

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛЬНОЙ ИНЖЕНЕРИИ

DESIGN OF A COMPLEX PRODUCTION SYSTEM USING THE MODEL-BASED ENGINEERING APPROACH

A. Vlasov

Summary. This paper explores the application of the Model-Based Systems Engineering (MBSE) approach to the design of a production system. The relevance of the study is driven by the increasing complexity of modern industrial systems and the need for formalized descriptions at early stages of the system life cycle. The paper demonstrates that the use of MBSE enables an integrated representation of the system, improves requirements traceability, and reduces design risks. The Arcadia methodology is used as the methodological basis of the study.

Keywords: model-based systems engineering, MBSE, production system, system modeling, Arcadia, Capella.

Власов Артемий Андреевич

Санкт-Петербургский политехнический университет

Петра Великого

vlasov.aa@edu.spbstu.ru

Аннотация. В статье рассматривается применение подхода модельно-ориентированной системной инженерии (MBSE) при проектировании производственной системы. Актуальность исследования обусловлена ростом сложности современных производственных процессов, недостаточной скоростью цифровизации большинства производств и необходимостью их формализованного описания на ранних этапах жизненного цикла. В работе показано, что использование MBSE позволяет обеспечить целостное представление системы, повысить прозрачность требований, а также снизить риски ошибок проектирования.

Ключевые слова: разработка систем на основе моделей, MBSE, производственная система, системное моделирование, Arcadia, Capella.

Введение

Современный этап развития промышленности и высокотехнологичных отраслей характеризуется устойчивым ростом сложности наукоёмкой продукции, увеличением степени интеграции аппаратных, программных и информационных компонентов, а также расширением круга заинтересованных сторон, вовлечённых в процессы разработки. Сложные технические системы, создаваемые в таких условиях, обладают многоуровневой архитектурой, выраженной междисциплинарностью и длительным жизненным циклом, что существенно усложняет процессы их проектирования, анализа и сопровождения. В результате возрастает значимость системной инженерии как методологической основы управления разработкой подобных систем.

Традиционно в практике системной инженерии доминировали документно-ориентированные подходы, при которых ключевая информация о системе фиксировалась в виде разрозненных текстовых документов, спецификаций и отчётов. Несмотря на широкое распространение, данный подход демонстрирует ряд существенных ограничений при применении к сложным техническим системам. К числу таких ограничений относятся фрагментация знаний о системе, низкий уровень прослеживаемости требований и архитектурных решений, а также высокая трудоёмкость анализа последствий изменений. По мере роста сложности системы документно-ориентированные методы перестают обе-

спечивать необходимую целостность и согласованность представления инженерной информации.

В ответ на указанные ограничения в системной инженерии сформировалось направление модельно-ориентированной системной инженерии (Model-Based Systems Engineering, MBSE), предполагающее использование формальных моделей в качестве основного средства описания, анализа и управления знаниями о системе. В рамках MBSE модели заменяют или дополняют традиционные документы, обеспечивая единое информационное пространство, в котором требования, функции, архитектура и поведение системы связаны между собой формализованными отношениями. Такой подход позволяет существенно повысить прозрачность процессов разработки, обеспечить сквозную прослеживаемость инженерных решений и снизить риски, связанные с управлением изменениями.

Особую значимость MBSE приобретает при разработке сложных технических систем, где управление сложностью становится одной из ключевых инженерных задач. Использование архитектурно-центричных методов моделирования позволяет структурировать систему на различных уровнях абстракции, начиная с анализа операционного контекста и заканчивая формированием физической архитектуры. При этом модель выступает не только средством визуализации, но и инструментом формального анализа, поддержки принятия решений и оценки последствий проектных изменений на протяжении всего жизненного цикла системы.

Несмотря на активное развитие MBSE и наличие международных стандартов и методических рекомендаций в области системной инженерии, в настоящее время отсутствуют унифицированные методики формализации сложных технических систем, ориентированные на практическое применение модельно-ориентированного подхода. Большинство существующих работ либо сосредоточено на описании отдельных аспектов MBSE, либо ориентировано на конкретные инструментальные средства и нотации, что затрудняет их обобщение и применение в различных предметных областях. В результате возникает необходимость разработки методического подхода, обеспечивающего систематизированное и воспроизводимое описание сложных технических систем с использованием принципов MBSE.

Целью работы является разработка методического подхода к формализации сложных технических систем на основе модельно-ориентированной системной инженерии.

Описание и проектирование сложных технических систем традиционно являются одной из ключевых задач системной инженерии. В условиях роста сложности наукоёмкой продукции данная задача усложняется необходимостью одновременного учёта технических, программных, информационных и организационных аспектов, а также обеспечения согласованности решений на протяжении всего жизненного цикла системы. В этой связи в научной и инженерной практике сформировался ряд подходов к описанию сложных технических систем, отличающихся степенью формализации, уровнем абстракции и применяемыми средствами представления информации.

В рамках функционального подхода основное внимание уделяется описанию функций системы и их декомпозиции. Такой подход позволяет абстрагироваться от конкретной реализации и сосредоточиться на логике функционирования системы. Функциональные модели широко применяются на ранних этапах проектирования и используются для анализа полноты и корректности требований. Вместе с тем изолированное использование функционального подхода не обеспечивает целостного представления о системе, поскольку не позволяет в полной мере учитывать архитектурные аспекты, распределение функций между компонентами и особенности взаимодействия элементов системы.

Значительное развитие получили архитектурные подходы к описанию сложных технических систем, ориентированные на формализацию структуры и взаимодействий компонентов. В международном стандарте ISO/IEC/IEEE 42010 архитектура системы определяется как фундаментальная организация системы, воплощённая в её компонентах, их отношениях друг с другом и с

окружающей средой. Архитектурные описания позволяют представить систему на различных уровнях абстракции и являются важным инструментом управления сложностью. Однако сами по себе архитектурные представления не регламентируют процесс перехода от потребностей и требований к архитектурным решениям, что ограничивает их применение в качестве самостоятельной методологии.

Несмотря на очевидные преимущества, существующие реализации модельно-ориентированного подхода отличаются значительным разнообразием. В практике применяются различные нотации, языки моделирования и инструментальные средства, что затрудняет формирование универсальных методик описания сложных технических систем. Большинство публикаций посвящено либо описанию отдельных инструментов, либо анализу частных аспектов MBSE, таких как управление требованиями или архитектурное моделирование. При этом вопросы последовательной формализации сложной технической системы — от операционного контекста до физической архитектуры — зачастую остаются недостаточно структурированными.

Понятия «сложная техническая система» и «сложность» являются фундаментальными для системной инженерии, однако в научной литературе отсутствуют их универсальные и формально закреплённые определения. Это связано с междисциплинарным характером системных исследований и многообразием контекстов, в которых рассматриваются сложные системы. В связи с этим в рамках настоящей работы используется синтез подходов, сформированных в общей теории систем, теории сложности и международных стандартах системной инженерии.

Одним из основополагающих источников системного подхода является общая теория систем, разработанная Л. фон Берталанфи. В его работах система определяется как совокупность взаимодействующих элементов, образующих целостность, обладающую свойствами, не сводимыми к свойствам отдельных компонентов [Bertalanffy, 1968]. Данный подход подчёркивает принципиальную важность взаимодействий между элементами и вводит представление о целостности как ключевом признаке системы. В рамках этого подхода сложность системы обусловлена не только числом элементов, но и характером связей между ними, а также наличием многоуровневой организации.

В контексте инженерных приложений данные теоретические положения находят отражение в международных стандартах. В стандарте ISO/IEC 15288 сложная система рассматривается как совокупность взаимосвязанных элементов, включающих аппаратные средства, программное обеспечение, персонал, процессы и сред-

ства обеспечения, функционирующих в рамках жизненного цикла [ISO/IEC 15288]. Хотя стандарт не вводит формального определения сложности, он акцентирует внимание на необходимости управления жизненным циклом системы и согласования инженерных решений на различных уровнях абстракции. Таким образом, сложность в инженерном контексте проявляется через многообразие компонентов, дисциплин и стадий жизненного цикла.

Рост сложности наукоёмкой продукции и увеличение междисциплинарных связей в современных технических системах привели к пересмотру традиционных подходов системной инженерии. Документно-ориентированные методы, основанные на текстовых спецификациях и разрозненных инженерных артефактах, демонстрируют ограниченные возможности по управлению сложностью, обеспечению согласованности решений и прослеживаемости требований. В ответ на данные вызовы в системной инженерии сформировался модельно-ориентированный подход, получивший развитие под названием Model-Based Systems Engineering (MBSE), а позже и Model-Based System and Software Engineering (MBSSE), когда развитие IT технологий стало настолько важным и стремительным, что экспертам пришлось дополнить подход для развития также и разработки информационных систем.

Согласно определению Международного совета по системной инженерии (INCOSE), MBSE представляет собой формализованное применение моделей для поддержки процессов определения требований, проектирования, анализа, верификации и валидации системы на протяжении всего её жизненного цикла. При этом ключевым отличием MBSE от традиционных подходов является смещение фокуса с документов на формальные модели как основной носитель инженерных знаний. Полная цепочка соответствия терминов и логики MBSE на рисунке 1.

В отличие от текстовых документов, модели позволяют формально зафиксировать структуру системы, функции, поведение и взаимосвязи между элементами, а также обеспечить согласованность различных инженерных представлений. В рамках MBSE модели становятся средством интеграции инженерных дисциплин и основой для принятия решений на различных уровнях абстракции.

Архитектура рассматривается как фундаментальное средство управления сложностью за счёт декомпозиции системы на уровни и компоненты с чётко определёнными функциями и интерфейсами. В рамках системной инженерии архитектура позволяет связать требования заинтересованных сторон с техническими решениями и обеспечить их трассируемость.

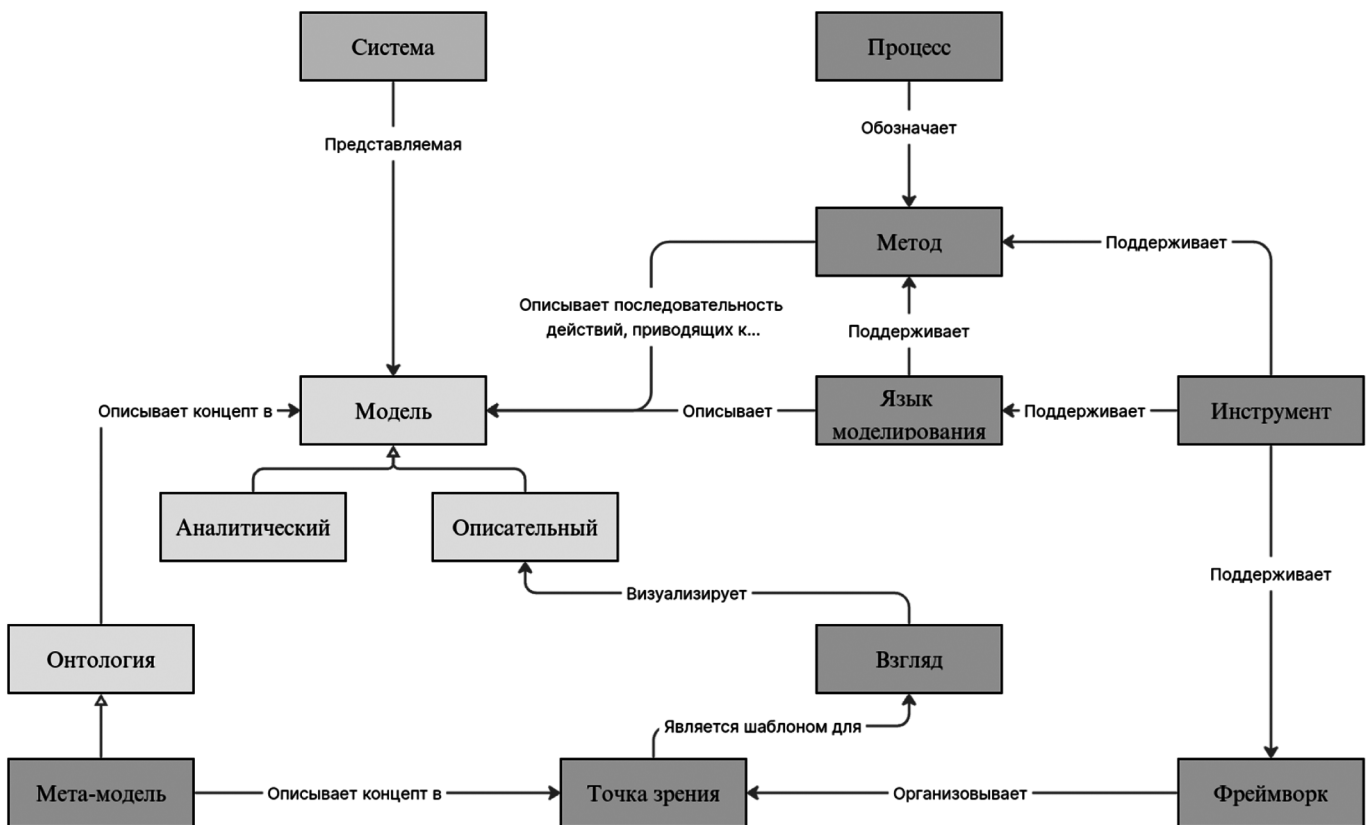


Рис. 1. Концептуальная модель системы терминов стандарта

Одной из наиболее развитых методологических реализаций MBSE является архитектурный метод Arcadia (Architecture Analysis and Design Integrated Approach). Arcadia ориентирована на поэтапное архитектурное описание системы с использованием последовательных уровней абстракции, что позволяет обеспечить непрерывную связь между потребностями заинтересованных сторон и техническими решениями [Roques, 2017]. Метод Arcadia реализован в инструментальной среде Capella и широко применяется в аэрокосмической, транспортной и энергетической отраслях.

Формализация сложной технической системы в условиях высокой степени структурной, функциональной и организационной сложности требует применения методического подхода, обеспечивающего согласованность инженерных решений на различных уровнях абстракции. В рамках модельно-ориентированной системной инженерии такая формализация осуществляется посредством последовательного перехода между архитектурными уровнями описания системы с обеспечением сквозной прослеживаемости требований, функций и технических решений. В настоящем разделе предлагается метод формализации сложной технической системы, основанный на принципах MBSE и архитектурной логике, реализованной в методе Arcadia.

Предлагаемый метод исходит из положений системной инженерии, зафиксированных в ISO/IEC 15288, согласно которым разработка системы должна обеспечивать непрерывную связь между потребностями заинтересованных сторон и реализуемыми техническими решениями на протяжении всего жизненного цикла системы. MBSE в данном контексте рассматривается как средство обеспечения такой связи за счёт использования формальных моделей, выступающих основным носителем инженерных знаний [ISO/IEC 15288; INCOSE SEBoK].

Первоначально система рассматривается в операционном контексте, где фиксируются цели её создания, внешняя среда функционирования и взаимодействие с заинтересованными сторонами. На данном уровне система описывается с точки зрения выполняемых операций и ожидаемых эффектов, без привязки к конкретным техническим решениям [INCOSE, 2015].

Переход к системному уровню предполагает формализацию требований и функций, которые должна реализовывать система для достижения заданных операционных целей. На этом этапе осуществляется трансляция операционных потребностей в системные требования и функциональную архитектуру. Система начинает рассматриваться как совокупность взаимосвязанных функций, обеспечивающих достижение целевых показателей.

Логический уровень служит средством уточнения функциональной архитектуры за счёт определения логических компонентов и их взаимодействий. В отличие от системного уровня, логическая архитектура не привязана к конкретной реализации, но позволяет формализовать распределение функций между логическими сущностями и выявить ключевые интерфейсы [Roques, 2017].

Физический уровень завершает процесс архитектурного уточнения и предполагает отображение логических компонентов на конкретные технические средства, подсистемы и элементы реализации. На данном этапе формализуются физическая структура системы, интерфейсы и ограничения, связанные с выбранными технологиями. При этом физическая архитектура сохраняет связь с предыдущими уровнями, что обеспечивает возможность анализа влияния технических изменений на функциональные и операционные характеристики системы.

Одним из ключевых преимуществ предлагаемого метода является обеспечение сквозной прослеживаемости между уровнями архитектурного описания. В рамках MBSE прослеживаемость рассматривается как способность установить и поддерживать взаимосвязи между требованиями, функциями, архитектурными элементами и результатами верификации [INCOSE SEBoK]. В предлагаемом методе данное свойство реализуется за счёт формального связывания элементов моделей различных уровней.

Сквозная прослеживаемость позволяет анализировать последствия изменений требований на всех этапах архитектурного уточнения и обеспечивает прозрачность инженерных решений.

Предлагаемый метод формализации предполагает, что любые изменения иницируются на соответствующем уровне абстракции и затем транслируются по архитектурной цепочке с сохранением прослеживаемости.

Для демонстрации применимости разработанного метода формализации сложной технической системы на основе модельно-ориентированной системной инженерии в данном разделе рассматривается пример абстрактной производственной системы. Выбор производственной системы обусловлен её типичными признаками сложной технической системы: многоуровневой структурой, наличием большого числа взаимосвязанных подсистем, участием различных заинтересованных сторон, а также необходимостью согласования технических и организационных решений.

Следует подчеркнуть, что целью данной статьи является не детальное описание процесса моделирования

ния или использование конкретных инструментальных средств, а иллюстрация того, каким образом предложенный метод позволяет формализовать производственную систему и обеспечить управляемость её архитектуры.

В качестве объекта рассмотрения выступает производственная система, предназначенная для выпуска наукоемкой продукции и включающая совокупность технологического оборудования, систем управления, средств контроля качества и обслуживающей инфраструктуры.

Производственная система в данном контексте рассматривается как целостный объект, взаимодействующий с внешней средой (поставщиками, потребителями, обслуживающим персоналом, информационными системами предприятия).

На операционном уровне формализации фиксируются цели функционирования производственной системы, основные сценарии её использования и взаимодействие с заинтересованными сторонами.

Переход к системному уровню осуществляется посредством трансляции операционных потребностей в системные требования и функции. На данном этапе формализуются основные функции производственной системы, такие как выполнение технологических опера-

ций, контроль параметров процесса, управление потоками материалов и данных.

На логическом уровне осуществляется распределение системных функций между логическими компонентами производственной системы. В рамках данного уровня формализуются логические подсистемы, отражающие функциональную структуру системы, а также определяются их взаимодействия.

Физический уровень завершает процесс формализации и предполагает отображение логических компонентов на реальные элементы производственной системы: оборудование, программно-аппаратные комплексы, средства измерений и контроля. На данном этапе фиксируется физическая структура системы и уточняются ограничения, связанные с выбранными технологиями и условиями эксплуатации.

Рассмотренный пример показывает, что предложенный метод формализации сложной технической системы на основе MBSE применим к производственным системам и позволяет структурировать их описание без избыточной детализации. Метод обеспечивает целостное архитектурное представление системы, поддерживает сквозную прослеживаемость и создаёт основу для анализа эффективности и управления изменениями.

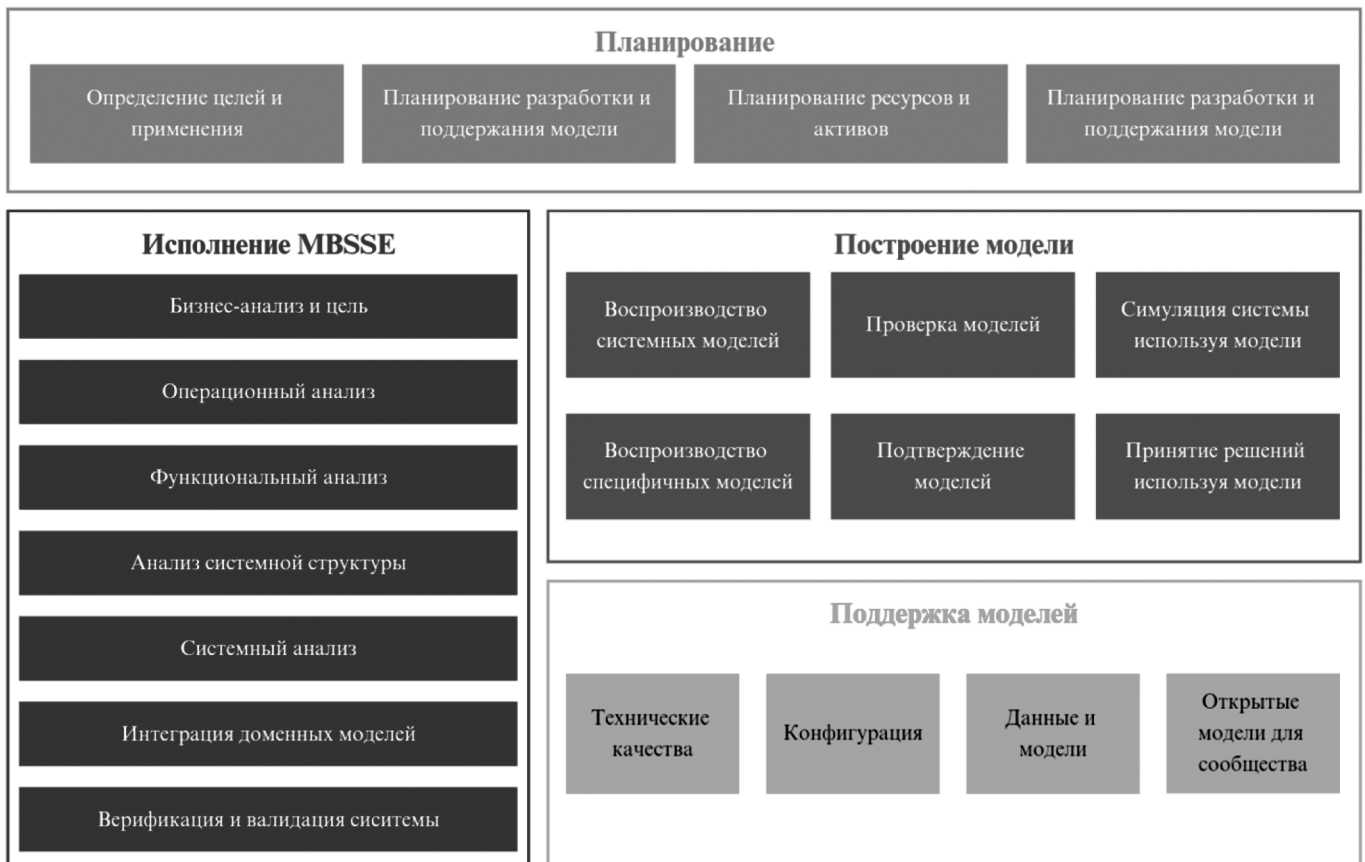


Рис. 2. Эталонная модель системы MBSSE ISO/IEC/IEEE 24641

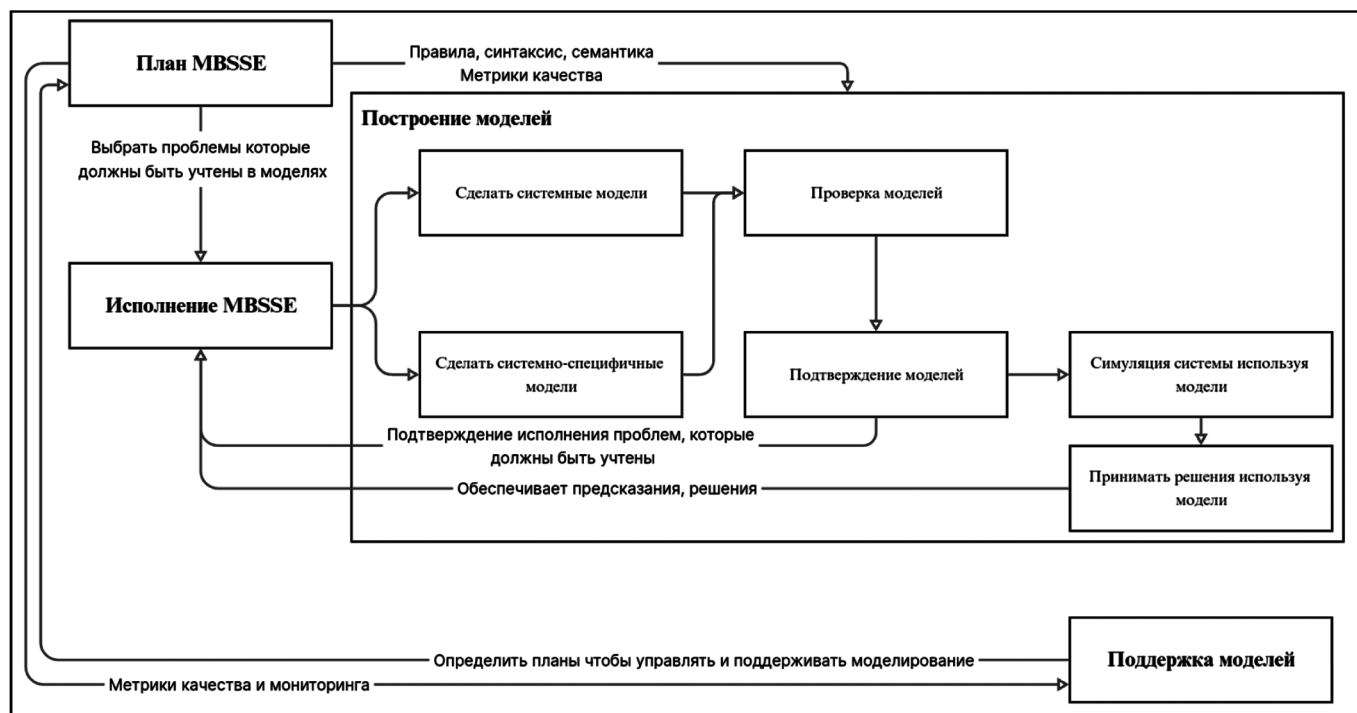


Рис. 3. Отношения между группами процессов MBSSE и процессами группы Построения моделей

Формализация архитектуры позволяет явно фиксировать принятые допущения и ограничения, а также анализировать последствия изменений до их реализации. Это особенно важно для производственных систем и наукоёмкой продукции, характеризующихся высокой степенью взаимосвязанности компонентов и участием различных заинтересованных сторон.

В то же время предложенный метод обладает рядом ограничений, которые необходимо учитывать при его практическом применении. Во-первых, эффективность метода в значительной степени зависит от уровня зрелости процессов системной инженерии в организации. Во-вторых, применение архитектурно-центричного подхода требует соответствующей квалификации специалистов, что может ограничивать использование метода на ранних этапах цифровой трансформации предприятий.

Дополнительным ограничением является то, что предложенный метод ориентирован на концептуальный и архитектурный уровни формализации и не рассматривает в явном виде вопросы количественной оценки эффективности архитектурных решений. Кроме того, в работе не проводится детальное сравнение различных инструментальных реализаций MBSE, включая языки и нотации, основанные на SysML, что ограничивает обобщаемость результатов с точки зрения программных средств.

Необходимо также отметить, что предложенный метод не претендует на универсальное решение всех задач формализации сложных технических систем. Его при-

менение целесообразно в тех случаях, когда требуется систематизированное архитектурное описание и управление сложностью, однако для отдельных предметных областей могут потребоваться дополнительные методические расширения, учитывающие отраслевую специфику.

Заключение

В настоящей работе рассмотрена проблема формализации сложных технических систем в условиях роста сложности наукоёмкой продукции и ограничений традиционных документно-ориентированных подходов системной инженерии. Проведён анализ теоретических основ системной инженерии, понятия сложности и сложной технической системы, а также раскрыта роль модельно-ориентированной системной инженерии как современного метода управления сложностью. Показано, что использование формальных архитектурных моделей позволяет обеспечить целостное и согласованное представление системы на различных уровнях абстракции.

Научная значимость полученных результатов заключается в систематизации и развитии методических положений MBSE применительно к задаче формализации сложных технических систем. Работа вносит вклад в развитие архитектурно-центричного подхода в системной инженерии за счёт синтеза существующих теоретических положений и их структурирования в виде универсального метода формализации, ориентированного на управление сложностью и обеспечение согласованности инженерных решений.

К направлениям дальнейших исследований относятся разработка методов количественной оценки эффективности архитектурных решений, интеграция модельно-ориентированной системной инженерии

с инструментами анализа и оптимизации, а также исследование вопросов масштабируемости и внедрения MBSE в условиях реальных промышленных проектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Friedenthal S., Moore A., Steiner R. A Practical Guide to SysML: The Systems Modeling Language. — 3rd ed. — Waltham, MA: Morgan Kaufmann, 2014. — 626 p.
2. Madni A.M., Sievers M. Model-based systems engineering: Motivation, current status, and research opportunities // *Systems Engineering*. — 2018. — Vol. 21, № 3. — P. 172–190.
3. Holt J., Perry S. SysML for Systems Engineering. — 2nd ed. — London: The IET, 2013. — 304 p.
4. Боровков А.И. и др. Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК // *Оборонная техника*. — 2018. — № 1. — С. 6–33.
5. INCOSE. Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities / ed. D.D. Walden et al. — 4th ed. — Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2015. — 304 p.
6. Borgest N.M. Ontology-based approach to the complex technical system design // *Information Technology and Nanotechnology (ITNT)*. — Samara: IEEE, 2017. — P. 132–136.
7. Kossiakoff A., Sweet W.N., Seymour S.J., Biemer S.M. Systems Engineering Principles and Practice. — 2nd ed. — Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011. — 528 p.
8. Boehm V. Software Engineering Economics. — Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1981. — 767 p.
9. Батоврин В.К. Системная инженерия, управление жизненным циклом и образование: о некоторых трендах // *Управление большими системами: сборник трудов*. — 2014. — № 48. — С. 25–48.

© Власов Артемий Андреевич (vlasov.aa@edu.spbstu.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»