, modeling methods and tools.

I. ВВЕДЕНИЕ

Системная инженерия на основе моделей (Model-Based System Engineering - MBSE) представляет собой формализованный подход к разработке инженерных систем, основанный на развивающемся процессе моделирования систем [1], [2], [3], [4]. MBSE рассматривается как очередной этап развития системной инженерии – методологии создания и эксплуатации сложных систем, удовлетворяющих требованиям заинтересованных лиц. За последние годы подход MBSE получил широкое распространение в различных инженерных областях, например, в области Интернета вещей [5], разработки миссий [6], кибер-физических систем (CPS) [7], [8], систем систем (SoS) [9], цифровых двойников [10] и др.

Однако, несмотря на многолетний опыт применения MBSE на практике, фундаментальных методологических стандартов международного уровня для подхода MBSE, аналогичных известным стандартам системной инженерии ISO/IEC/IEEE 15288 [11] и ISO/IEC/IEEE 12207 [12], до недавнего времени разработано не было, если не считать упоминаний подхода MBSE и его достоинств в одном из приложений в новой версии ISO/IEC/IEEE 15288 [11].

Стандарт ISO/IEC/IEEE 24641:2023 — Системная и программная инженерия. Методы и инструменты для модельно-ориентированной системной и программной инженерии [13], посвящен возможностям и методам разработки систем и программного обеспечения на основе моделей (MBSSE) – это один из первых

Статья получена 15 декабря 2023.

В.А. Сухомлин – МГУ имени М.В. Ломоносова (email: sukhomlin@mail.ru)

Д.А. Гапанович – МГУ имени М.В. Ломоносова (email: dim.gapanovich@gmail.com)

стандартов, который можно отнести к фундаментальным методологическим решениям в области MBSE, стандартизованным на международном уровне. Еще одной важной чертой этого стандарта, отражающего одну из тенденций развития системной инженерии, является его направленность на интеграцию системной инженерии с программной инженерией.

Данный стандарт определяет методологические основы подхода MBSSE, в частности, в нем определяются:

- Эталонная модель для общей структуры/фреймворка и процессов, специфичных для MBSSE
- Взаимосвязь между компонентами эталонной модели
- Специфические для MBSSE процессы, которые описаны с точки зрения цели, входных данных, результатов и задач
- Методы для поддержки определенных задач каждого процесса, специфичного для MBSSE

- Возможности инструмента для автоматизации или полуавтоматизации задач или методов
- Рассмотрим основные положения данного стандарта.

II. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Как и любой стандарт, ISO/IEC/IEEE 24641 начинается с определения терминов, в контексте которых приводится описание процессов MBSSE. Следует отметить, что базовой онтологической моделью для определения терминов стандарта является модель, представленная на Рис. 1, которая отражает основную концепцию стандарта, направленную на интеграцию с помощью методов и средств моделирования двух миров: физического (системы и связанные с ними сущности) и виртуального (модели, методы и средства моделирования и все, что с ними связано).

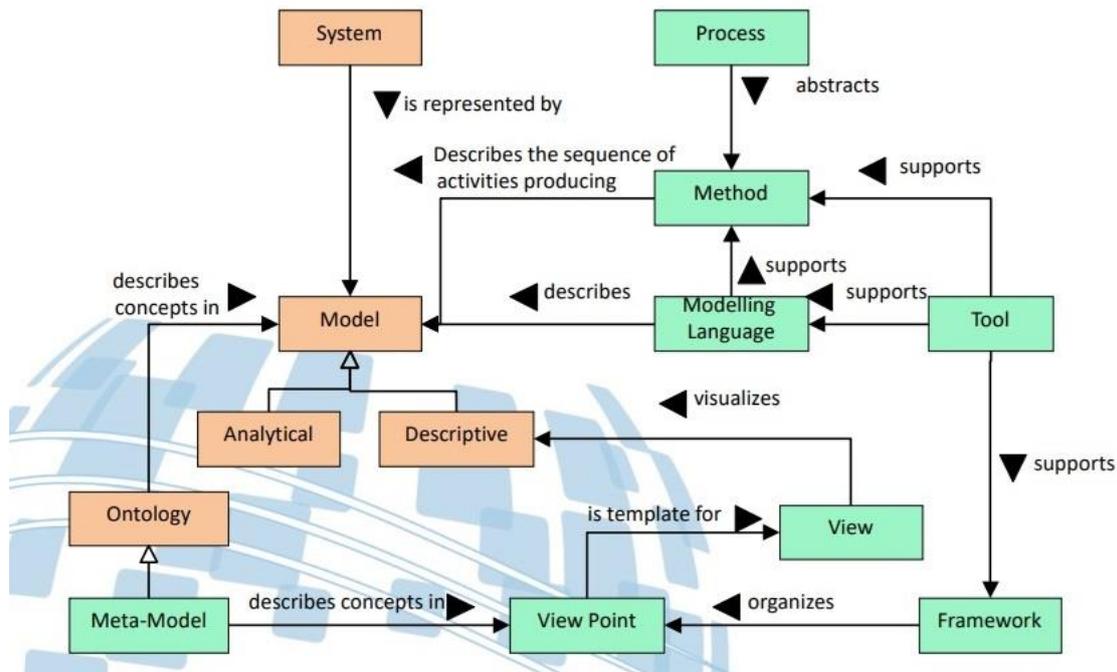


Рисунок 1. Концептуальной модели системы терминов стандарта

[https://www.omgwiki.org/MBSE/lib/exe/fetch.php?media=mbse:incose_mbse_iw_2023:3.3.2023-01-28.iw2023_mbse_workshop_standards_iso_iec_ieee_24641_v2.pdf].

Далее повторим некоторые определения из стандарта, ориентируясь на приведенную выше онтологическую модель.

Система: Система, состоящая из частей или элементов, которые вместе демонстрируют установленное поведение или значение, которого отдельные компоненты не имеют. Примечание 1: Иногда систему рассматривают как продукт или как услуги, которые она предоставляет.

Примечание 2: Полная система включает в себя все сопутствующее оборудование, средства, материалы, компьютерные программы, встроенное программное

обеспечение, техническую документацию, услуги и персонал, необходимые для эксплуатации и поддержки системы в степени, необходимой для самостоятельного использования в предполагаемой среде.

Модель: Абстрактное представление объекта или набора объектов, которое обеспечивает возможность изображать, понимать или прогнозировать свойства или характеристики объекта при условиях или ситуациях, представляющих интерес.

Аналитическая модель: Модель, описывающая математические взаимосвязи, например, дифференциальные уравнения, которые поддерживают количественный анализ параметров системы (динамические и статические модели).

Описательная модель (descriptive model): Модель, которая показывает взаимосвязанный набор элементов модели, которые представляют ключевые аспекты

системы, включая ее структуру, поведение, параметры и требования.

Онтология: Логическая структура терминов, используемых для описания области знаний, включая определения применимых терминов и их взаимосвязей

Метамодель: Метамодель: Особый вид модели, определяющий абстрактный синтаксис языка моделирования.

Модель, специфичная для дисциплины: Представление системы или элементов системы с точки зрения дисциплины, решающей проблемы, специфичные для предметной области, когда элементы модели происходят из конкретной дисциплины.

Системная и программная инженерия на основе моделей (model-based Systems and Software Engineering): MBSSE - формализованные приложения моделирования для поддержки системной и программной инженерии.

Базовая линия модели (model baseline): Неизменяемый набор элементов конфигурации модели со связанными с ними версиями и вариантами.

Элемент конфигурации модели (model Configuration item): Логическая часть модели, которая поддерживается контролируемым образом и имеет отслеживаемую историю изменений.

Элемент модели: Атомарные (элементарные) элементы, которые представляют отдельные компоненты, действия, состояния, сообщения, свойства, отношения и другие элементы, описывающие состав, характеристики или поведение системы.

Библиотека элементов модели (model element library): Набор или каталог неизменяемых элементов модели, которые можно использовать в любом проекте, упакованные в один артефакт.

Шаблон модели (model pattern): Общая, многогранная модель или часть модели, которую можно использовать в качестве решения часто возникающей проблемы в заданном контексте при проектировании системы или программного обеспечения.

Хранилище моделей (model repository): означает хранение различных моделей на разных уровнях абстракции и облегчение понимания и сотрудничества между заинтересованными сторонами и практиками на разных уровнях.

Актив (asset): Элемент, вещь или объект, который имеет потенциальную или фактическую ценность для организации (материальные активы, нематериальные активы; движимое имущество, недвижимое имущество. Нематериальные активы можно разделить на цифровые активы и нецифровые нематериальные активы. Когнитивные активы относятся к нематериальным активам, созданным организацией в ходе ее деятельности. Данные, информация, знания, мудрость и ресурсы моделирования — все это относится к когнитивным активам).

Концепция операций (concept of operations): Определение пользователем того, как вся организация будет действовать для выполнения своей миссии.

Зрелость (maturity): Степень, с которой система, продукт или компонент удовлетворяет требованиям надежности при нормальной эксплуатации.

Уровень зрелости (maturity level): Степень достижения, при которой все цели были достигнуты.

Мера эффективности (measure of effectiveness - MoE): Операционная мера успеха, которая тесно связана с достижением оцениваемой оперативной цели в предполагаемой операционной среде при заданном наборе условий.

Мера производительности MoP (measure of performance MoP): Технический параметр, который обеспечивает критические требования к производительности для удовлетворения меры эффективности (MoE).

Эксплуатационная концепция (operational concept): Вербальное и графическое изложение предположений или намерений организации в отношении операции или серии операций системы или связанного набора систем.

Эталонная структура, эталонный фреймворк (reference framework): Структура для понимания существенных взаимосвязей между объектами некоторой среды и для разработки согласованных стандартов или спецификаций, поддерживающих эту среду.

Вариант использования (use case) - описание поведенческих требований к системе и ее взаимодействию с пользователем.

Точка зрения (viewpoint) - рабочий продукт, устанавливающий соглашения для построения, интерпретации и использования представлений модели для определения конкретных системных проблем.

III ЭТАЛОННАЯ МОДЕЛЬ MBSSE

Стандарт ISO/IEC/IEEE 24641:2023 определяет эталонную модель систем и программного обеспечения (MBSSE) в виде структурированной системы специфических для MBSE процессов, разделенной на верхнем уровне на следующие четыре группы процессов:

- **Планирование MBSSE (Plan MBSSE):** включает процессы, необходимые в качестве предварительных условий для моделирования.
- **Построения моделей (Build Models):** включает процессы создания и тестирования полезных моделей, а также преобразование их в общедоступную информацию и знания.
- **Выполнение MBSSE (Perform MBSSE):** включает процессы оценки и определения характеристик моделей, планирования и технического управления, а также действий по управлению ресурсами и знаниями.
- **Поддержка моделей (Support Models):** основное внимание уделяется техническим и инженерным аспектам управления данными для поддержки основных процессов MBSSE и традиционной инженерной деятельности.

Эталонная модель MBSSE показана на Рис. 2.

Стандарт дополнительно классифицирует эти четыре группы процессов на процессы, специфичные для MBSSE, и описывает каждый процесс в терминах. из следующих шести атрибутов:

- 1) название процесса,
- 2) цель процесса,
- 3) входные данные для получения результатов,
- 4) результаты процесса,
- 5) задачи для достижения результатов и
- 6) возможности метода и инструмента для выполнения задач.

Таким образом, ISO/IEC/IEEE 24641:2023 фокусируется на задачах, методах и инструментах с точки зрения этих групп процессов и специфичных для MBSSE процессов, определенных в эталонной модели.

Эталонная модель MBSSE касается созданных человеком систем, состоящих из одного или нескольких следующих системных элементов: аппаратного обеспечения, программного обеспечения, данных, людей, услуг для пользователей, процедур, средств, материалов и природных объектов.

MBSSE Reference model

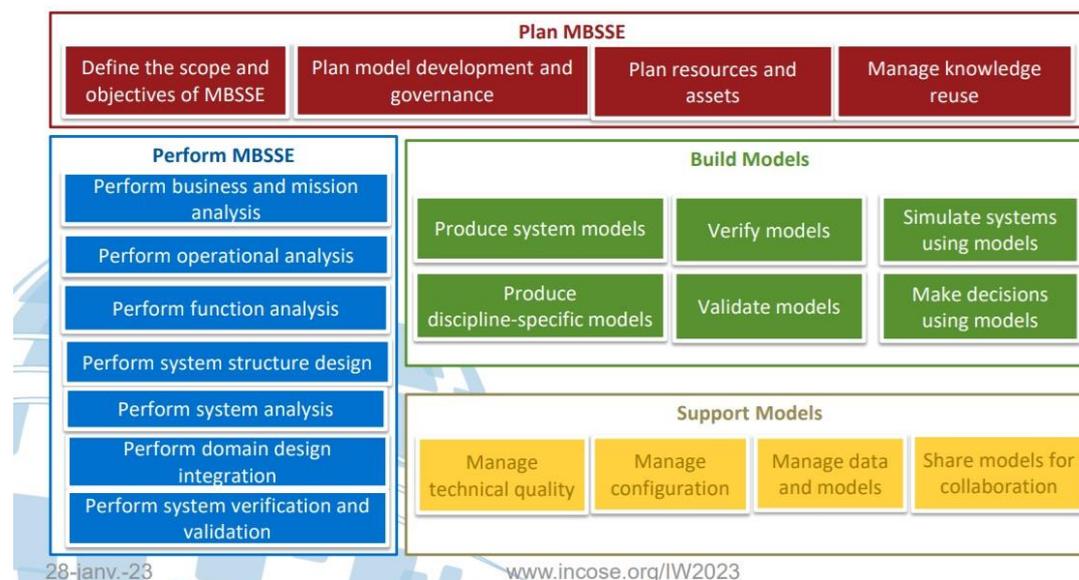


Рисунок 2. Эталонная модель MBSSE ISO/IEC/IEEE 24641 [2] https://www.omgwiki.org/MBSE/lib/exe/fetch.php?media=mbse:incose_mbse_iw_2023:3.3.2023-01-28.iw2023_mbse_workshop_standards_iso_iec_ieee_24641_v2.pdf].

В рамках введенной эталонной модели определяются специфические для MBSSE процессы разработки на основе моделей систем и программного обеспечения, методы для поддержки определенных задач каждого процесса, специфичного для MBSSE.

Процессы, определенные в ISO/IEC/IEEE 24641:2023, применимы для отдельного проекта, а также для организации, выполняющей несколько проектов, или предприятия. Они также применимы для управления и выполнения действий по разработке систем и программного обеспечения на основе моделей на любом этапе жизненного цикла интересующей системы.

Группа процессов «План MBSSE» (“Plan MBSSE”) определяет процессы, необходимые в качестве предварительных условий для моделирования. Любое развертывание MBSSE должно пройти через эти процессы. Процессы группы «План MBSSE» выполняются в начале жизненного цикла моделирования систем и программного обеспечения, в частности, с помощью их определяются объем моделирования и цели для заачи разработки систем и

программного обеспечения. Эта группа процессов идентифицирует процессы, предназначенные для организации разработки модели, которые могут считаться необходимыми для каждого конкретного проекта моделирования (например, планирование разработки модели и управления ею или планирование ресурсов и активов).

Процессы группы «Построение моделей» («Build Models») представляют собой базовые процессы моделирования, т.е. создания полезных моделей, и обеспечивают согласованность в репозитории моделей. Процессы группы «Выполнение MBSSE» («Perform MBSSE»), включенные в план управления MBSSE, должны определять задачи системного проектирования (SE), выявленные в ходе процессов «Планирования MBSSE». Эти процессы определяют, какие модели должны быть созданы, они используют процессы, описанные в трех основных группах процессов.

Процессы группы «Поддержка моделей» («Support Models») касаются технических аспектов и выполняются в течение всего жизненного цикла. На Рис.3 показана связь процессов внутри эталонной модели.

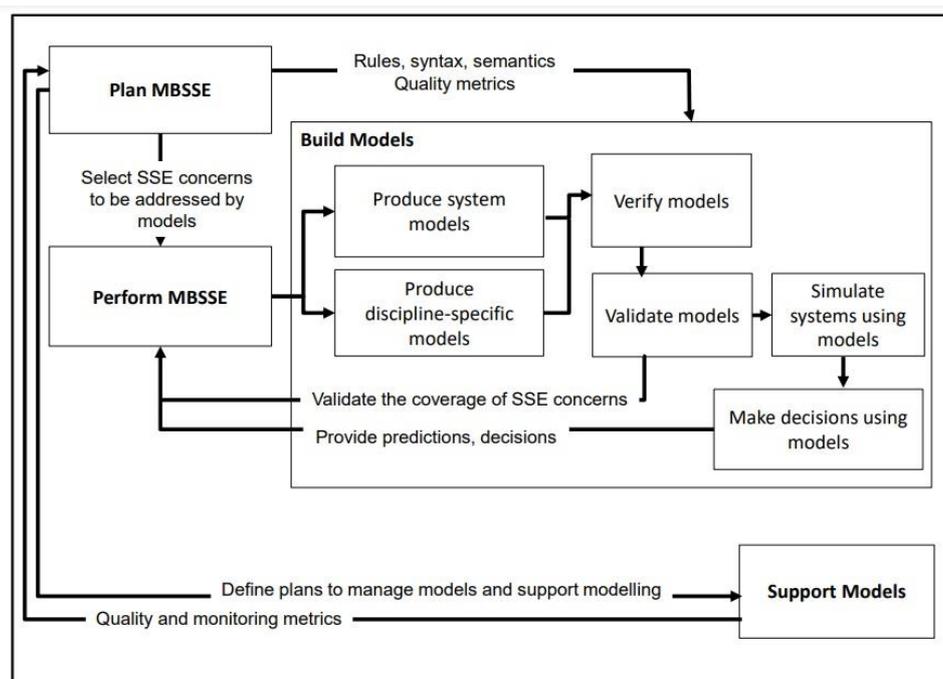


Рисунок 3. Отношения между группами процессов MBSSE и процессами группы Построения моделей [13].

Рассмотрим указанные группы процессов подробнее.

IV ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛИ

Приведем сокращенное описание определенных специфических для подхода MBSSE процессов, разделенных по группам процессов верхнего уровня классификации, а именно:

- **Планирование MBSSE** (Plan MBSSE)
- **Построения моделей** (Build Models)
- **Выполнение MBSSE** (Perform MBSSE)
- **Поддержка моделей** (Support Models)

4.1 Процессы группы «План MBSSE»

Группа процессов «План MBSSE» собирает необходимые предпосылки для реализации MBSSE, способствуя повышению эффективности и результативности подхода как внутри проекта, так и на уровне предприятия. Эта группы процессов осуществляет оценку и определение объема

моделирования, планирование и технический менеджмент (установку подхода MBSSE), а также деятельность по управлению ресурсами, данными и знаниями (для среднесрочной и долгосрочной перспективы). При этом план управления MBSSE может быть включен в общий план управления системной инженерией вместо создания отдельного плана управления MBSSE. Группа «План MBSSE» включает следующие процессы:

- Определите объем и цели MBSSE
- Планирование разработки модели и управления ею
- Планировать ресурсы и активы
- Управление повторным использованием знаний

В Таблице 1 представлены цели процессов группы.

Таблица I Процессы группы «План MBSSE» и их цели

Имена процессов	Цели/назначение
Define the scope and objectives of MBSSE (Определите объем и цели MBSSE)	Процесс определяет объем и цели MBSSE и, как ожидается, увеличит добавленную стоимость от реализации MBSSE. Задачи, включенные в этот процесс, определяют задачи разработки системы или программного обеспечения, которые необходимо решить, а также глубину и широту создаваемых моделей.
Plan model development and governance (Планируйте разработку модели и управление ею)	Целью процесса является разработка стратегии модели MBSSE, графиков и процедур для: построения модели, проверки модели, использования модели, снижения рисков MBSSE, отслеживания преимуществ MBSSE и управления MBSSE для достижения намеченных преимуществ. Стратегия модели определяет потребность в моделировании в соответствии с определенными инженерными целями: какие модели, уровни модели, точки зрения, взаимодействия моделей кому необходимы.

Plan resources and assets (Планируйте ресурсы и активы)	Целью процесса является планирование ресурсов и активов, включая необходимые цепочки инструментов и инфраструктуру, для эффективного и результативного выполнения MBSSE.
Manage knowledge reuse (Управляйте повторным использованием знаний)	Цель процесса — подготовить и помочь оптимизировать усилия по моделированию путем повторного использования существующих моделей и эталонных архитектур. Он целелеполагает создавать модели, которые можно использовать повторно, как и повторно использовать знания о моделях: метамоделях, шаблонах, самих моделях, методах и инструментах моделирования.

4.2 Процессы группы «Построения моделей» и информационная база DIKW (данные-информация-знание-мудрость)

Основная цель процессов этой группы — эффективное и совместное построение полезных моделей. Ядро деятельности по моделированию может быть рассмотрено через призму пирамиды «Данные-Информация-Знания-Мудрость» (data information knowledge wisdom - DIKW):

- Создание моделей делает данные системного проектирования полезными, преобразуя их в совместно используемую информацию и знания
- Проверка и валидация моделей повышает уверенность и точность полученных знаний
- Анализ и моделирование систем с использованием моделей позволяет правильно предсказывать будущее, не только обнаруживая и понимая закономерности, но и глубоко понимая «почему», стоящее за этими закономерностями.

Взаимосвязь между процессами построения моделей и пирамидой «Данные-Информация-Знания-Мудрость» представлена на рисунке 4.



Рисунок 4 — Процессы построения моделей и пирамида «Данные-Информация-Знания-Мудрость» (DIKW).

Целью этой группы процессов является создание системных моделей. Под системной моделью понимается модель, нацеленная на системные свойства

(или характеристики) интересующего объекта. Системные модели могут включать в себя комбинацию геометрических, аналитических и логических моделей. Системная модель должна обеспечивать представление концепций системного моделирования общего назначения, таких как поведение и структура, которые могут использоваться в разных областях моделирования. Некоторые примеры системных моделей могут включать такие модели (из ISO/IEC/IEEE 15288) как: функциональная модель, отражающая функции системы и их функциональные интерфейсы; поведенческая модель, отражающая общее поведение функций системы; временная модель, отражающая аспекты архитектуры, связанные с синхронизацией; структурная модель, отражающая элементы системы и их физические интерфейсы; массовая модель, отражающая аспекты системы, связанные с массой; — модель компоновки, которая фиксирует абсолютное и относительное пространственное расположение элементов системы; сетевая модель, которая фиксирует поток ресурсов между применимыми функциями или элементами системы. Основное использование системной модели — обеспечить возможность проектирования системы, которая удовлетворяет ее требованиям и поддерживает распределение требований к компонентам системы (аппаратному или программному обеспечению). Системная модель идентифицирует компоненты на определенном уровне абстракции как черные ящики и рассматривает их интерфейсы, поведение, характеристики и качества, но не моделирует их внутреннюю структуру.

Группа «Build Models» включает следующие процессы:

- Создайте модели системы
- Проверьте модели
- Симулируйте системы с помощью моделей
- Создайте модели для специфических дисциплин
- Испытайте модели
- Принимайте решения, используя модели

В Таблице 2 представлены цели процессов группы.

Таблица II Процессы группы «Build Models» и их цели

Имена процессов	Цели/назначение
Produce system models (Создайте модели системы)	Целью процесса является создание системных моделей. объекта. Системные модели могут включать в себя комбинацию геометрических, количественных и логических моделей. Основное использование системной модели — обеспечить возможность проектирования системы, которая удовлетворяет ее требованиям и поддерживает распределение требований к компонентам системы (аппаратному или программному обеспечению).
Verify models (Проверьте модели)	Цель процесса — определить, как обеспечить соответствие моделей целям и требованиям модели, которые отражают потребности заинтересованных сторон и соответствуют соглашениям, описанным в руководствах по моделированию. Этот процесс использует автоматическую проверку, обзоры соответствующих заинтересованных сторон или и то, и другое.
Simulate systems using models (Симулируйте системы с помощью моделей)	Целью процесса является поддержка различных этапов MBSSE посредством создания информации и данных, представляющих разрабатываемую систему для того, чтобы проанализировать ее с разных точек зрения и поддержать обсуждение. на решениях об альтернативах или уточнениях параметров. Этот процесс участвует в проверке системы. Основная цель моделирования — получить представление о системе без манипулирования реальной системой либо потому, что она еще не определена или недоступна, либо потому, что ее нельзя выполнить напрямую из-за ограничений по стоимости, времени, ресурсам или рискам.
Produce discipline-specific models (Создайте модели для специфических дисциплин)	Целью процесса является разработка моделей для специфических дисциплин, таких как модели безопасности, механические, тепловые и программные модели, каждая из которых учитывает конкретные инженерные ограничения и проблемы
Validate models (Испытайте модели)	Цель процесса — получение свидетельств гарантии того, что модели отвечают потребностям, соответствующим заинтересованным сторонам
Make decisions using models (Принимайте решения, используя модели)	Целью процесса является обогащение результатов модели, принятие решений об альтернативах и уточнение параметров с использованием результатов моделирования. Этот процесс поддерживается анализом компромиссов для изучения жизнеспособных альтернатив и определения того, какой из них предпочтительнее. Важно, чтобы были установлены критерии и согласован подход к измерению альтернатив по критериям.

4.4 Процессы группы Perform MBSSE

Процесс «Perform MBSSE» описывает, как выполнять действия по разработке систем и программного обеспечения на основе моделей с использованием моделей. Процессы выполнения MBSSE зависят от целей MBSSE и контекста. Процессы выполнения MBSSE определяются, управляются, контролируются и поддерживаются процессами, определенными в трех других основных группах процессов. Благодаря моделям интересующую систему или программное обеспечение можно анализировать на протяжении всего жизненного цикла; модель может быть реализована (для поддержания целостности или последовательности) для раннего обнаружения ошибок, достижения понимания и проверки концепций. Настоящий стандарт применяется «как есть» (as-is) к техническому менеджменту и техническим процессам ISO/IEC/IEEE 15288 (по сути

зеркально). Не все процессы используются при моделировании данной системы или программного обеспечения. Процессы, которые необходимо выполнить, выявляются во время определения объема и планирования MBSSE.

В группу Perform MBSSE входят следующие процессы:

- — Проведите анализа бизнеса и миссии;
- — Проведите оперативный анализ;
- — Проведите функциональный анализ;
- — выполнить проектирование структуры системы;
- — Проведите системный анализ;
- — Проведите интеграцию дизайна предметной области;
- — Проведите проверки и валидации системы.

В Таблице 3 представлены цели процессов группы.

Таблица III Процессы группы «Perform MBSSE» и их цели

Имена процессов	Цели/назначение
Perform business and mission analysis (Проведите анализ бизнеса и миссии)	Целью процесса является создание модели архитектуры предприятия. Предприятием может управлять одна или несколько организаций, а заинтересованные стороны могут принадлежать нескольким организациям. Анализ бизнеса помогает выявить возможности. Анализ миссии предприятия позволяет моделировать цели предприятия, определять критерии успеха миссии, моделировать среду миссии, определять необходимые возможности, организационные структуры и обзор решения.
Perform operational analysis (Проведите операционный анализ)	Целью процесса является определение концепции эксплуатации (OpsCon). Заинтересованные стороны и их потребности различаются в зависимости от контекста системы, который в свою очередь зависит от стадии жизненного цикла системы. Модели помогают достичь общего понимания между заинтересованными сторонами и формализовать потребности в требованиях заинтересованных сторон.
Perform function analysis (Выполните функциональный анализ)	Целью процесса является определение решения или системы с точки зрения их функций, дисфункций и характеристик. Модель обеспечивает основу для определения требований и проверки. Модели функционального потока используются для формирования системных требований и методов проверки. Это одна из ключевых областей, в которой выполняется большая часть моделирования.
Perform system structure design (Выполните проектирование структуры системы)	Целью процесса является структурирование решения или системы путем группировки ее функций. Он включает в себя проектирование интерфейсов, физических структур. Он предоставляет данные для специального инженерного анализа. Этот процесс применяется рекурсивно на уровне элементов, поскольку элементы также считаются системами.
Perform system analysis (Выполните системный анализ)	Целью процесса является системный анализ как анализ безопасности, отказоустойчивости, надежности и защищенности. Он также учитывает моделирование, которое помогает проанализировать функции или дисфункции системы на этапах проектирования и эксплуатации и получить ценную информацию.
Perform domain design integration (Выполните интеграцию дизайна домена)	Целью процесса является создание моделей проектирования системы и программного обеспечения, моделей анализа, а также обеспечение интеграции моделей друг с другом. Он определяет, как системные требования достигаются посредством комбинации элементов (подсистем программного обеспечения, физических продуктов или средств обеспечения эксплуатации) для обеспечения требуемых функций системы. В ходе определения и анализа проекта определяются характеристики элементов или изделий и, таким образом, посредством понимания их назначения определяются требования к элементам или изделиям.
Perform system verification and validation (Выполните проверку и валидацию системы)	Целью процесса является определение действий для демонстрации того, что на основе моделей система или элемент системы удовлетворяет своим требованиям и характеристикам, отвечают потребностям, выраженным заинтересованными сторонами, и выполняют свое предполагаемое назначение в предполагаемой эксплуатационной среде.

4.5 Процессы группы Support Models

Эти процессы поддерживают все основные процессы MBSSE. Они сосредоточены на технических и инженерных аспектах управления данными, с их помощью описаны соответствующие инструменты и

методы, определены, какие конкретные подходы MBSSE следует использовать в дополнение к традиционной инженерной деятельности (например, Управление изменениями, Управление данными и т. д.):

В группу «Support Models» входят следующие процессы:

- Управляйте техническим качеством;
 - Управляйте конфигурацией;
 - Управляйте данными и моделями;
 - Делитесь моделями для сотрудничества.
- В Таблице 4 представлены цели процессов группы.

Таблица IV Процессы группы «Support Models» и их цели

Имена процессов	Цели/назначение
Manage technical quality (Управляйте техническим качеством)	Цель процесса — определить, как управлять качеством модели и оценивать его, особенно путем мониторинга и контроля в соответствии с планами, а также как улучшить качество системы с помощью MBSSE. Это помогает гарантировать, что процессы разработки и артефакты MBSSE соответствуют планам и заранее определенным требованиям к качеству организации.
Manage configuration (Управляйте конфигурацией)	Цель этого процесса — описать, как выполнять управление конфигурацией (СМ) моделей и использовать данные модели для улучшения СМ для интересующей системы или программного обеспечения. Элементы конфигурации модели (МСИ) управляются для поддержания целостности моделей. Помощь СМ гарантирует, что изменения в базовой модели и подтверждающих ее доказательствах происходят управляемым, контролируемым и проверяемым образом. СМ для MBSSE рассматривает (основные) активы моделирования как варианты, обусловленные, например, компромиссами и решениями. Кроме того, конфигурациями, связанными с развитием ресурсов моделирования, необходимо управлять как во времени, так и в пространстве.
Manage data and models (Управляйте данными и моделями)	Цель процесса – управление данными и моделями, включая: <ul style="list-style-type: none"> — Планирование базовых линий проектирования: базовые линии конфигурации должны быть определены с учетом их цели и ожидаемого содержания рабочего продукта во время разработки проекта. Сюда входят модели, которые предстоит разработать, и оценка их зрелости. Поскольку оценка зрелости модели может быть в значительной степени автоматизирована, базовая зрелость также может быть в значительной степени автоматизирована, что позволяет оценивать ход работы в режиме реального времени; — Управление изменениями. Следует уделять большое внимание взаимозависимости моделей. Изменение модели может повлиять на другую модель. Хотя это можно отследить, не все наборы инструментов могут предоставлять соответствующие функции управления зависимостями; — Анализ запросов на изменение должен широко использовать модели и симуляции, чтобы, например, гарантировать, что выполнение требований заинтересованных сторон не будет затронуто.
Share models for collaboration (Делитесь моделями для совместной работы)	Цель процесса — определить, как одновременно работать над системой или моделью программного обеспечения в распределенной среде и как обмениваться моделями. Проблемы совместного моделирования многомерны, поскольку модель системы обогащается различными типами моделей, разрабатываемыми разными пользователями, которые часто географически распределены. Модели обновляются разными пользователями в разное время. Разработчики моделей могут использовать разные инструменты, и версия инструмента также может меняться со временем. При выполнении совместного моделирования следует учитывать важные аспекты, включая безопасность, целостность данных, авторские права, права интеллектуальной собственности (IPR) и т. д.

V ВЗАИМОСВЯЗЬ ISO/IEC/IEEE 24641 С ГЛАВНЫМИ МЕЖДУНАРОДНЫМИ СТАНДАРТАМИ

С момента ввода в действия ISO/IEC/IEEE 24641, в котором описана эталонная модель MBSSE для

разработки систем и программного обеспечения на основе модельно-ориентированного подхода, ландшафт основных методологических международных стандартов системной инженерии изменился и принял вид, который можно изобразить с помощью Рис. 5.

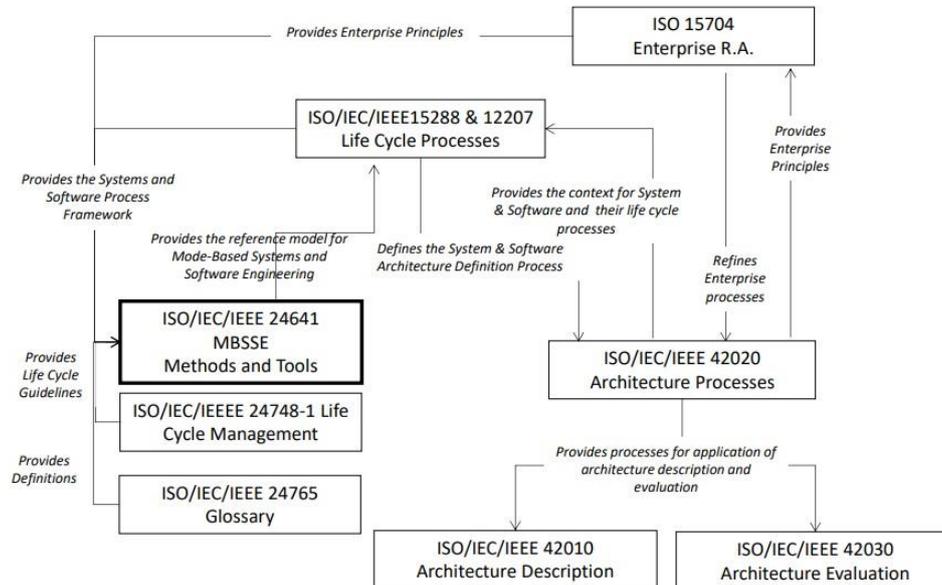


Рисунок 5. Взаимосвязь ISO/IEC/IEEE 24641 с главными международными стандартами системной инженерии [13].

В тексте ISO/IEC/IEEE 24641 указывается, что стандарт можно использовать независимо или в сочетании с существующими стандартами, такими как ISO/IEC/IEEE 15288, ISO/IEC/IEE 12207, ISO/PAS 19450 и другими. При этом вопрос отображения специфических для MBSSE процессов, описанных в стандарте ISO/IEC/IEEE 24641, в процессы и активности ISO 15288 остается открытым.

В свою очередь, в новой версии стандарта ISO 15288 [11] приводится комментарий о том, что процессы жизненного цикла систем, описанные в ISO 15288, часто применяются с использованием подхода MBSE, который использует набор моделей для реализации процессов и достижения ожидаемых результатов. А вся информация в ISO 15288 о MBSE включена в Приложение D. В самом Приложении D отмечается [11], что «в рассмотренном выше стандарте ISO 15288 представлен полный набор процессов, на основе которых организация может разработать решения жизненного цикла системы, включая модели, соответствующие ее продуктам, а также разработать структуру для разработки, оценки, поддержки и улучшения процессов жизненного цикла. Однако выполнение этих процессов жизненного цикла можно значительно облегчить за счет внедрения подхода MBSE. И далее отмечается ряд достоинств подхода MBSE. Внедрение MBSSE значительно облегчит выполнение процессов жизненного цикла, описанных в ISO/IEC/IEEE 15288 и ISO/IEC/IEEE 12207, благодаря моделям как новым рабочим средам и эволюции моделей как единственного источника истины и основной источник знаний об

интересующей системе и процессах ее жизненного цикла.

Однако эталонные модели процессов, определенные в этих двух стандартах, не обеспечивают достаточной поддержки MBSSE. Описания «Процесса управления информацией» в группе «Процессов технического управления» и «Процесса управления знаниями» в группе «Процессов организационного управления проектами» являются слишком общими. Более того, определение понятия «модель жизненного цикла» в ISO/IEC/IEEE 24748-1 касается только двух измерений интересующей системы, а именно стадий развития интересующей системы и структуры процессов и деятельности, не учитываются также аспекты эволюции моделей и организационного знания. Таким образом, для поддержки MBSSE необходима многомерная эталонная структура (фреймворк). Из этого следует, что вопросы погружения процессов MBSSE (стандарта ISO/IEC/IEEE 24641) в традиционные процессные модели (ISO/IEC/IEEE 15288 и ISO/IEC/IEEE 12207) представляет собой нетривиальную актуальную научно-методическую проблему, которая ждет своих исследователей.

VI ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрено основное содержание нового стандарта ISO/IEC/IEEE 24641:2023, который определяет эталонную модель MBSSE (Model-based systems and software engineering) и набор специфических для данного подхода процессов жизненного цикла системы, а также их взаимосвязь с поддерживающей эталонной моделью, предназначенной для разработки систем и программного обеспечения с использованием

подхода, основанного на моделях. В статье рассмотрена взаимосвязь ISO/IEC/IEEE 24641 с главными международными стандартами системной инженерии. Основной вывод состоит в том, что вопросы погружения специфических процессов MBSSE (стандарта ISO/IEC/IEEE 24641) в традиционные процессные модели (ISO/IEC/IEEE 15288 и ISO/IEC/IEEE 12207) представляет собой актуальную научно-методическую проблему.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] "Systems engineering vision 2020", Proc. Int. Council Syst. Eng. (INCOSE), Sep. 2007.
- [2] Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK), version 2.7. 2022.
- [3] Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities, Fourth Edition, INCOSE, 2015.
- [4] A. W. Wymore, Model-Based Systems Engineering, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1993.
- [5] E. Ahmad, "Model-Based System Engineering of the Internet of Things: A Bibliometric Literature Analysis," in IEEE Access, vol. 11, pp. 50642-50658, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3277429. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10128114>
- [6] P. Beery and E. Paulo, "Application of model-based systems engineering concepts to support mission engineering", Systems, vol. 7, no. 3, pp. 44, Sep. 2019, [online] Available: <https://www.mdpi.com/2079-8954/7/3/44>.
- [7] C. Neureiter and C. Binder, "A domain-specific model based systems engineering approach for cyber-physical systems", Systems, vol. 10, no. 2, pp. 42, Mar. 2022, [online] Available: <https://www.mdpi.com/2079-8954/10/2/42>.
- [8] E. Ahmad, B. R. Larson, S. C. Barrett, N. Zhan and Y. Dong, "Hybrid annex: An AADL extension for continuous behavior and cyber-physical interaction modeling", Proc. ACM SIGAda Annu. Conf. High Integrity Lang. Technol., pp. 29-38, Oct. 2014.
- [9] P. Acheson, C. Dagli and N. Kilicay-Ergin, "Model based systems engineering for system of systems using agent-based modeling", Proc. Comput. Sci., vol. 16, pp. 11-19, 2013, [online] Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050913000033>.
- [10] A. Madni, C. Madni and S. Lucero, "Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering", Systems, vol. 7, no. 1, pp. 7, Jan. 2019, [online] Available: <https://www.mdpi.com/2079-8954/7/1/7>.
- [11] ISO/IEC/IEEE FDIS 15288:2023. Systems and software engineering — System life cycle processes
- [12] ISO/IEC/IEEE 12207. Systems and software engineering. Software life cycle processes
- [13] ISO/IEC/IEEE FDIS 24641:2022(E). Systems and software engineering — Methods and tools for model-based systems and software engineering

Model-based systems and software engineering (MBSSE) reference model and its relationship to systems engineering process standards

V.A. Sukhomlin, D.A. Gapanovich

Abstract— Model-Based System Engineering (MBSE) is a formalized application for supporting systems engineering throughout the life cycle of systems of interest (SoI). The MBSE approach is formed into a holistic methodology aimed at the aggressive application of methods and tools for definition, analysis and evolution models throughout the entire life cycle of the system, which ensures increased levels of manufacturability in the implementation of the definition stages and the definition system, increasing the efficiency and quality of life system cycle management process, including the operation and maintenance phase. This is due to: the ability to apply analysis through development method analysis, model automation and validation, analytics support and multiple perspectives at every stage of the system life cycle. And most importantly, this approach provides the ability to reuse the model repository of one project in other projects. In recent years, various engineering fields have successfully used the MBSE approach to develop complex systems; for example, in the field of Internet of Things, mission engineering, cyber-physical systems (CPS), system systems (SoS), digital twins, etc. However, despite many years of successful experience in applying MBSE based on fundamental international-level methodological standards for compliance with MBSE similar Systems engineering standards ISO/IEC/IEEE 15288 and ISO/IEC/IEEE 12207 did not exist until recently. New standard ISO/IEC/IEEE 24641:2023 - Systems and software engineering. Methods and tools for model-based system and software technology is one of the first standards that can claim this role. The article is devoted to a description of the main provisions of this standard, as well as consideration of its relationship with other systems engineering standards.

Keywords— Model-Based Systems Engineering (MBSE), system life cycle management process, MBSSE, ISO/IEC/IEEE 24641:2023,

ISO/IEC/IEEE 15288, ISO/IEC/IEEE 12207, modeling methods and tools

REFERENCES

- [1] "Systems engineering vision 2020", Proc. Int. Council Syst. Eng. (INCOSE), Sep. 2007.
- [2] Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK), version 2.7. 2022.
- [3] Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities, Fourth Edition, INCOSE, 2015.
- [4] A. W. Wymore, Model-Based Systems Engineering, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1993.
- [5] E. Ahmad, "Model-Based System Engineering of the Internet of Things: A Bibliometric Literature Analysis," in IEEE Access, vol. 11, pp. 50642-50658, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3277429. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10128114>
- [6] P. Beery and E. Paulo, "Application of model-based systems engineering concepts to support mission engineering", Systems, vol. 7, no. 3, pp. 44, Sep. 2019, [online] Available: <https://www.mdpi.com/2079-8954/7/3/44>.
- [7] C. Neureiter and C. Binder, "A domain-specific model based systems engineering approach for cyber-physical systems", Systems, vol. 10, no. 2, pp. 42, Mar. 2022, [online] Available: <https://www.mdpi.com/2079-8954/10/2/42>.
- [8] E. Ahmad, B. R. Larson, S. C. Barrett, N. Zhan and Y. Dong, "Hybrid annex: An AADL extension for continuous behavior and cyber-physical interaction modeling", Proc. ACM SIGAda Annu. Conf. High Integrity Lang. Technol., pp. 29-38, Oct. 2014.
- [9] P. Acheson, C. Dagli and N. Kilicay-Ergin, "Model based systems engineering for system of systems using agent-based modeling", Proc. Comput. Sci., vol. 16, pp. 11-19, 2013, [online] Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050913000033>.
- [10] A. Madni, C. Madni and S. Lucero, "Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering", Systems, vol. 7, no. 1, pp. 7, Jan. 2019, [online] Available: <https://www.mdpi.com/2079-8954/7/1/7>.
- [11] ISO/IEC/IEEE FDIS 15288:2023. Systems and software engineering — System life cycle processes
- [12] ISO/IEC/IEEE 12207. Systems and software engineering. Software life cycle processes
- [13] ISO/IEC/IEEE FDIS 24641:2022(E). Systems and software engineering – Methods and tools for model-based systems and software engineering