

ЭТАЛОННАЯ МОДЕЛЬ МОДЕЛЕ-ОРИЕНТИРОВАННОЙ СИСТЕМНОЙ ИНЖЕНЕРИИ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ РАЗРАБОТКИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Батоврин В.К.,

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

batovrin@mirea.ru

Данилов Е.В., Логвин Ю.С., Семин В.В.

ПАО «Яковлев», Москва, Россия

vladislav.semin@yakovlev.ru

Аннотация. Представлена эталонная модель модели-ориентированной системной инженерии для процессов разработки воздушных судов. В основе модели положения и рекомендации стандарта ISO/IEC/IEEE 24641 и руководства по разработке авиационных систем Р 4754А. Модель учитывает также положения системной инженерии по реализации процессов архитектуры и жизненного цикла систем.

Ключевые слова: модели-ориентированная системная инженерия (MBSE), эталонная модель, разработка воздушных судов, процесс оценки безопасности.

Введение

Одним из ключевых вызовов, стоящих перед российской авиационной промышленностью, является невысокая эффективность существующих процессов в авиастроительной отрасли, обусловленная, в частности, недостаточным уровнем внедрения цифрового производства [1]. Важнейшим элементом цифрового производства являются цифровые технологии, включая технологии цифрового проектирования, моделирования и управления жизненным циклом (ЖЦ) продуктов и/или услуг. Поэтому в отечественном авиастроении в контексте преодоления указанного вызова особую значимость имеет проект «Внедрение единой информационной среды для управления процессами разработки изделий авиационной техники на основе подходов и методов системной инженерии и управления их жизненным циклом» [2].

Сложившиеся сегодня подходы и методы системной инженерии ориентированы на формирование целостной совокупности взаимодействующих между собой процессов ЖЦ инженерной системы, эту совокупность процессов принято называть процессом (методом) системной инженерии [3]. Например, в авиастроении подобный процесс системной инженерии описан в Руководстве Р 4754А и в стандарте ARP 4754В [4]. В свою очередь, по мере расширения масштабов и сложности инженерных систем специалисты при налаживании процессов системной инженерии и в ходе их адаптации к конкретным условиям все шире используют технологии цифрового моделирования. Эти технологии позволяют создать комплексный, хорошо формализованный, целостный набор развивающихся цифровых моделей с целью использования этого набора в качестве основного источника знаний о целевой инженерной системе и процессах ее ЖЦ взамен традиционно принятых проектных документов. Такой подход стал известен как модели-ориентированная системная инженерия (англ. model-based systems engineering (MBSE) [5, 6], сегодня он все шире применяется при создании гражданских воздушных судов [7, 8]. Как в России, так и за рубежом подход MBSE находится в стадии становления. Таким образом, существует необходимость в определении факторов, обуславливающих возможность результативного использования MBSE в инженерных проектах, в частности, при планировании, реализации, поддержке и управлении процессами в ходе разработки воздушных судов.

Традиционное инженерное дело сориентировано на взаимодействие с физической реальностью, с другой стороны, цифровое моделирование ориентировано на виртуальный мир. В этих условиях успешная MBSE видится в интеграции двух подходов, т.е. в гармоничном сочетании инженерной деятельности, осуществляемой как в реальном, так и в виртуальном мирах. Это потребует согласования практик, методов и средств, опыта и знаний, накопленных в сфере планирования, реализации, поддержки и управления процессом системной инженерии с одной стороны и процессами компьютерного моделирования – с другой. Подобная ситуация ранее встречалась в практике системной инженерии и управления программой/ проектами. В результате была предложена рамочная платформа или эталонная модель, охватывающая основные аспекты интеграции управления программой/ проектами и системной инженерии, а также важнейшие отношения между этими аспектами [9].

Начало работ по интеграции ориентированных на физическую реальность процессов системной инженерии и ориентированных на виртуальный мир процессов цифрового моделирования было

недавно поддержано выходом международного стандарта ISO/IEC/IEEE 24641. В этом документе рассматриваются методы и средства MBSE и определена эталонная модель, охватывающая характерные для MBSE процессы [10]. В настоящем докладе рассмотрены возможные подходы к адаптации стандартной эталонной модели MBSE к условиям и типовым процессам разработки гражданских воздушных судов.

1. Моделе-ориентированная системная инженерия

Официальный международный стандарт ISO/IEC/IEEE 24641 определяет моделе-ориентированную системную инженерию как формализованное применение моделирования в целях поддержки системной инженерии [10]. Согласно рекомендациям Международного совета по системной инженерии (INCOSSE) MBSE сосредотачивается главным образом на поддержке инженерии требований, проектирования, системного анализа, верификации и валидации, а процессы MBSE начинаются со стадии концептуального проектирования и продолжаются в ходе технического проектирования системы и последующих, более поздних, стадий ЖЦ [11]. Важнейшие задачи MBSE состоят в *преодолении трудностей*, обусловленных сложностью создаваемых инженерных систем, в *поддержании связности и непротиворечивости* принимаемых инженерных решений, а также в *содействии обеспечению прослеживаемости* этих решений на протяжении полного ЖЦ.

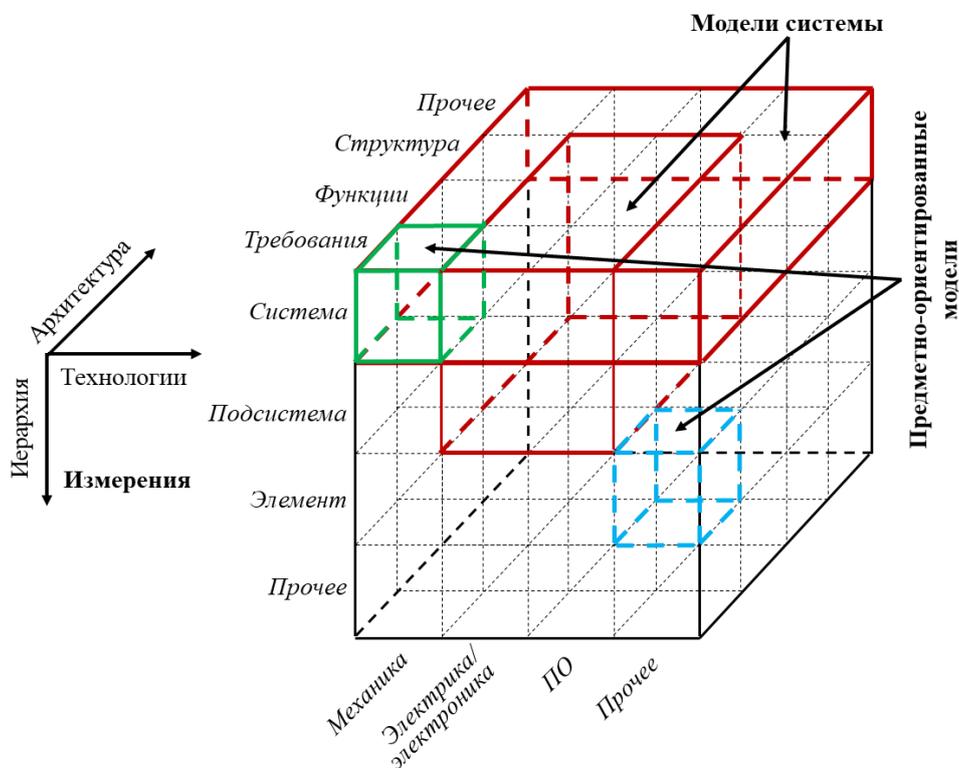


Рис. 1. Модели системы и предметно-ориентированные модели

При использовании MBSE предполагается, что модель системы может охватывать любые сущности, например, продукцию, услугу, программу/ проект или компанию в целом. Важно подчеркнуть, что MBSE существенно отличается от «проектирования с использованием моделей» («engineering with models»), которое на протяжении десятилетий практиковалось различными инженерными дисциплинами. Проектирование с использованием моделей сфокусировано главным образом на независимых, обособленных, предметно-ориентированных моделях, специфичных для определенной предметной области. К предметно-ориентированным моделям можно отнести, например, модели, которые используются системами автоматизированного проектирования (САПР) в машиностроении, модели аэродинамических процессов, модели контуров управления и другие. Подобные модели, могут иметь высокую ценность в рамках «своей» дисциплины, а также вносить полезный вклад в анализ системы в целом. Однако, они не способны обеспечить единого представления об архитектуре системы, представления, позволяющего сформировать цельное понимание архитектуры, пригодное для общего использования всеми заинтересованными сторонами (рис. 1).

Подход MBSE подразумевает формализованное применение моделирования в целях поддержки системной и программной инженерии на протяжении полного ЖЦ. Это предполагает, что моделирование должно затрагивать все аспекты и измерения, характеризующие целевую систему. В частности, модель должна отражать (см. рис. 1): (а) аспекты архитектуры системы в контексте инженерного проекта (измерение «требования-функции-структура-прочее»), (б) аспекты иерархичности системы (измерение «система-подсистема-элемент-прочее»), (в) аспекты технологий (измерение «механика-электрика/электроника-программное обеспечение (ПО)-прочее»). Для успешного формирования представительного, целостного семейства цифровых моделей процесс моделирования следует должным образом структурировать, этому способствует эталонная модель MBSE.

2. Эталонная модель MBSE

Для согласованного охвата всех аспектов и измерений, необходимых для обеспечения полноты семейства моделей, MBSE должна опираться на архитектурный подход [12]. Равным образом, для адекватного отражения архитектуры целевой системы совокупность компьютерных моделей, формируемая в рамках MBSE, должна отражать ключевые аспекты организованности системы, воплощенные в ее компонентах, связях этих компонентов друг с другом и с внешней средой, а также свойства целевой системы, проявляемые в окружающей ее среде, и руководящие принципы реализации и развития этой системы и связанных с ней процессов жизненного цикла [13, 14]. В свою очередь, эталонная модель MBSE должна давать представление об основных группах процессов MBSE и связях между ними [10]. В этих условиях эталонная модель MBSE, адаптированная к определенной предметной области, должна учитывать положения, зафиксированные в (а) стандартах архитектуры, (б) стандартах жизненного цикла, (в) стандарте ISO/IEC/IEEE 24641, (г) стандартах разработки систем, принятых в предметной области и (д) базовых стандартах системной и программной инженерии.

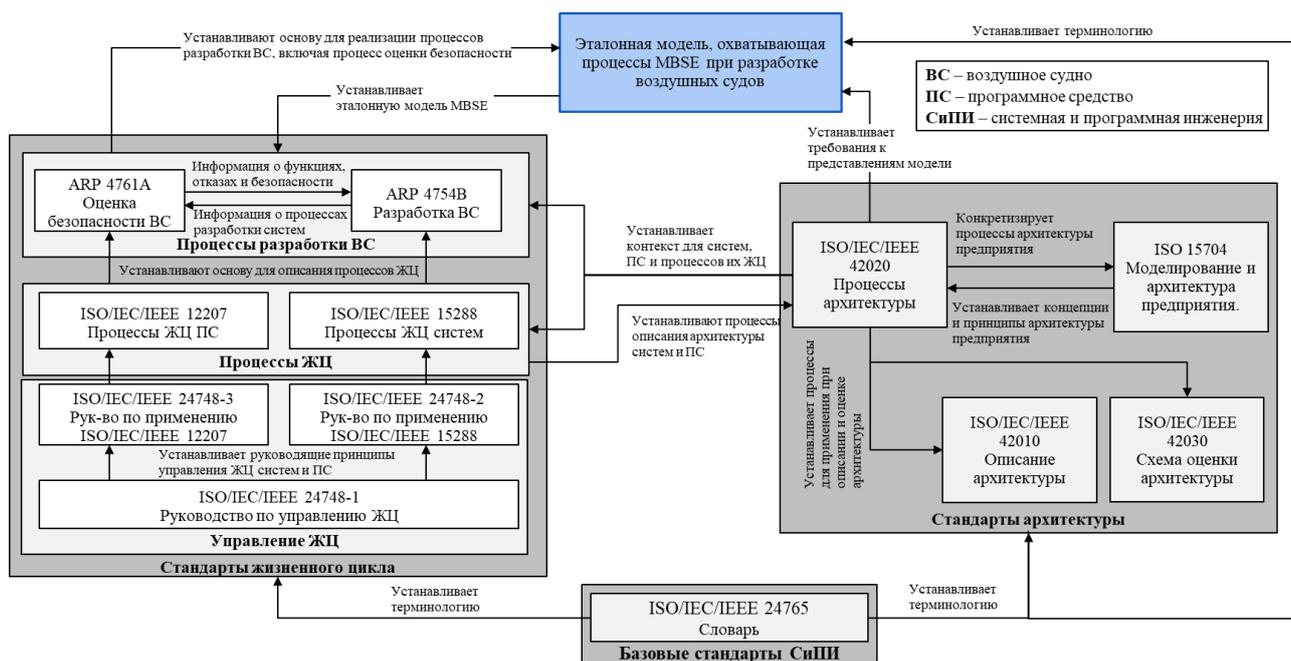


Рис. 2. Связь эталонной модели MBSE при разработке воздушных судов с важнейшими стандартами системной инженерии

На рис. 2 показана связь эталонной модели MBSE, ориентированной на использование в процессе разработки воздушных судов, с важнейшими стандартами системной инженерии, а также стандартами разработки воздушных судов. Для сведения в Таблице 1 дана краткая характеристика, нормативных документов, упомянутых на рис. 2.

Таблица 1. Базовые стандарты системной инженерии и разработки гражданских воздушных судов

Наименование	Характеристика
ISO/IEC/IEEE 24765:2017 Systems and software engineering. Vocabulary	Общий словарь терминов системной и программной инженерии.
ISO/IEC/IEEE 12207:2017 Systems and software engineering. Software life cycle processes // ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2010 ИТ. Системная и программная инженерия (СиПИ). Процессы ЖЦ программных средств	Устанавливает единую основу для описания процессов ЖЦ программных средств и четко определенную терминологию, на которую может ссылаться программная индустрия.
ISO/IEC/IEEE 15288:2023 Systems and software engineering. System life cycle processes // ГОСТ Р 57193-2016 СиПИ. Процессы ЖЦ систем	Устанавливает единую основу для описания процессов ЖЦ систем, созданных человеком, и с инженерной точки зрения определяет совокупность таких процессов и связанную с ними терминологию.
ISO/IEC/IEEE 24748-1:2024 Systems and software engineering. Life cycle management. Part 1: Guidelines for life cycle management // Национальный стандарт отсутствует	Содержит рекомендации по управлению ЖЦ систем и программного обеспечения, дополняющие сведения о процессах, описанных в ISO/IEC/IEEE 15288 и ISO/IEC/IEEE 12207.
ISO/IEC/IEEE 24748-2:2024 Systems and software engineering. Life cycle management. Part 2: Guidelines for the application of ISO/IEC/IEEE 15288 (system life cycle processes) // ГОСТ Р 57102-2016 ИТ. СиПИ. Управление ЖЦ. Часть 2. Руководство по применению ИСО/МЭК 15288	Содержит рекомендации по реализации единой основы для процессов ЖЦ систем, установленной в ISO/IEC/IEEE 15288:2023.
ISO/IEC/IEEE 24748-3:2020 Systems and software engineering. Life cycle management. Part 3: Guidelines for the application of ISO/IEC/IEEE 12207 (software life cycle processes) // ГОСТ Р 56923-2016 ИТ. СиПИ. Управление ЖЦ. Часть 3. Руководство по применению ИСО/МЭК 12207 (Процессы ЖЦ программных средств)	Содержит рекомендации по реализации единой основы для процессов ЖЦ программных средств, установленной в ISO/IEC/IEEE 12207:2017.
ISO/IEC/IEEE 42010:2022 Software, systems and enterprise. Architecture description // ГОСТ Р 57100-2016 СиПИ. Описание архитектуры	Устанавливает требования к структуре и выражению описания архитектуры для различных сущностей, включая ПО, системы, предприятия, системы систем, продукцию (товары или услуги), технологии и области бизнеса.
ISO/IEC/IEEE 42020:2019 Software, systems and enterprise. Architecture processes // Национальный стандарт отсутствует	Определяет совокупность описаний процессов для управления и руководства набором архитектур и разработки архитектуры объектов.
ISO/IEC/IEEE 42030:2019 Software, systems and enterprise. Architecture evaluation framework // Национальный стандарт отсутствует	Устанавливает способы и средства для организации оценки архитектуры и регистрации ее результатов применительно к предприятиям, системам и ПО.
ISO 15704 Enterprise modelling and architecture. Requirements for enterprise-referencing architectures and methodologies// ГОСТ Р ИСО 15704-2022 Моделирование и архитектура предприятия. Требования к стандартным архитектурам и методологиям предприятия	Устанавливает базу понятий и принципов для архитектуры предприятия, которая способствует развитию и интеграции предприятия, интероперабельности предприятий, пониманию сотрудниками предприятия проводимой работы и компьютерной обработке данных
SAE ARP4754B:2023 Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems // Руководство Р-4754А по разработке воздушных судов гражданской авиации и систем. Авиарегистр МАК, 2016.	Содержит рекомендации по разработке воздушных судов и их систем с учетом функций и условий эксплуатации воздушного судна
SAE ARP4761A:2023 Guidelines for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Aircraft, Systems, and Equipment // Руководство Р-4761 по методам оценки безопасности систем и бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации. Авиарегистр МАК, 2010.	Устанавливает руководящие принципы проведения процесса оценки безопасности гражданских воздушных судов, авиационных систем и бортового оборудования

С учетом рекомендаций ISO/IEC/IEEE 24641 предполагается, что эталонная модель для процессов разработки воздушных судов должна включать четыре группы процессов: (1) планирование MBSE, (2) реализация MBSE, (3) построение моделей и (4) поддержка моделей. Возможный вид эталонной модели MBSE при разработке воздушных судов, учитывающей положения ISO/IEC/IEEE 24641,

показан на рис. 3. Основное отличие от прототипа состоит в том, что процессы реализации MBSE дополнены процессом анализа безопасности, т.е. анализа состояния воздушного судна и/ или его систем, характеризующегося приемлемостью имеющихся рисков [4]. Отметим, что в соответствии с положениями Руководств Р-4754А и Р-4761 анализ безопасности в рамках MBSE должен предусматривать построение моделей функциональной опасности, моделей требований безопасности, а также выполнение анализа общих причин отказов, что может потребовать построения специального семейства моделей, позволяющих верифицировать выполнение требований физического и функционального разделения между системами воздушного судна.



Рис. 3. Возможный вид эталонной модели MBSE при разработке воздушных судов (с учетом положений ISO/IEC/IEEE24641 [10])

3. Заключение

В целях результативного использования модели-ориентированной системной инженерии в ходе разработки воздушных судов гражданской авиации и систем проектными организациями необходимо принять эталонную модель MBSE, адаптированную к особенностям предметной области. В работе выделены основные стандарты, которые, по мнению авторов, должны быть обязательно использованы в качестве взаимосогласованной основы при построении эталонной модели MBSE, адаптированной к процессам разработки воздушных судов. Предложен возможный вариант эталонной модели, отличающийся тем, что для оценки приемлемости имеющихся рисков процессы реализации MBSE дополнены процессом оценки безопасности, реализуемым с учетом рекомендаций Руководства по методам оценки безопасности [15].

Разработка эталонных моделей MBSE, адаптированных к условиям организаций и/ или программ/ проектов позволит ускорить и повысить результативность внедрения единой информационной среды для управления процессами разработки изделий авиационной техники на основе подходов и методов системной инженерии и управления их жизненным циклом.

Литература

1. О внесении изменений в государственную программу Российской Федерации «Развитие авиационной промышленности». Постановление Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2022, № 2114. Доступ из [Официального интернет-портала правовой информации](http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202211230007). URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202211230007> (дата обращения 27.05.2024).
2. ОАК активизирует внедрение отечественной PLM-платформы для проектирования авиационной техники. URL: <https://www.uacrussia.ru/ru/press-center/news/oak-aktiviziruet-vnedrenie-otechestvennoy-plm-platformy-dlya-proektirovaniya-aviatsionnoy-tehniki> (дата обращения 27.05.2024).

3. *Kossiakoff A., Seymour S. et al. Systems Engineering Principles and Practice. 3rd Edition. – Wiley, 2020. 688 p. // Косьяков А., Свит У. и др. Системная инженерия. Принципы и практика. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 636 с.*
4. *Руководство Р - 4754А по разработке воздушных судов гражданской авиации и систем. – Авиационный регистр МАК, 2016. – 131 с. // SAE ARP 4754В Aerospace recommended practice. Guidelines for development of civil aircraft and systems. – SAE, 2023. URL: <https://www.sae.org/standards/content/arp4754b/> (дата обращения 27.05.2024).*
5. *Tolk A., Barry P., Doskey S. Using modeling and simulation and artificial intelligence to improve complex adaptive systems engineering // Modeling and simulation based systems engineering. Theory and practice. Lin Zhang, Chun Zhao (eds.) - World Scientific Publishing, 2023. – pp. 7 – 28.*
6. *Estefan J., Weilkiens T. MBSE Methodologies // A. Madni et al. (eds.), Handbook of Model-Based Systems Engineering. – Springer, 2023. – pp. 47 – 86.*
7. *Model-Based Systems Engineering and Model-Based Safety Analysis: Final Report. - U.S. Department of Transportation: FAA, 2021. – 214 p.*
8. *Huang Xing, Yang Hong et al. An MBSE Framework for Civil Aircraft Airborne System Development // Complex Systems Design & Management. Proc. of the 4th International Conference on Complex Systems Design & Management Asia. – Springer, 2021. – pp. 147 – 158.*
9. *Rebentisch E. (Ed.) Integrating Program Management and Systems Engineering: Methods, Tools, and Organizational Systems for Improving Performance. – Wiley, 2017. – 395 p. // Ребентиш Э. (гл. ред.) Интеграция управления программой и системной инженерии. Методы, инструменты и организационные системы для улучшения результативности интеграции – М.: ДМК Пресс, 2020. – 584 с.*
10. *ISO/IEC/IEEE 24641:2023 Systems and Software engineering. Methods and tools for model-based systems and software engineering. URL: <https://www.iso.org/standard/79111.html> (дата обращения 27.05.2024).*
11. *Systems Engineering Vision 2020 Version 2.0. – INCOSE, 2007. – 36 p.*
12. *Dickerson C., Mavris D. Architecture and principles of systems engineering. – CRC Press, 2010. – 498 p.*
13. *ISO/IEC/IEEE 15288:2023 Systems and software engineering. System life cycle processes URL: <https://www.iso.org/standard/81702.html> (дата обращения 27.05.2024).*
14. *ISO/IEC/IEEE 42020:2019 Software, systems and enterprise. Architecture processes URL: <https://www.iso.org/standard/68982.html> (дата обращения 27.05.2024).*
15. *Руководство Р - 4761 по методам оценки безопасности систем и бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации. – Авиарегистр МАК, 2010. - по разработке воздушных судов гражданской авиации и систем. – Авиационный регистр МАК, 2010. – 267 с. // SAE ARP 4761А Guidelines for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Aircraft, Systems, and Equipment. – SAE, 2023. URL: <https://www.sae.org/standards/content/arp4761a/> (дата обращения 27.05.2024).*