

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»
Факультет вычислительной математики и кибернетики
Фонд содействия развитию интернет-медиа, ИТ-образования,
человеческого потенциала «Лига интернет-медиа»

В. А. Сухомлин, В. Ю. Романов, Д. А. Гапанович

Введение в модельно-ориентированную системную и программную инженерию (MBSSE)

Учебник для вузов

Рекомендовано ФУМО по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки 02.00.00 Компьютерные и информационные науки в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки: «Фундаментальная информатика и информационные технологии», «Математическое обеспечение и администрирование информационных систем», «Математика и компьютерные науки»



МОСКВА – 2024

УДК 004.413(075)
ББК 32.973.2-018-02я7
С91



<https://elibrary.ru/wdwbbit>

Рецензенты:

М.А. Посыпкин – член-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор;
Д.Е. Намиот – д.т.н., ведущий н.с. МГУ имени М.В. Ломоносова

Сухомлин В. А., Романов В. Ю., Гапанович Д. А.

С 91

Введение в модельно-ориентированную системную и программную инженерию (MBSSE) : учебник / В.А. Сухомлин, В.Ю. Романов, Д.А. Гапанович. – Москва : Фонд «Лига интернет-медиа»; МАКС Пресс, 2024. – 672 с.

ISBN 978-5-317-07289-6

<https://doi.org/10.29003/m4300.978-5-317-07289-6>

Системная инженерия является трансдисциплинарным научно-прикладным направлением, объединяющим принципы системного подхода, методы, инструменты и стандарты, предоставляющие интегрированную методологию и соответствующие технологии для проектирования и разработки сложных систем, их всестороннего анализа и проверки, эффективного и безопасного использования. Современный подход к системной инженерии характеризуется акцентированным моделированием систем на протяжении их жизненного цикла с конечной целью создания их цифровых двойников. Он получил название модельно-ориентированной системной инженерии (MBSE, Model-Based Systems Engineering). Последовательная интеграция MBSE с программной инженерией ведет к формированию направления MBSSE (Model-Based Systems and Software Engineering). Именно этому направлению и посвящен данный учебник, главной задачей которого является изучение концептуальных и научно-методических основ MBSE и MBSSE, моделей и методов управления жизненным циклом систем и программного обеспечения, базовых стандартов системной инженерии, изучение и овладение языками моделирования систем UML и SysML и соответствующими инструментами моделирования, изучение методов инженерии требования и разработки описания архитектуры системы, ознакомление с концепцией цифровых двойников и их ролью в MBSE, изучение эталонной модели MBSSE и ее связи с процессными стандартами системной инженерии, изучение методических аспектов процесса интеграция системы и программного обеспечения. Заключительная глава учебника посвящена изучению математических основ системной инженерии. Рассматриваются как основные аспекты математической теории систем А. Уэйна Уаймора, ставшей важным стимулом развития модельно-ориентированного подхода в системной инженерии, так и современные исследования, включая аппарат конечных автоматов Дэвида Харела, формализм моделирования дискретных систем DEVS, исследования теории категорий как формальной математической основы для системного проектирования на основе моделей. Авторы рекомендуют данный курс в качестве базового при подготовке ИТ-специалистов.

Ключевые слова: системная инженерия, SE, модельно-ориентированная системная инженерия, MBSE, MBSSE, инженерия требований, архитектура систем, цифровые двойники, интеграция систем и ПО, SysML, UML.

УДК 004.413(075)
ББК 32.973.2-018-02я7

ISBN 978-5-317-07289-6

© Сухомлин В. А., Романов В.Ю., Гапанович Д.А., 2024
© Фонд «Лига интернет-медиа», 2024
© ООО «МАКС Пресс», 2024

ПРЕДИСЛОВИЕ

Строительными блоками современного мира и бытия человека служат разнообразные системы естественной и искусственной природы, где под системой понимается совокупность взаимодействующих элементов, характеризующихся целостностью и наличием общих целей функционирования. Изучение научных и прикладных аспектов, связанных с системами, а также процессами, методами и средствами их создания и использования, имеет решающее значение для функционирования современного мира. Значительную часть систем составляют системы, частично или полностью созданные человеком. Такие системы называются **инженерными**, а научно-прикладная дисциплина, предназначенная для исследования, создания и управления сложными (инженерными) системами, называется **системной инженерией** (systems engineering), или SE. Эта дисциплина объединяет принципы, методы, стандарты и инструменты, необходимые для разработки, анализа и управления сложными системами [1].

Как самостоятельная дисциплина системная инженерия сложилась в 1960-х годах в результате опыта реализации программ по созданию сложных космических и ракетных систем, строительству энергетических комплексов, крупных промышленных объектов. На основе этого опыта сформировались основные принципы и методы, а затем и стандарты, системной инженерии, такие как анализ требований, анализ функциональности систем, архитектурное проектирование, верификация, испытания, анализ качества, обеспечение информационной безопасности систем и т. д. Также были разработаны первые математические модели и инструменты для анализа и оптимизации систем.

Международный совет по системной инженерии (INCOSE) определяет **системную инженерия** (SE) как междисциплинарный подход и средства, позволяющие создавать успешные системы [2]. В SE основное внимание уделяется целостному и одновременному пониманию потребностей заинтересованных сторон (в частности, заказчиков), изучению возможностей систем и требований к системам, их синтезу, проверке, испытаниям и разработке решений при рассмотрении проблемы в целом, от исследования концепции систем до их утилизации [2]. Принципы, методологическая база и практики SE направлены на разработку больших, сложных, надежных **инженерных систем**, будь то продукты, услуги или предприятия.

Системную инженерию, которая сложилась до конца XX столетия, часто называют традиционной или **системной инженерией, основанной на документах (Document-Based Systems Engineering, или DBSE)**, ввиду того, что основными артефактами, сопровождающими систему на протяжении ее жизни, являлись документы на бумажных и/или машинных носителях.

С конца 1990-х специалисты по системному проектированию стали широко применять методы, основанные на моделях, используемых для облегчения коммуникации, управления сложностью дизайна, улучшения качества продукта, улучшения сбора и повторного использования знаний. Такой подход получил название **модельно-ориентированной системной инженерии (Model-Based Systems Engineering, или MBSE)**.

MBSE определяется как формализованное приложение графического моделирования с точными семантическими определениями для анализа операций, определения требований, разработки системного дизайна, верификации и испытаний, начиная с концептуальной фазы и продолжая на более поздних стадиях/этапах жизненного цикла [3].

Суть MBSE, часто обобщаемой до цифровой инженерии (digital engineering – DE), заключается в создании машиночитаемых моделей, представляющих все аспекты системы и поддерживающих все действия по проектированию, разработке, производству и эксплуатации системы на протяжении всего ее жизненного цикла.

Эти цифровые модели образуют цифровой двойник (Digital Twin – DT) целевой системы, основанный на общих схемах данных, формирующих цифровой поток, который объединял бы все заинтересованные стороны, участвующие в создании или приобретении новых систем.

Стратегия цифрового инжиниринга направлена на повышение эффективности и улучшение качества всей деятельности по созданию и приобретению новых сложных систем. MBSE предоставляет возможность консолидировать информацию в доступном централизованном источнике, обеспечивая частичную или полную автоматизацию многих процессов системного проектирования и облегчая интерактивное представление компонентов и поведения систем.

В настоящее время системная инженерия является широко применяемой дисциплиной, с помощью которой решаются сложные

технические и организационные проблемы, в частности в авиационной индустрии, космической области, атомной промышленности, в сфере создания систем вооружений, автомобилестроении и т. п. Она объединяет знания из различных областей, таких как математика, информатика, управление проектами, экономика и другие, и предоставляет инструменты и методы для анализа, проектирования и управления системами любого масштаба и сложности.

В последние годы наметилась тенденция более тесной интеграции системной инженерии с программной инженерией, что отражено в международном стандарте ISO/IEC/IEEE 24641:2023-2023 — «Системная и программная инженерия. Методы и инструменты для модельно-ориентированной системной и программной инженерии», в котором представлены фундаментальные методологические решения в этой области, стандартизованные на международном уровне и рассмотренные в одной из глав книги. Эту тенденцию авторы книги отразили и в ее названии.

Настоящая книга представляет собой учебник вводного курса по модельно-ориентированной системной и программной инженерии, первоначально разработанного для программ магистерского обучения [4]. Однако авторы рекомендуют такой курс в качестве одного из базовых для всех направлений подготовки профессиональных кадров в области компьютерных и информационных технологий.

Задачи такого курса:

- дать целостное представление о современной системной инженерии как актуальном междисциплинарном направлении;
- изучить концептуальный аппарат, методические основы проектирования сложных систем и программного обеспечения, модели их жизненного цикла;
- ознакомить с системой стандартов системной инженерии, в частности со стандартами процессов жизненного цикла систем и программного обеспечения;
- ознакомить с методами разработки системных требований и описания системных архитектур;
- ознакомить с концепцией цифровых двойников и их ролью в подходе MBSE;
- рассмотреть методические основы процесса интеграции систем и программного обеспечения;
- познакомить с математическими основами системной инженерии;
- изучить и освоить языки моделирования UML и SysML.

Одной из задач курса является развитие на основе семинарских занятий навыков в разработке моделей систем с использованием языка SysML и CASE-инструмента Papyrus. С целью поддержки семинарской и проектной работы студентов в книгу включены справочные материалы по языкам UML и SysML, а также инструкция по разворачиванию CASE-инструмента Papyrus для практического освоения методов моделирования систем на языке SysML.

Книга содержит 13 глав и 5 приложений.

Содержание глав по темам следующее.

Глава 1. Введение в SE. Основные понятия

- 1.1. История и настоящее системной инженерии
- 1.2. Определение и область применения
- 1.3. Пользователи системной инженерии, область деятельности системных инженеров
- 1.4. Методологические основы системной инженерии. Системный подход и системное мышление
- 1.5. Определение и классификация систем: концептуальная модель понятия «система»
- 1.6. Жизненный цикл систем и процессы жизненного цикла
- 1.7. Итеративность стадий и процессов жизненного цикла

Глава 2. Модели жизненного цикла систем

- 2.1. Жизненные циклы систем и их рекурсивный характер
- 2.2. Модели жизненного цикла систем и их классификация
- 2.3. Фазы и стадии жизненного цикла систем
- 2.4. Предварительно заданная одношаговая модель жизненного цикла Sol, модели типа Vee
- 2.5. Инкрементальные модели процессов жизненного цикла систем
- 2.6. Эволюционные модели процессов жизненного цикла систем
- 2.7. Гибкие модели процессов жизненного цикла систем (Agile Systems Engineering)
- 2.8. Вопросы защиты информации в процессе управления моделью жизненного цикла системы

Глава 3. Модели итеративного процесса разработки программного обеспечения

- 3.1. Классификация систем программного обеспечения и моделей их жизненного цикла
- 3.2. Инкрементальная сборка (Incremental-build)

- 3.3. Прототипирование (prototyping) в разработке программного обеспечения
- 3.4. Спиральные модели жизненного цикла
- 3.5. Гибкая модель разработки ПО (Agile) – итеративная эволюция требований и кода
- 3.6. Эволюционный последовательный процесс Скрам (Scrum)
- 3.7. Принципы бережливого производства и разработки ПО
- 3.8. Руководство по своду знаний в области программной инженерии SWEBOOK

Глава 4. Характерные черты и возможности языка UML

- 4.1. Основные принципы объектно-ориентированного подхода (Абстракция, Инкапсуляция, Модульность, Обобщение и Наследование, Агрегация и Композиция, Интерфейсы, Полиморфизм)
- 4.2. История создания и назначение языка моделирования UML
- 4.3. Средства языка UML для моделирования структуры системы (Объекты, Классы, Структурированный класс, Пакеты, Актеры)
- 4.4. Средства языка UML для моделирования поведения системы (Сценарии Исползования, Деятельности, Диаграммы Последовательности, Комбинированный Фрагмент, Конечные автоматы, Временные диаграммы)
- 4.5. Реализация моделирования (Диаграммы Компонентов, Диаграммы Развертывания)

Глава 5. Язык моделирования SysML и его применение для разработки моделей систем

- 5.1. История создания и назначение языка моделирования SysML
- 5.2. Средства языка SysML для моделирования требований к системе
- 5.3. Средства языка SysML для моделирования структуры системы
- 5.4. Средства языка SysML для моделирования поведения системы
- 5.5. Средства языка SysML для построения модели

Глава 6. Инженерия требований

- 6.1. Инжиниринг требований. Основные определения
- 6.2. Требования в жизненном цикле систем

- 6.3. Преобразование потребностей предприятия в требования
- 6.4. Конструкция требований
- 6.5. Процессы и деятельности инженерии требований в жизненном цикле системы
 - 6.5.1. Процесс определения требований заинтересованных сторон
 - 6.5.2. Процесс анализа требований
- 6.6. Потребности и требования безопасности
 - 6.6.1. Преобразование потребностей безопасности в требования и политику безопасности заинтересованных сторон
 - 6.6.2. Требования заинтересованных сторон и требования безопасности
 - 6.6.3. Системные требования и требования безопасности системы
 - 6.6.4. Политика безопасности
 - 6.6.5. Применение языка SysML для моделирования требований

Глава 7. MBSE — системная инженерия на основе моделей

- 7.1. Введение в MBSE. Основные определения
- 7.2. Модели жизненного цикла SE и MBSE. V-модель в среде, основанной на моделях, ромб SE и цифровой двойник
- 7.3. Структура доменов для модели архитектуры систем
- 7.4. Архитектурно-акцентированный процесс MBSE (MBSAP The Model-Based System Architecture Process — MBSAP) разработки моделей систем

Глава 8. Описание архитектуры системы

- 8.1. Описание архитектуры (ГОСТ Р 57100-2016/ISO/IEC/IEEE 42010)
 - 8.1.1. Определения процесса архитектуризации
 - 8.1.2. Концептуальная модель описания архитектуры
 - 8.1.3. Архитектура и Описание архитектуры. Концептуальная модель понятия «описание архитектуры»
 - 8.1.4. Архитектура и описания архитектуры
 - 8.1.5. Требования к описанию архитектуры
 - 8.1.6. Развитие архитектурных стандартов
- 8.2. Модель Захмана описания архитектуры предприятия
- 8.3. Пример описания архитектуры для приложений Интернета вещей (IoT)
 - 8.3.1. Назначение и область применения IoT
 - 8.3.2. Определения основных терминов IoT

- 8.3.3. Типовая архитектура IoT
- 8.3.4. Основные характеристики систем IoT
- 8.3.5. Концептуальная модель IoT
- 8.3.6. Типовая модель IoT и эталонная архитектура IoT
- 8.3.7. Функциональное представление типовой архитектуры IoT
- 8.3.8. Представление развертывания системы для типовой архитектуры IoT
- 8.3.9. Сетевое представление типовой архитектуры IoT
- 8.3.10. Представление использования типовой архитектуры IoT, или пользовательское представление
- 8.3.11. Эталонная (типовая) модель жизненного цикла безопасности системы и продукта IoT
- 8.3.12. Примеры приложений IoT

Глава 9. Цифровые двойники

- 9.1. Краткая история и определения цифровых двойников
- 9.2. Анализ процесса стандартизации в области цифровых двойников
 - 9.2.1. Стандартизация технологий цифровых двойников официальными организациями стандартизации
 - 9.2.2. Промышленные стандарты цифровых двойников
 - 9.2.3. Национальные стандарты цифровых двойников
- 9.3. Анализ архитектурных решений для цифровых двойников
 - 9.3.1. Пятимерная структура цифрового двойника
 - 9.3.2. Архитектура цифрового двойника, основанная на промышленном Интернете вещей.
 - 9.3.3. Системная архитектура цифрового двойника
 - 9.3.4. Язык определения цифрового двойника Microsoft
 - 9.3.5. Цеховой цифровой двойник в интеллектуальном производстве
 - 9.3.6. Синтезированная архитектура промышленного IoT для горнодобывающей промышленности
- 9.4. Технология цифровых двойников и MBSE
 - 9.4.1. Цифровые двойники как основа подхода MBSE
 - 9.4.2. Концепция цифровой нити и ее интеграция с цифровыми двойниками
 - 9.4.3. Интеллектуальные цифровые двойники
- 9.5. Цифровые двойники для создания промышленной метавселенной

Глава 10. Система стандартов SE. Процессные стандарты

- 10.1. Таксономия базовых стандартов системной инженерии

- 10.2. Процессы жизненного цикла систем — ISO/IEC/IEEE 15288
 - 10.2.1. Процессы соглашения
 - 10.2.2. Процессы организационного обеспечения проекта
 - 10.2.3. Процессы технического управления
 - 10.2.4. Технические процессы
- 10.3. Процессы жизненного цикла программного обеспечения (ISO/IEC 12207)
- 10.4. Категория процессов в контексте системы
- 10.5. Категория специальных процессов программных средств
- 10.6. Сравнение ISO/IEC/IEEE 15288:2023 с ISO/IEC/IEEE 15288:2015
- 10.7. Модельно-ориентированная системная и программная инженерия (Model-based systems and software engineering (MBSSE))

Глава 11. Эталонная модель модельно-ориентированной системной и программной инженерии (MBSSE) и ее связь с процессными стандартами системной инженерии

- 11.1. Методы и инструменты для модельно-ориентированной системной и программной инженерии (ISO/IEC/IEEE 24641:2023)
- 11.2. Основные понятия стандарта ISO/IEC/IEEE 24641:2023
- 11.3. Эталонная модель MBSSE
- 11.4. Описание целей процессов эталонной модели
 - 11.4.1. Процессы группы «План MBSSE»
 - 11.4.2. Процессы группы «Построения моделей» и информационная база DIKW (данные-информация-знание-мудрость)
 - 11.4.3. Процессы группы «Выполнение MBSSE»
 - 11.4.4. Процессы группы «Поддержка моделей»
- 11.5. Взаимосвязь ISO/IEC/IEEE 24641 с главными международными стандартами системной инженерии
- 11.6. Трехмерная эталонная структура (фреймворк) MBSSE
- 11.7. MBSSE-размерности системной модели
- 11.8. Потенциально возможные MBSSE-роли

Глава 12. Интеграция системы и программного обеспечения. Методические аспекты

- 12.1. Назначение стандарта ISO/IEC/IEEE FDIS 24748-6 Интеграция систем и программного обеспечения (System and software integration)
- 12.2. Концепция системной интеграции и ее основные понятия
- 12.3. Планирование и цели применения процесса интеграции

- 12.3.1. Планирование интеграции и рекомендации по применению
- 12.3.2. Роли и компетенции команды интеграции
- 12.3.3. Сценарии интеграции
- 12.3.4. Альтернативные методы интеграции
- 12.4. Другие процессы, связанные с процессом интеграции
- 12.5. Требования к информационным элементам
- 12.6. Матрицы связи (Coupling matrices)

Глава 13. Математические основы системной инженерии

- 13.1. История системной инженерии
- 13.2. Котиледоны Уаймора (Wymore) и системная инженерия
- 13.3. Математическая модель системы по Уаймору
- 13.4. Математическая платформа Уаймора и конечные автоматы языка SysML
 - 13.4.1. Модель абстрактной машины Уаймора и характеристики дискретных автоматов
 - 13.4.2. Обзор преобразований моделей конечных автоматов
 - 13.4.3. Преобразование автоматов SysML к автоматам Уаймора
 - 13.4.4. Ортогональность конечных автоматов
- 13.5. Теория категорий как формальная математическая основа для системного проектирования на основе моделей
 - 13.5.1. Введение в теорию категорий
 - 13.5.2. Введение в ологи
 - 13.5.3. Система как категория
- 13.6. Объединение теоретической основы систем Уаймора и формализма моделирования DEVS: к научным основам для MBSE
 - 1.1. Методы объединения
 - 1.2. Текущие результаты
 - 1.3. Краткий обзор DEVS и связанного с ним формализма
 - 1.4. Введение в спецификацию системы дискретных событий DEVS

Приложение А

Краткий справочник по объектно-ориентированному проектированию (OOD) и унифицированному языку моделирования UML.

Приложение Б

Краткий справочник по профилю языка системного моделирования SysML унифицированного языка моделирования UML.

Приложение В

Пример разработки на основе требований системных спецификаций с использованием языка SysML, раскрывающий методику разработки формального описания высокоуровневой архитектуры системы на этапе ее операционного представления.

Приложение Г

Представление процесса безопасности (Security process view) жизненного цикла систем.

Приложение Д

Указания по установке и использованию CASE-инструмента Paragus.

Распределение проделанной работы:

- автором предисловия, лектором курса, написаны: предисловие, главы 1, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11 (совместно с Гапановичем Д.А.), 12, 13, приложения В и Г;
- В.Ю. Романовым, руководителем семинарских занятий по курсу, написаны: главы 4 и 5, приложения А, Б и Д;
- Д.А. Гапановичем написаны главы 9 и 11 (совместно с первым автором).

По взаимному согласию книга посвящена женам: Людмиле Сухомлиной и Людмиле Романовой, а также сыну интернет-журналисту Владимиру Сухомлину.

Благодарности

Автор выражает благодарность за обсуждение материала учебника и ценные замечания рецензентам чл.-корр. РАН, профессору М.А. Посыпкину и д.т.н. Д.Е. Намиоту, профессору А.И. Костокрызову, а также Е.А. Гаврину и В.В. Рубанову за поддержку работы. Особые слова благодарности супераналитику в области высоких технологий В.П. Куприяновскому, без информационной поддержки которого эта книга вряд ли состоялась бы.

Литература

- [1] Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK), version 2.7. 2022.
- [2] {INCOSE. 2012. INCOSE Systems Engineering Handbook, version 3.2.2. San Diego, CA, USA: International Council on Systems Engineering (INCOSE), INCOSE-TP-2003-002-03.2.2.}

[3] Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities, Fourth Edition, INCOSE, 2015.

[4] Сухомлин, В.А. Концепция и основные характеристики магистерской программы «Кибербезопасность» факультета ВМК МГУ / В.А. Сухомлин. — International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 vol. 11, no. 7, 2023.

РЕЦЕНЗИЯ НА УЧЕБНИК: В.А. СУХОМЛИН, В.Ю. РОМАНОВ, Д.А. ГАПАНОВИЧ «ВВЕДЕНИЕ В МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННУЮ СИСТЕМНУЮ И ПРОГРАММНУЮ ИНЖЕНЕРИЮ (MBSE)»

В результате ознакомления с учебником, написанным специалистами Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова под руководством профессора В.А. Сухомлина, рецензент отмечает следующее.

1. Рецензируемая книга посвящена чрезвычайно актуальной теме — модельно-ориентированной системной и программной инженерии "MBSSE".

Системная инженерия (systems engineering) является актуальным трансдисциплинарным научно-прикладным направлением, объединяющим принципы системного подхода, методы, инструменты и стандарты, предоставляющие интегрированную методологию и соответствующие технологии для проектирования и разработки сложных систем, их всестороннего анализа и проверки, эффективного и безопасного использования [1].

Все возрастающая сложность современных систем привела к необходимости использования при их создании и эксплуатации методов комплексного моделирования систем, построения их цифровых двойников, что предопределило переход системной инженерии к подходам проектирования и эксплуатации систем на основе моделей. Этот этап развития системной инженерии получил название модельно-ориентированная системная инженерия (Model-Based Systems Engineering — MBSE) [2].

2. Модельно-ориентированная системная инженерия — актуальное образовательное направление в подготовке специалистов высшей квалификации

В международной системе инженерного образования наметилось быстрое развитие направления системной инженерии и применения методологии MBSE, так как для многих отраслей экономики, особенно наукоемких, таких как, например, авиационная, космическая, военная, атомная энергетика, системная инженерия рассматривается как одна из ключевых компетенций работников, которая позволяет осуществлять реализацию проектов на основе высокоточного высокоинтегрированного междисциплинарного моделирования и расширенной визуализации [3, 4], что значительно сокращает сроки выполнения проектов, обеспечивает повышение их качества и возможность повторного использования репозитория моделей в новых проектах.

3. Характеристика рецензируемого учебника

Прежде всего следует сказать, что рецензируемый учебник по существу является первым отечественным учебником по MBSE, поэтому сравнивать его с другими аналогичными не приходится.

По своему содержанию в качестве введения в MBSE учебник содержит все основные аспекты системной инженерии, необходимые для погружения в эту дисциплину, причем изложенные на высоком профессиональном уровне.

Хотя учебник написан для односеместрового курса магистерской программы «Кибербезопасность», где он весьма актуален, т. к. специалистам по кибербезопасности крайне необходимы системное мышление, системный подход и системные принципы для решения комплексных задач по обеспечению безопасности активов, учебник может считаться классическим введением в область MBSE, в ее научно-методические основы и инструменты моделирования.

Кратко рассмотрим его содержание.

Первые три главы содержат описание концептуальной основы современной системной инженерии в виде определений базовых терминов и концептуальных моделей, содержат описания широкого ряда моделей жизненного цикла систем и программного обеспечения, реализуемых на практике. Следует отметить, что эти главы, как и последующие, написаны на основе современных версий международных стандартов системной инженерии.

В четвертой и пятой главах учебника приводится описание возможностей языков графического моделирования систем UML и SysML

соответственно. При этом эти главы, дополнены емкими приложениями А и Б со справочным материалом по этим языкам, что делает книгу еще и учебным пособием по языкам UML и SysML.

В главе 6 достаточно подробно рассматривается очень важная проблематика, связанная с инжинирингом требований, начиная с правил формулирования требований и заканчивая их трансформацией в системные требования; детально рассмотрены процессы и деятельности жизненного цикла систем, непосредственно связанные с инжинирингом требований; рассмотрены методические вопросы разработки требований к безопасности систем. Также рассмотрены средства и возможности языка SysML для моделирования требований. Дополнением к этой главе служит приложение В, в котором на примере, близком к реальности, показана методика трансформации требований в формальные спецификации высокоуровневой архитектуры системы на языке SysML.

Последующие главы полностью посвящены MBSE.

В них дается представление о модельно-ориентированной системной инженерии, т. е. MBSE. Рассматриваются определение MBSE, определения и свойства моделей MBSE, критерии эффективности моделей. Анализируются особенности реализации классической V-модели в модельно-ориентированном случае, трансформируемой в ромб системной инженерии с цифровым двойником в верхней части ромба. Также рассматривается метод архитектурно-ориентированного процесса разработки модели системы (MBSAP) и этапы построения системных моделей на основе данного метода (глава 7).

Далее рассматриваются назначение процесса архитектуризации и роль описания архитектуры системы в системной инженерии, рассматриваются основные определения процесса архитектуризации, концептуальная модель и требования к описанию архитектуры системы. Детально рассматриваются примеры описания архитектуры предприятия на основе модели Захмана и описания архитектуры приложений Интернета вещей (глава 8).

Достаточно полно исследуется концепция цифровых двойников. В частности, рассматривается классификация стандартов по этой теме, приводится анализ архитектурных решений по созданию цифровых двойников для активов и производства. Уделяется внимание интеллектуальным цифровым двойникам и цифровым двойникам для создания промышленной метавселенных (глава 9).

Значительное место в учебнике посвящено изучению современной системы стандартов системной инженерии (главы 10, 11, 12). В учебнике приводятся описание и анализ таксономии современной системы стандартов системной инженерии, детально рассматриваются современные версии стандарта ISO/IEC/IEEE 15288 — процессы жизненного цикла систем, и стандарта ISO 12207 — процессы жизненного цикла программного обеспечения, рассматриваются принципы подхода модельно-ориентированной системной и программной инженерии (Model-based systems and software engineering (MBSSE)), а также преимущества данного подхода перед традиционной системной инженерией. Исследуется новая эталонная модель модельно-ориентированной системной и программной инженерии (MBSSE) и ее связь с процессными стандартами системной инженерии. Рассматриваются трехмерная эталонная структура (фреймворк) MBSSE RF и пример создания и настройки MBSSE RF на предметную область и потенциально возможные MBSSE-роли. Детально изучаются концепции интеграция системы и ее программного обеспечения, в частности рассмотрены связь интеграции с процессами жизненного цикла, стратегия интеграции, роли и компетенции команды интеграции, сценарии интеграции.

Считаю большим достижением авторов учебника включением в его состав главы 13, посвященной исследованию математических основ системной инженерии. В ней детально рассмотрены как классическая математическая теория проектирования систем А. Уэйна Уаймора (Wymore, A. Wayne), так и современные исследования по формализации семантики языка SysML, применению теории категорий как формальной математической основы для системного проектирования на основе моделей, исследованию возможности объединения теоретической основы систем Уаймора и универсального формализма моделирования DEVS.

Включение этой главы можно считать обращением к магистрам и аспирантам с целью вызова их интереса к столь актуальным исследованиям в области математических основ системной инженерии. В отечественных учебниках и книгах по системной и программной инженерии ранее эта тема не поднималась.

Выводы

В целом, подводя итоги, можно сказать, что рецензируемый учебник является чрезвычайно своевременным и безусловно полезным для развития высшего профессионального образования

в области информационных технологий. Также учебник будет полезен и для широкого круга ИТ-специалистов.

Несомненным достоинством учебника является построение материала на основательном анализе современных версий международных стандартов, что делает учебник полезным для практиков в области проектирования систем, а также обеспечит актуальность материала учебника на протяжении нескольких лет.

Литература

[1] Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK), version 2.7. 2022.

[2] Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities, Fourth Edition, INCOSE, 2015.

[3] Razbani, O. Enhancing Competency and Industry Integration: A Case Study of Collaborative Systems Engineering Education for Future Success / O. Razbani, G. Muller, S. Kokkula, K. Falk. — Systems 2023, 11, 463. <https://doi.org/10.3390/systems11090463>].

[4] 30. INCOSE. Systems Engineering Vision 2035: Engineering Solutions for a Better World; [INCOSE: San Diego, CA, USA, 2022. \[Google Scholar\]](#).

Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор

М.А. Посыпкин

**РЕЦЕНЗИЯ НА УЧЕБНИК: В.А. СУХОМЛИН, В.Ю. РОМАНОВ,
Д.А. ГАПАНОВИЧ «ВВЕДЕНИЕ В МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННУЮ
СИСТЕМНУЮ И ПРОГРАММНУЮ ИНЖЕНЕРИЮ (MBSE)»**

Системная инженерия (systems engineering) представляет собой междисциплинарную область знаний, объединяющую концепции, методы, технологии и стандарты, ориентированные на создание сложных инженерных систем и управление их жизненным циклом.

Развитие навыков в области системной инженерии в рамках образовательных программ высшего профессионального образования по направлениям, связанным с компьютерными и информационными технологиями, как и для других технических профессий является необходимым делом.

Системная инженерия на основе моделей (MBSE) — это современная парадигма системной инженерии, акцентированная на использовании методов формализации и комплексного моделирования систем в процессе их создания и эксплуатации с целью уменьшения количества ошибок проектирования, снижения затрат за счет предотвращения дорогостоящих переделок, улучшения качества систем, обеспечения возможности повторного использования разработанных моделей, повышения производительности процесса проектирования по сравнению с традиционными методами системной инженерии.

Рецензируемый учебник «Введение в модельно-ориентированную системную инженерия (MBSE)» является первым в России учебником, посвященным MBSE.

Авторы анонсировали своей целью создать учебник, предназначенный для изучения:

- концептуальных и научно-методических основ MBSE;
- моделей и методов разработки и управления жизненным циклом систем;
- системы международных стандартов системной инженерии и, в частности, новых стандартов, отражающих специфику MBSE;
- языков моделирования систем (UML и SysML) и развития навыков применения этих языков в конкретной программной среде на основе семинарских занятий, сопровождающих лекционный курс.

Анализ содержания учебника подтверждает, что поставленные цели достигнуты.

К достоинствам данного учебника, помимо того что он является первым учебником по MBSE, можно отнести следующее:

- представление материала учебника дано на высоком профессиональном уровне в терминологии современных версий международных стандартов;
- в учебнике приведен достаточно глубокий анализ современных международных стандартов системной инженерии, что делает его полезным и для специалистов в этой области;
- включение весьма информативных приложений со справочной информацией по языкам UML и SysML, что дополняет учебник функцией учебного пособия по этим языкам.

Нельзя не отметить 13-ю главу учебника, в которой приведен обстоятельный анализ математических основ системной инженерии от математической теории системной инженерии Уаймора, до современных исследований возможностей развития теории Уаймора, использования теории категорий в качестве математической основы системной инженерии, сопряжения теории Уаймора с универсальным формализмом для моделирования дискретных систем DEVS. Также показана чрезвычайная актуальность исследований в разработке математических основ системной инженерии. Ранее в учебной литературе по программной и системной инженерии эта тема практически не поднималась.

В заключение хочу выразить уверенность в том, что рецензируемый учебник является своевременным, актуальным и будет с успехом применяться для подготовки ИТ-специалистов вообще и системных инженеров, в частности.

Д.т.н., вед. н.с.

Д.Е. Намиот



ПОСВЯЩАЕТСЯ

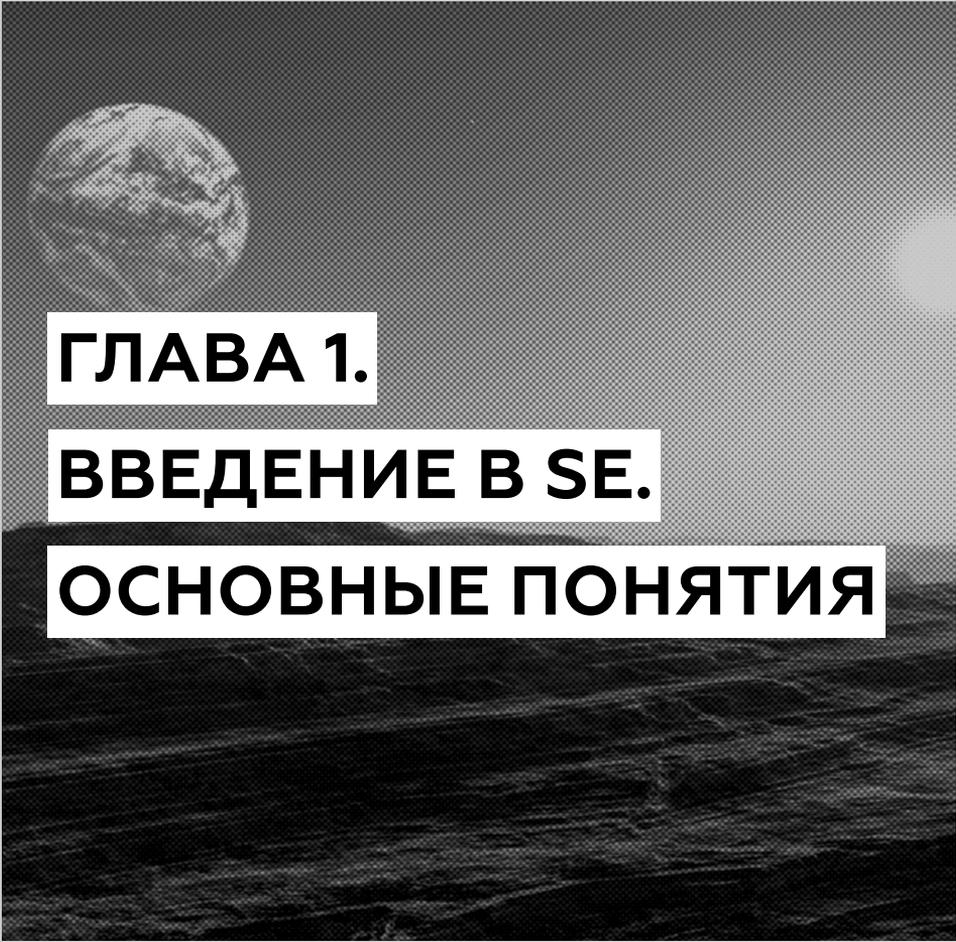
женам Людмиле Сухомлиной, Людмиле Романовой
и сыну, интернет-журналисту, первому блогеру России
Владимиру Сухомлину

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность за обсуждение материала учебника и ценные замечания рецензентам чл.-корр. РАН, профессору М.А. Посыпкину и д.т.н Д.Е. Намиоту; профессору А.И. Костогрызову, Е.А. Гаврину и В.В. Рубанову за поддержку на протяжении работы над книгой. Особые слова благодарности супераналитику в области высоких технологий В.П. Куприяновскому, без информационной поддержки которого эта книга вряд ли состоялась бы. Также мои слова благодарности соавторам Романову Владимиру Юрьевичу и Гапановичу Дмитрию Антоновичу за поддержку инициативы автора и профессионализм.

Д.т.н., профессор В.А. Сухомлин

- 1.1.**
ИСТОРИЯ И НАСТОЯЩЕЕ СИСТЕМНОЙ ИНЖЕНЕРИИ
- 1.2.**
ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ
- 1.3.**
ПОЛЬЗОВАТЕЛИ СИСТЕМНОЙ ИНЖЕНЕРИИ, ОБЛАСТЬ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМНЫХ ИНЖЕНЕРОВ
- 1.4.**
МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИСТЕМНОЙ ИНЖЕНЕРИИ.
СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД И СИСТЕМНОЕ МЫШЛЕНИЕ
- 1.5.**
ОПРЕДЕЛЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ: КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ
МОДЕЛЬ ПОНЯТИЯ «СИСТЕМА»
- 1.6.**
ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ СИСТЕМ И ПРОЦЕССЫ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА
- 1.7.**
ИТЕРАТИВНОСТЬ СТАДИЙ И ПРОЦЕССОВ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА



ГЛАВА 1.

ВВЕДЕНИЕ В SE.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

1.1. ИСТОРИЯ И НАСТОЯЩЕЕ СИСТЕМНОЙ ИНЖЕНЕРИИ

Системы естественной и искусственной природы служат строительными блоками современного мира и бытия человека. Под системой понимается совокупность взаимодействующих элементов, характеризующихся целостностью и наличием общих целей функционирования. Изучение научных и прикладных аспектов, связанных с системами, а также процессами, методами и средствами, необходимыми для их создания и использования, имеет решающее значение для функционирования современного мира.

Значительную часть систем составляют системы, частично или полностью созданные человеком. Такие системы называются **инженерными**, а научно-прикладная дисциплина, предназначенная для изучения, создания и управления сложными (инженерными) системами, называется **системной инженерией** (systems engineering), или SE, которая объединяет принципы, методы, стандарты и инструменты, необходимые для разработки, анализа и управления сложными системами [1].

История системной инженерии началась в 1940-х годах, когда сложилось понимание того, что создание и использование таких сложных систем, как авиационные и ракетные системы, требуют интегрированного подхода к их разработке и управлению ими. Одним из пионеров системной инженерии считается американский инженер Джордж Бокс, который в 1950-х годах предложил концепцию «системного подхода» к решению проблем, связанных со сложными инженерными системами. В 1960-х годах в рамках программы космических исследований США были сформулированы основные принципы и методы системной инженерии, такие как анализ требований, анализ функциональности систем, архитектурное проектирование, верификация, испытания и т. д. Также были разработаны первые математические модели и инструменты для анализа и оптимизации систем.

Большую известность приобрели работы по кибернетике (Weiner, 1948) [2], системной динамике (Forrester, 1961) [3], математическим основам системной инженерии Wymore, A. 1967 [4], общей теории систем (Bertalanffy, 1968) [5], математической теории системной инженерии (W.A. Wymore, 1977) [6].

Именно с именем Уэйна Уаймора (W.A. Wymore), связывают одну из первых попыток формального определения модели системы с использованием математического аппарата, изложенной в [6]. Уаймор также создал строгую математическую основу для проектирования

систем в контексте моделей [7]. Такой подход стал называться методологией системного проектирования на основе моделей (Model-Based Systems Engineering – MBSE).

В последующие десятилетия SE продолжала развиваться и применяться в различных областях, включая авиацию, оборонную промышленность, транспорт, энергетику, информационные технологии и многие другие. Системные инженеры стали играть важную роль в проектировании и управлении сложными системами, обеспечивая их эффективное функционирование и развитие.

SE, которая сложилась до конца XX столетия, часто называют традиционной или **системной инженерией, основанной на документах (Document-Based Systems Engineering, или DBSE)**, ввиду того, что основными артефактами, сопровождающими систему на протяжении ее жизни, являлись документы на бумажных и/или машинных носителях.

С конца 1990-х специалисты по системному проектированию стали широко применять методы, основанные на моделях, используемых для облегчения коммуникации, управления сложностью дизайна, улучшения качества продукта, улучшения сбора и повторного использования знаний. Такой подход получил название **модельно-ориентированная системная инженерия (Model-Based Systems Engineering, или MBSE)**.

MBSE определяется как формализованное приложение графического моделирования с точными семантическими определениями для анализа операций, определения требований, разработки системного дизайна и действий по проверке, начиная с концептуальной фазы и продолжая на более поздних стадиях/этапах жизненного цикла [8].

Суть MBSE, или часто обобщаемой до цифровой инженерии (digital engineering – DE), заключается в создании машиночитаемых моделей, представляющих все аспекты системы и поддерживающих все действия по проектированию, разработке, производству и эксплуатации системы на протяжении всего ее жизненного цикла.

Эти компьютерные модели должны быть основаны на общих схемах данных, чтобы цифровой поток объединял все заинтересованные стороны, участвующие в создании или приобретении новых систем.

Стратегия цифрового инжиниринга предполагает, что она приведет к повышению эффективности и улучшению качества всей деятельности

по созданию и приобретению новых сложных систем. MBSE предоставляет возможность консолидировать информацию в доступном централизованном источнике, обеспечивая частичную или полную автоматизацию многих процессов системного проектирования и облегчая интерактивное представление компонентов и поведения системы.

В настоящее время SE является широко применяемой дисциплиной, с помощью которой решаются сложные технические и организационные проблемы. Она объединяет знания из различных областей, таких как математика, информатика, управление проектами, экономика и другие, и предоставляет инструменты и методы для анализа, проектирования и управления системами любого масштаба и сложности.

1.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Международный совет по системной инженерии (INCOSE) определяет **системную инженерию (SE)** как междисциплинарный подход и средства, позволяющие создавать успешные системы [9]. В SE основное внимание уделяется целостному и одновременному пониманию потребностей заинтересованных сторон, изучению возможностей и требований к системам, их синтезу, проверке, испытаниям и разработке решений при рассмотрении проблемы в целом, от исследования концепции систем до их утилизации [9].

Принципы, методологическая база и практики SE направлены на разработку больших, сложных и/или надежных **инженерных систем**, будь то продукты, услуги или предприятия.

Инженерная система определяется в SEBoK [1] как сочетание технологий и людей в контексте природных, социальных, деловых, общественных или политических сред, созданных, используемых и поддерживаемых для определенной цели.

Применение системного подхода к инженерным системам требует способности позиционировать проблемы или возможности в более широкой системе, содержащей их, создавать или изменять интересующую конкретную инженерную систему, а также понимать и справляться с последствиями этих изменений в соответствующей более широкой системе. В связи с этим важную роль играет понятие

системного контекста, которое используется для идентификации системных элементов и отношений между ними в рамках окружения (контекста) рассматриваемой инженерной системы.

Область деятельности, связанная с созданием и использованием инженерных систем, чрезвычайно многообразна и сложна. В связи с чем необходимо уточнить сферу применения SE и прежде всего определить взаимосвязи SE с такими дисциплинами, как внедрение/реализация систем (system implementation) и управление проектами/системами (project/systems management). В SEBoK область применения системной инженерии в жизненном цикле систем иллюстрируется с помощью диаграммы Венна [1], показывающей взаимосвязь между системной инженерией, реализацией систем и управлением проектами/системами и представленной на рис. 1.1.

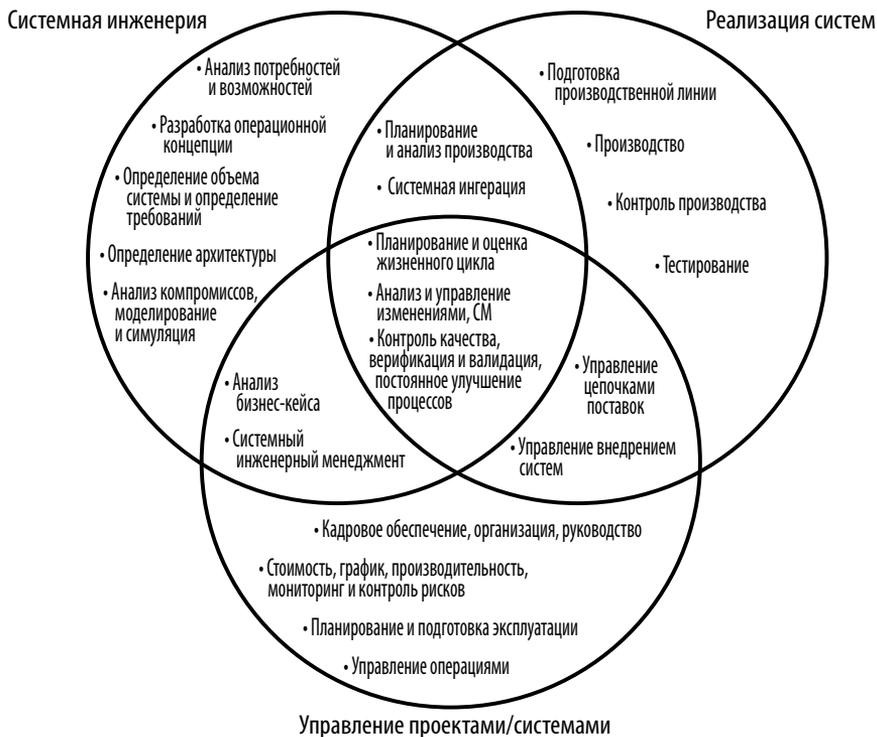


Рисунок 1.1. Взаимосвязь трех дисциплин – системной инженерии, реализации систем (system implementation), и управления проектами/системами (project/systems management) [1]

В частности, из рисунка видно, что такие виды деятельности, как заказ и установка оборудования производственной линии, а также его использование в производстве, находятся за пределами системной инженерии. Также из рисунка следует, что аспекты производства программного обеспечения системы не входят в SE, а включены в область реализации системы (system implementation). Таким образом, разработка программного обеспечения не считается подмножеством системной инженерии.

Как видно из рисунка область применения методов SE охватывает различные аспекты и деятельности жизненного цикла систем, включая:

- изучение возможностей (exploring opportunities);
- требования к документации (documenting requirements);
- синтез (synthesizing);
- проверка (verifying);
- испытания (validating);
- развитие решений при рассмотрении проблемы в целом, от исследования концепции системы до ее утилизации (from system concept exploration through system disposal), и пр.

1.3. ПОЛЬЗОВАТЕЛИ СИСТЕМНОЙ ИНЖЕНЕРИИ, ОБЛАСТЬ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМНЫХ ИНЖЕНЕРОВ

Первичными агентами SE, использующими методы SE, являются: системные инженеры, разработчики системы и основные внешние участники проекта, включая: пользователей, акционеров, внешних потребителей системных сервисов и возможностей.

Системные инженеры аккумулируют цифровые навыки, требуемые для выполнения задач SE. В случае отсутствия в проектах роли системного инженера, соответствующие этой роли навыки должны распределяться между членами команды разработчиков системы.

Под системным инженером понимается роль, которая призвана поддерживать процессы жизненного цикла системы, начиная с концептуального проектирования и продолжая на протяжении всего жизненного цикла системы, включающего ее производство, развертывание, эксплуатацию и утилизации. Системный инженер

должен анализировать проектные решения, выявлять и документировать потребности пользователей системы, осуществлять проверку и испытания системы, чтобы гарантировать, что ее функциональные, интерфейсные, рабочие, физические и другие качественные характеристики, а также стоимость сбалансированы для удовлетворения потребностей заинтересованных сторон системы. Системный инженер помогает обеспечить согласованность элементов системы для достижения целей в целом и, в конечном счете, удовлетворить потребности клиентов и других заинтересованных сторон, которые будут приобретать и использовать систему. Роль системного инженера иллюстрируется на рис. 1.2.

Для развертывания успешной системы системному инженеру, как правило, приходится взаимодействовать со специалистами разного профиля, поэтому ему могут потребоваться знания одной или нескольких областей инженерии, таких как, например, безопасность, надежность, доступность и проектирование удобства сервисов, электрическое и электронное оборудование, механика, транспорт, связь и пр. Такое взаимодействие позволяет определить реализацию детального проектирования подсистем и компонентов для разработки целостного технического решения, обеспечить возможность анализа относительных затрат и преимуществ альтернативных решений, синтезировать взаимоприемлемые решения.

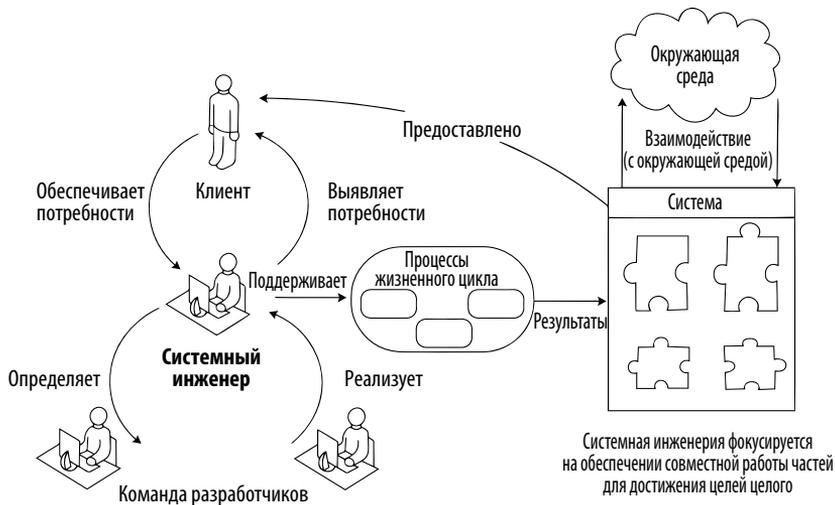


Рисунок 1.2. Роль системного инженера, которая заключается в определении системных требований, ограничений, распределений, поведения и структурных характеристик для удовлетворения потребностей клиентов [1]

Применение методов и средств SE дает возможность гарантировать то, что поставляемая с их помощью система является согласованным и эффективным решением системных потребностей.

В настоящее время наблюдается эволюция как роли, так и масштаба использования методов SE в направлении увеличения системных аспектов в жизненном цикле создаваемых инженерных систем.

Подытожим содержание роли системного инженера [1].

Роль системного инженера включает в себя:

- понимание предполагаемой цели, условий эксплуатации и концепции использования предлагаемой системы;
- оценка интересов, целей и ценностей множества заинтересованных сторон и объединение их в последовательное представление системных требований;
- понимание технологии, которая может быть применена в системе;
- оценка последствий жизненного цикла систем и включение аспектов жизненного цикла в проектирование систем;
- оценка, выбор и разработка системных решений для удовлетворения потребностей клиентов и целей проекта, таким образом, системные инженеры отвечают за выполнение задач по созданию систем требуемого качества.

Рис. 1.3 резюмирует обязанности агентов SE, их действий и артефактов в контексте жизненного цикла инженерной системы.

На рисунке для каждой основной фазы жизненного цикла проекта показаны деятельности, выполняемые первичными агентами и изменяющие состояние инженерной системы (Engineered System – ES).

- Основные стадии жизненного цикла проекта отображаются в крайнем левом столбце и включают: определения системы, разработку начальной эксплуатационной способности системы (system initial operational capability – IOC), а также эволюцию и вывод из эксплуатации системы.
- Первичные агенты отображаются столбцами верхней строки и включают: системных инженеров, разработчиков системы и основных внешних участников проекта (пользователи, владельцы, внешние системы), составляющие среду проекта.
- Созданная система (evolved system – ES), указанная в крайнем правом столбце, может быть продуктовой, сервисной и/или системой предприятия (поясняются ниже).

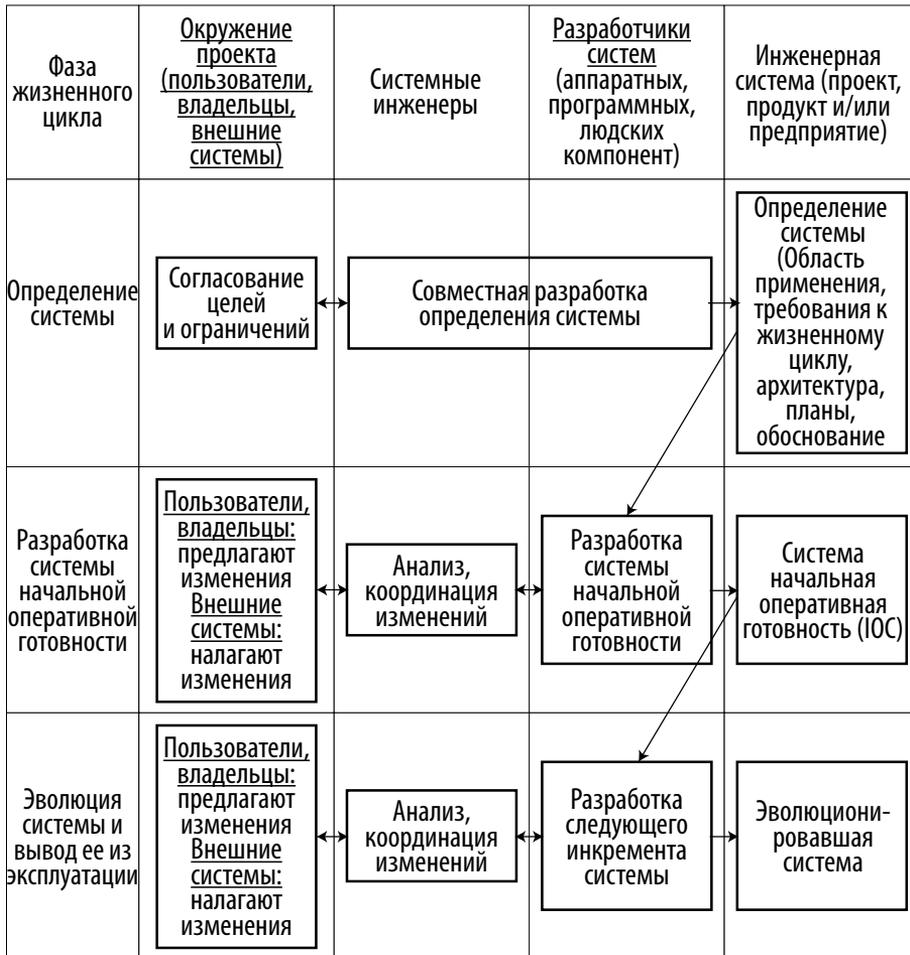


Рисунок 1.3. Контекст жизненного цикла проекта SE и инженерной системы и связанные с ними агенты, действия и артефакты. (SEBoK Original) [1]

1.4. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИСТЕМНОЙ ИНЖЕНЕРИИ. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД И СИСТЕМНОЕ МЫШЛЕНИЕ

Методической основой системной инженерии служит **системный подход**, который сформировался в 60-х годах XX века как методология общенаучных принципов и форм исследования сложных объектов и процессов. Главными принципами системного подхода можно считать следующие утверждения:

- система представляет собой единое целое, характеризующееся целевой функцией в объемлющей системе, и состоящее из двух или более элементов;
- элементы системы находятся во взаимосвязи и влияют на поведение системы, при этом влияние на поведение системы каждого элемента, зависит от того, как ведут себя другие элементы;
- каждый элемент системы может быть представлен как система элементов, которые действуют как часть целого.

Таким образом, система имеет эмерджентное поведение, которым отдельно взятые элементы системы не обладают.

Российскими учеными считается, что основоположником системного подхода был русский философ и писатель А.А. Богданов. В своей основной работе «Тектология. Всеобщая организационная наука», первый том которой вышел в 1912 г., Богданов попытался обобщить универсальные организационные законы, управляющие поведением и устройством принципиально любых сложных систем, рассматривая организационно-структурные отношения безотносительно к природе субстрата системы, а как общие для физических и биологических, так и для социальных и культурных систем. Тектология Богданова предвосхитила кибернетику Н. Винера и У. Эшби, общую теорию систем Л. фон Берталанфи и синергетику И. Пригожина [11].

Всеобщее признание системного подхода во многом связано с изданием австрийским биологом Л. фон Берталанфи книги «Общая теория систем» [12], по существу явившейся развитием положений и идей Богданова.

Предложенные Берталанфи основные понятия и принципы, такие как целостность, централизация, дифференциация, ведущая часть системы, закрытая и открытая системы, финальность, эквифинальность, рост во времени, относительный рост, конкуренция, стали использоваться для решения самых различных проблем.

В отличие от кибернетики, занимающейся анализом механизмов обратной связи, общую теорию систем интересует динамическое взаимодействие внутри систем со многими переменными. В частности, подвижное равновесие открытых систем характеризуется принципом эквифинальности, то есть в отличие от состояний равновесия в закрытых системах, полностью детерминированных начальными условиями, открытая система может достигать не зависящего от времени состояния, которое не зависит от ее исходных условий

и определяется исключительно параметрами системы. Также в открытых системах, в которых происходит перенос вещества, вполне возможен ввод отрицательной энтропии (негэнтропии). Поэтому подобные системы могут сохранять свой высокий уровень живучести и даже развиваться в сторону увеличения порядка и сложности.

Под **системным мышлением** понимается мыслительная деятельность, построенная на использовании принципов системного подхода, благодаря чему системное мышление дает возможность рассматривать сходство между системами из разных областей знаний с целью формирования общих системных принципов, понятий и моделей или паттернов, где под принципом понимается некоторое базовое обобщение, принимаемое за истинное, которое может использоваться в качестве основы для рассуждений или поведения; понятие — это абстракция, отображающая в мышлении единство существенных свойств и связей предметов; выделяющая и обобщающая сущности некоторого класса по общим и специфическим для них признакам; а модели или паттерны — это отражение наблюдаемых сходств, обнаруживаемых в системах разных типов и доменов.

Практическое применение системного мышления направлено на формирование абстрактных системных представлений или моделей исследуемых/создаваемых систем.

К характерным принципам системного мышления, называемых также системными принципами, относятся [1]:

- **Абстракция (Abstraction)** — сосредоточение внимания на основных характеристиках при решении проблем, что позволяет игнорировать несущественные, тем самым упрощая задачу.
- **Граница (Boundary)** — отделение системы от внешнего мира, служит для концентрации взаимодействий внутри системы, обеспечивает при этом обмен с внешними системами.
- **Изменения (Change)** — необходимы для роста и адаптации, и их следует принимать и планировать как часть естественного порядка вещей.
- **Дуализм (Dualism)** — распознавание двойственности и осмысление того, как она гармонирует или может гармонизироваться в контексте большего целого.
- **Инкапсуляция (Encapsulation)** — сокрытие внутренних частей и их взаимодействия от внешней среды.

- **Эквифинальность (Equifinality)** — в открытых системах одно и то же конечное состояние может быть достигнуто из разных начальных условий и разными способами (Берталанфи, 1968) [5].
- **Холизм или целостность (Holism)** — систему следует рассматривать как единое целое, а не просто как набор частей.
- **Взаимодействие (Interaction)** — свойства, возможности и поведение системы определяются ее частями, взаимодействием между этими частями и от взаимодействия с другими системами.
- **Иерархия слоев (Layer Hierarchy)** — эволюции сложных систем способствует их иерархическая структура (включая устойчивые промежуточные формы) и понимание сложных систем облегчается их иерархическим описанием.
- **Использование (Leverage)** — максимально возможное решение для узкого класса проблем или частичного решения для широкого класса проблем (общность).
- **Модульность (Modularity)** — несвязанные части системы должны быть разделены на модули, а связанные части системы должны быть сгруппированы вместе.
- **Сеть (Network)** — представляет собой фундаментальную топологию для систем, которая формирует основу единства, связи и динамического взаимодействия частей, определяющих поведение сложных систем.
- **Бережливость (Parsimony)** — выбор самого простого объяснения явления, которое требует наименьшего количества предположений.
- **Регулярность (Regularity)** — поиск и фиксация закономерностей в системах, потому что эти закономерности способствуют пониманию систем и облегчают системную практику.
- **Отношения (Relations)** — система характеризуется своими отношениями: взаимосвязями между элементами. Обратная связь — это тип отношения. Набор отношений определяет сеть системы.
- **Разделение проблем (Separation of Concerns)** — большая проблема решается более эффективно, если ее разбить на ряд более мелких проблем или проблем.
- **Сходство/различие (Similarity/Difference)** — Как сходства, так и различия в системах должны быть признаны и приняты такими, какие они есть.
- **Стабильность/изменение (Stability/Change)** — вещи меняются с разной скоростью, и сущности или концепции, находящиеся на стабильном конце спектра, могут и должны использоваться для руководящего контекста для быстро меняющихся объектов на изменчивом конце спектра.

- **Синтез (Synthesis)** — системы могут быть созданы путем «выбора (придумывания, проектирования, подбора) правильных частей, объединения их для правильного взаимодействия и организации этих взаимодействий для создания необходимых свойств целого, чтобы оно функционировало с оптимальной эффективностью в его операционной среде.
- **Представление (View)** — несколько представлений, каждое из которых основано на системном аспекте или проблеме, необходимы для понимания сложной системы или проблемной ситуации.

Многие авторы рассматривают системное мышление в качестве интеллектуального аппарата или движка системной инженерии, с помощью которого формируются собственные принципы SE.

Системные принципы отличаются от принципов SE (Watson 2018) [13]. Системные принципы касаются поведения и свойств всех видов систем, рассматривая научную основу системы и характеризуя эту основу в системном контексте с помощью общего набора системных принципов.

Принципы SE представляют собой специализированное и контекстуальное воплощение системных принципов, которые касаются подхода к реализации, использованию и выводу систем из эксплуатации. Принципы SE основаны на системных принципах, общих для всех видов систем.

На протяжении последних 30 лет многими авторами, рабочими группами, специализированными организациями велась активная деятельность по разработке наборов методических рекомендаций и принципов SE, ориентированных на различные виды деятельности в области SE.

Рабочая группа INCOSE по принципам системной инженерии (SEPAT) проанализировала различные источники системных принципов и принципов системной инженерии, выявленных в литературе за этот период [1].

Такие принципы SE представляют собой форму рекомендаций или руководящих указаний по реализации различных видов деятельности и процессов SE. Наборы таких руководящих указаний часто классифицируются по их источникам, например: эвристики (выведенные из практического опыта), условности (выведенные

из социальных соглашений), ценности (выведенные из культурных точек зрения) и модели (основанные на теоретических механизмах).

В качестве примера набора таких руководящих принципов SE, можно считать следующие положения, предложенные в работе (Hitchins 2009) [14]:

- **Принцип SE A: Системный подход** — «SE применяется к интересующей системе (systems-of-interest — Sol) в более широком системном контексте».
- **Принцип SE B: Синтез** — «SE должен собрать воедино набор частей для создания целостных системных решений».
- **Принцип SE C: Целостность** — «Всегда учитывайте последствия для более широкой системы при принятии решений об элементах системы».
- **Принцип SE D: Органическая аналогия** — «Всегда рассматривайте системы как имеющие динамическое «живое» поведение в окружающей среде».
- **Принцип SE E: Адаптивная оптимизация** — «Постепенное решение проблем с течением времени».
- **Принцип SE F: Прогрессивное снижение энтропии** — «Продолжайте заставлять системы работать с течением времени посредством обслуживания, поддержки и обновлений».
- **Принцип SE G: Адаптивное удовлетворение** — «Система добьется успеха только в том случае, если она сделает победителей из своего успеха критически важными, заинтересованными сторонами, поэтому жизненный цикл системы должен определяться тем, насколько хорошо ее результаты способствуют достижению целей заинтересованных сторон».

Принципы A-D рассматриваются как столпы SE, которые определяют ключевые аспекты системного мышления, которые должны лежать в основе практики SE. Принципы E-G учитывают динамику мышления о жизненном цикле SE, почему, когда и как часто применяется SE.

SEPAT (The INCOSE Systems Engineering Principles Action Team) разработал 15 принципов и 3 гипотезы, некоторые из которых расширены подпринципами, описанными в INCOSE (2022) [1]. Они были рецензированы несколькими профессиональными сообществами и представляют собой первые шаги к консенсусу в отношении принципов системной инженерии. Эти принципы таковы.

1. SE при использовании определяется потребностями заинтересованных сторон, пространством решений, результирующими системными решениями и контекстом на протяжении всего жизненного цикла системы.
2. SE имеет целостное системное представление, которое включает системные элементы и взаимодействия между ними, обеспечивающие системы и системную среду.
3. SE влияет и находится под влиянием внутренних и внешних ресурсов, а также политических, экономических, социальных, технологических, экологических и правовых факторов.
4. И политика, и закон должны быть правильно поняты, чтобы не ограничивать чрезмерно или недостаточно ограничивать внедрение системы.
5. Реальная система – это совершенное представление системы (модели являются только приближенными представлениями реальных систем).
6. В центре внимания SE находится все более глубокое понимание взаимодействий, чувствительности, поведения системы и ее операционной среды, потребностей заинтересованных сторон.
7. SE удовлетворяет изменяющиеся потребности заинтересованных сторон в течение жизненного цикла системы.
8. SE удовлетворяет потребности заинтересованных сторон, принимая во внимание бюджет, график и технические потребности, а также другие ожидания и ограничения.
9. Решения SE принимаются в условиях неопределенности с учетом риска.
10. Качество решения зависит от знаний о системе, обеспечивающих системах и взаимодействующих системах, присутствующих в процессе принятия решения.
11. SE охватывает весь жизненный цикл системы.
12. Сложные системы разрабатываются сложными организациями.
13. SE эффективно интегрирует инженерные и научные дисциплины.
14. SE отвечает за управление взаимодействием между дисциплинами внутри организации.
15. SE основана на наборе теорий среднего уровня (направление развития теории в области между «частными рабочими гипотезами» и «основными концептуальными схемами»).

1.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ: КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПОНЯТИЯ «СИСТЕМА»

Центральными понятиями в SE является понятие системы и связанные с ним термины.

Система — это набор взаимодействующих элементов (Берталанфи, 1968 г.) [5].

Сущность системы — это «совместность», сближение различных частей и отношений, которые они образуют, чтобы создать новое целое. Сплоченное взаимодействие между набором частей предполагает **границу системы** и определяет, что означает членство в системе.

Для **закрытых систем** все аспекты системы существуют в пределах этой границы.

Граница **открытых систем** определяет элементы и отношения, которые можно считать частью системы, и описывает, как эти элементы взаимодействуют через границу с соответствующими элементами в окружающей среде.

Структура системы описывает набор элементов системы и допустимые отношения между ними.

Поведение системы относится к эффектам или результатам, возникающим при взаимодействии экземпляра системы со своим окружением.

Допустимая конфигурация отношений между элементами называется **состоянием системы**.

Стабильная система — это система, которая возвращается в исходное или другое стабильное состояние после возмущения в окружающей среде.

Сущности системного целого часто проявляют **эмерджентность**, поведение, которое имеет смысл только тогда, когда оно приписывается целому, а не его части.

Системный контекст описывает все внешние элементы, которые взаимодействуют через границу конкретной **целевой системы** или **системы интереса (SoI)**, и дает достаточное представление

целое, характеризующееся целевой функцией в объемлющей системе, и состоящее из двух или более элементов.

Системы могут быть **Закрытыми (Closed Systems)** и **Открытыми (Open Systems)**.

Открытые системы, описываемые набором элементов и взаимосвязей, используются для описания многих явлений реального мира. Открытые системы взаимодействуют с другими системами. Закрытые системы отличаются от открытых тем, что не взаимодействуют с окружающей средой.

Системы состоят из **Элементов системы (System Elements)**, которые связаны в некоторую **Структуру (Structure)**. Элементы системы могут быть **естественными** или **природными, социальными, абстрактными (Natural, Social, Abstract)** или **техническими (Technical)**.

Инженерная система (Engineered System) определяется в SEBoK как сочетание технологий и людей в контексте природных, социальных, деловых, общественных или политических сред, созданных, используемых и поддерживаемых для определенной цели. Таким образом Инженерная система, как, впрочем, и любая система, может иметь цель (Purpose), для достижения которой она создана.

Понятие **системного контекста** позволяет идентифицировать все системные элементы и отношения, необходимые для его поддержки.

Понятие системного контекста и связанных с ним понятий представлены на рис. 1.5.

Системы могут объединяться в **Группы систем (Group of Systems)**, которые могут быть следующих типов:

- Продуктовыми системами (Product Systems).
- Сервисными системами (Service Systems).
- Системами предприятий (Enterprise Systems).
- Системами систем (Systems of Systems).

Определения для этих понятий приводятся ниже.

Открытые системы обладают **Поведением, Свойствами, Функциями (Behavior, Properties, Function)**, которые проявляются благодаря воздействию **Окружения систем (Environment)** и характеризуются **Эмерджентностью (Emergence)** и **Сложностью (Complexity)**.

Среда

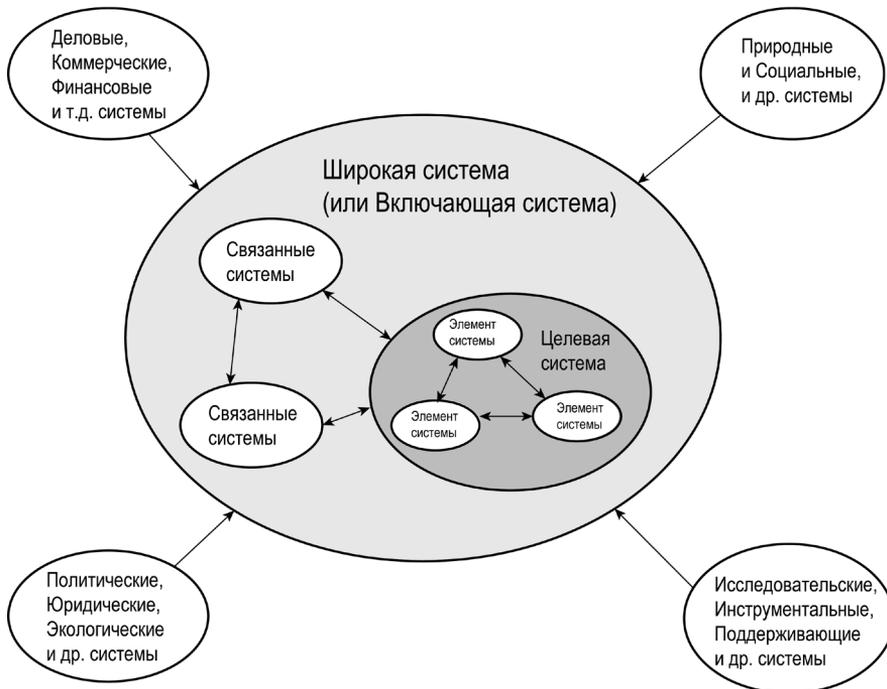


Рисунок 1.5. Общее описание системного контекста (System Context) [1]

Далее будем использовать следующую простую классификацию элементов системы:

- Элементы природной системы (Natural Systems) — объекты или понятия, которые существуют вне какого-либо практического человеческого контроля. Примеры: действительная система счисления, солнечная система, планетарные системы циркуляции атмосферы.
- Элементы социальной системы (Social Systems), будь то абстрактные человеческие типы или социальные конструкты, или конкретные индивидуумы или социальные группы.
- Элементы технологической системы (Technological Systems), искусственные артефакты или конструкции; включая физическое оборудование, программное обеспечение и информацию.

В действительности между этими типами систем нет четких границ: например, естественные системы управляются социальными системами, развиваются ими и часто содержат социальные системы,

которые зависят от технических систем. Системы, которые содержат технические и человеческие или природные элементы, часто называют **социотехническими** системами.

Многие природные и социальные системы изначально формируются как простые структуры, образованные связями между их элементами. На протяжении времени они будут иметь тенденцию сохранять эту структуру, а также объединяться и развиваться дальше в более сложные стабильные состояния, чтобы быть устойчивыми к изменениям окружающей среды.

Именно во взаимодействии со своим окружением (средой) система проявляет свою эмерджентность, свои функциональные цели. При этом окружение, в котором находится конкретная система, и элементы этой системы сами могут рассматриваться как открытые системы.

Понятие **Окружения системы (System Environment)** является одним из центральных в SE, оно определяет **Системный контекст (System Context)**, в котором существует и функционирует конкретная система.

Система, окружение которой рассматривается, называется **Системой интереса (System of Interest – Sol)** интересующей системой или **целевой системой**.

Системный контекст описывает все внешние элементы, которые взаимодействуют через границу конкретной Sol. Для понимания системы кроме представления об элементах внутри ее границ важно понять Sol как часть более широкой системы в целом, а также понять контекст, в котором находится Sol, и более широкую систему и системы в среде, которые на них влияют.

Это понятие и связанные с ним понятия иллюстрируются на рис. 5, на котором используются следующие понятия:

Целевая система или **Sol** — система интереса.

Системный элемент (System Element) — некоторая идентифицированная часть Sol.

Объемлющая система (Wider System или Containing System) — система, в которую входит целевая система в качестве элемента и содержащая системы-элементы, связанные с целевой системой.

Окружение системы — охватывающие объемлющую систему и влияющие на нее через ее границы внешние системы и процессы, включая: коммерческие, финансовые системы, бизнес-системы, политические и правовые системы, природные и социальные системы, исследовательские и проектные системы.

Как отмечалось выше, наибольший интерес для практики представляют собой **инженерные системы** (Engineered Systems). Инженерная система определяет контекст, содержащий как технологии, так и социальные или природные элементы, разработанные для определенной цели инженерным жизненным циклом.

Инженерные системы обычно:

- определяются своей целью, задачей или миссией;
- имеют жизненный цикл и динамику эволюции;
- могут включать людей-операторов (взаимодействующих с системами посредством процессов), а также другие социальные и природные компоненты, которые необходимо учитывать при проектировании и разработке системы;
- являются частью иерархии системы интересов.

Спроектированные системные контексты создаются, используются и поддерживаются для достижения цели, задачи или миссии системы в интересах заинтересованных лиц. Для их поддержания требуется выделение ресурсов для разработки и сопровождения. Они существуют в среде, которая влияет на характеристики, использование, поддержку и создание системы.

Любая инженерная система является центром своего жизненного цикла.

Исторически экономисты делят всю экономическую деятельность на две широкие категории: товары и услуги. Отрасли, производящие товары, — это сельское хозяйство, горнодобывающая промышленность, производство и строительство и пр., каждая из которых создает некоторый материальный объект. Сфера услуг включает в себя все такие отрасли, как: банковское дело, связь, оптовую и розничную торговлю, медицину, все государственные услуги, включая защиту и правосудие.

Инженерные системы разрабатываются как комбинации продуктов и услуг в течение жизненного цикла.

На рис. 1.6 дается общее представление о полном контексте любого потенциального применения жизненного цикла SE.

В этом примере система обслуживания (Service System), связанная непосредственно с потребителями (клиентами), устанавливает общую границу. В рамках этой границы обслуживания находятся сопутствующие услуги, продукты и люди (или интеллектуальные программные агенты), необходимые для полного обеспечения этой потребности.

Окружающая среда включает в себя людей, организации, правовые основы или условия, которые влияют или ограничивают сервисную систему или ее элементы. Анализ этого общего контекста на любой стадии жизненного цикла Sol позволяет поддерживать целостное представление о решаемой проблеме.

Системный контекст Sol является основой для принятия эффективных системных инженерных решений на протяжении всей жизни Sol.

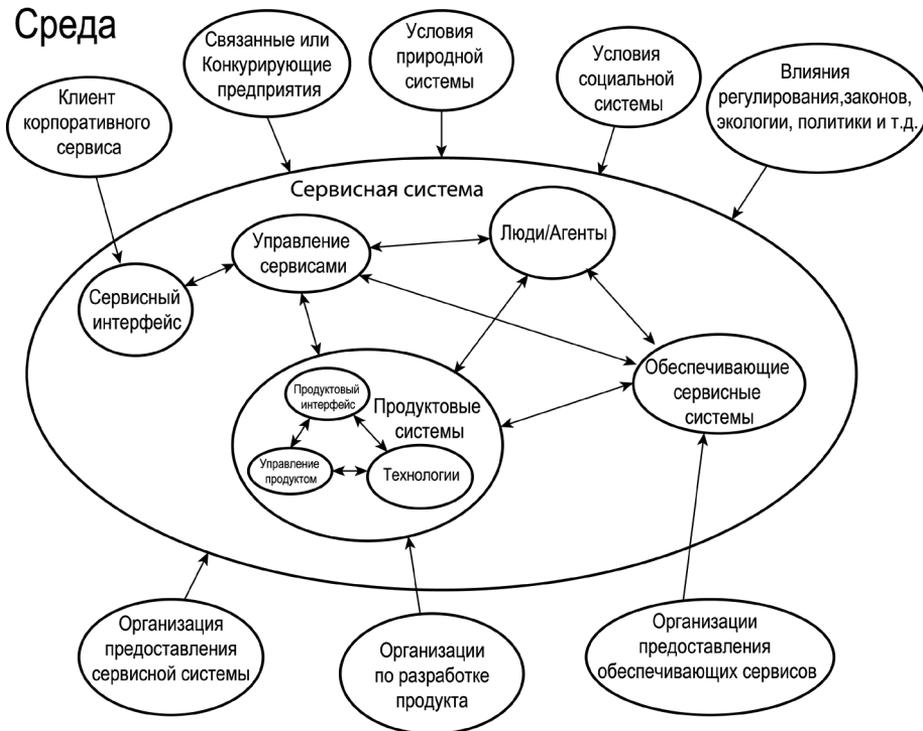


Рисунок 1.6. Контекст типовой инженерной системы [1]

Теперь вернемся к рассмотрению определений для понятий: Продуктовая система (Product System), Сервисная система (Service System), Система предприятия (Enterprise System), Система систем (System of Systems).

Продуктовая система, или Система продукта (Product System, или product-service system (PSS)), — это инженерная система, жизненный цикл которой направлен на разработку и доставку продуктов в качестве непосредственной услуги потребителю. Контекст жизненного цикла продуктовых Sol будет содержать вспомогательные обеспечивающие системы, сопутствующие продукты, людей и другие сущности, связанные с продуктовой системой. При этом люди (например, операторы, специалисты по сопровождению, производители и т.д.) не входят в Sol, поскольку они не поставляются как часть продукта. Однако для успешной разработки продукта, важно рассматривать все интерфейсы людей и их влияние на функционирование Sol. Контекст продуктовой Sol также включает сервисные системы, в которых он будет развернут. Рассмотрение более широкого контекста, в рамках которого должна действовать Sol, позволяет сохранять корректность функционирования этого контекста при внесении изменений в поддерживающие услуги и жизненный цикл продукта.

Услугу или сервис (servic) можно определить, как непосредственный акт предоставления возможности или продукта, требуемого одним или несколькими пользователями (например, транспорт, связь, защита, обработка данных, бытовые услуги и др.).

Сервисная система или система услуги (Service System), — это инженерная система, созданная и поддерживаемая организацией, которая обеспечивает услугу в виде результата для клиентов внутри предприятия (или в более широкой структуре). При этом контекст сервисной системы содержит те же виды системных элементов, что и контекст продуктовой системы. Жизненный цикл сервисной системы может внести изменения в развертывание и использование существующих продуктов и других сервисов.

Предприятие (Enterprise System) — это одна или несколько организаций или отдельных лиц, разделяющих определенную миссию, цели и задачи, чтобы предложить результат, такой как продукт или услуга.

Система предприятия состоит из целенаправленной комбинации взаимозависимых и взаимодействующих ресурсов (например, людей, процессов, систем, организаций, вспомогательных технологий,

финансовых ресурсов) и среды для достижения операционных целей с помощью реализации сети взаимодействий [1].

Предприятия – уникальные системы, которые уникальны тем, что они постоянно развиваются. Как правило, они преследуют цель обеспечить акционерную стоимость и удовлетворенность клиентов, функционируя в контексте (или среде), который плохо определен и постоянно меняется. Несмотря на динамичность структуры и функций предприятия, на отдельных стадиях его жизненного цикла может оказаться полезным построение его моделей с помощью описания системных контекстов предприятия. Такие модели называются **архитектурами предприятия**.

Понятие **Система систем (System of systems – SoS)**, или **федерация систем (Federation of Systems – FoS)**, используется, когда продуктовые и сервисные системы определены в виде иерархии элементов Sol, при этом с собственными целями и жизненными циклами. Понятие SoS может применяться к любому из вышеперечисленных контекстов жизненного цикла, особенно для контекстов сервиса и предприятия.

Среда

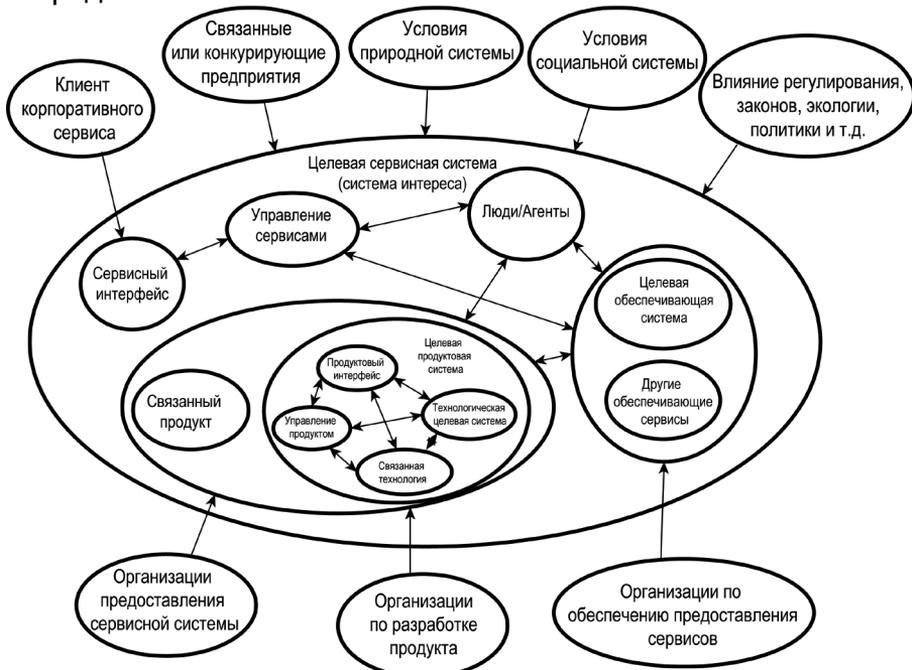


Рисунок 1.7. Общие случаи Sol: Продуктовые системы Sol (Product Sol), Сервисные Sol (Service Sol), Технологические Sol (Technological) [1]

Примером SoS может служить мультипродуктовая система, показанная на рис. 1.7.

На рис. 1.7 показаны общий случай SoS, содержащая продуктовые Sol, сервисные Sol, технологические Sol (как вспомогательные системы для продуктовых Sol, встроенные в один или несколько интегрированных продуктов). По существу, данная SoS представляет собой интегрированную мультитехнологическую продуктовую Sol, предоставляющую услуги по удовлетворению спроса продукцией, выпускаемой продуктовой системой и использующей при этом **обеспечивающие сервисы (Enabling Services)**.

1.6. ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ СИСТЕМ И ПРОЦЕССЫ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

В этом разделе познакомимся со следующими понятиями: Жизненный цикл систем (system life cycle), Модель жизненного цикла (life cycle model) и Процессы жизненного цикла (life cycle processes).

Термин «жизненный цикл» заимствован системной инженерией из естественных наук, где он используется для описания изменений, которые проходит организм в течение своей жизни. В SE понятие жизненного цикла применяется аналогичным образом для описания полной жизни экземпляра Sol, а под моделью жизненного цикла понимается основной набор **стадий**, через которые проходит Sol, от ее задумки, проектирования, создания и до вывода из эксплуатации.

Сначала рассмотрим еще одну концептуальную модель SE, которая связывает указанные выше новые понятия с уже введенными ранее понятиями. Это сделаем с помощью диаграммы, показанной на рис. 1.8.

На этой диаграмме представлены взаимосвязи следующих понятий:

Центральное понятие — это **Система** — как единое целое, характеризующееся целевой функцией в объемлющей системе, и состоящее из двух или более элементов.

Системы состоят **из Системных элементов (System Elements)** и обладают **Поведением (Behavior)** и **Свойствами (Properties)**.

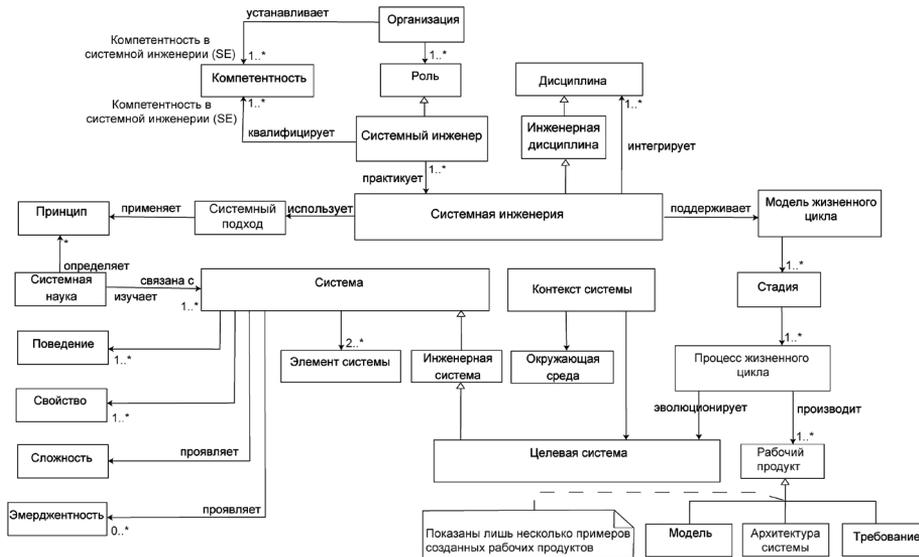


Рисунок 1.8. Core SEBoK Concepts [1]

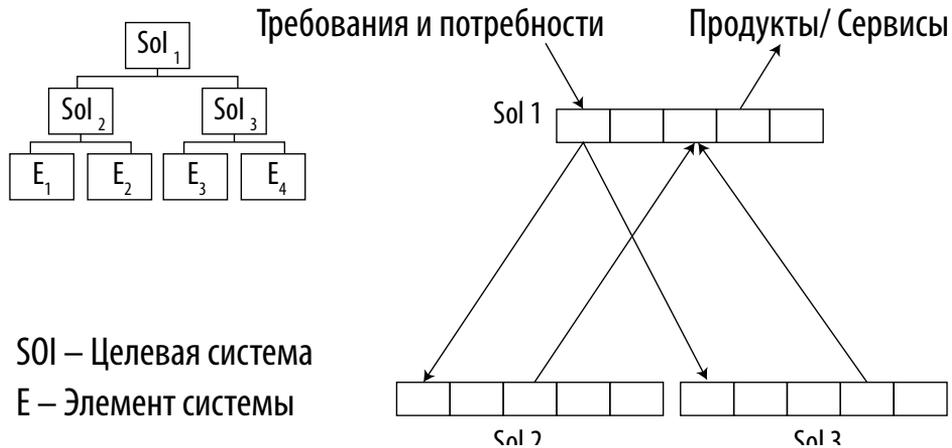
Системы могут характеризоваться **Эмерджентностью (Emergence)** и **Сложностью (Complexity)**.

Системный инженер — это **Роль** в **Организации**, которая практикует SE, в этой роли он обладает квалификацией, состоящей из набора соответствующих **Компетенций SE**.

Системная инженерия объединяет другие дисциплины для поддержки **Модели жизненного цикла**.

Модель жизненного цикла состоит из **Стадий (Stages)** жизненного цикла, которые обычно включают стадии: концепции, реализации, производства, поддержки, использования и вывода из эксплуатации Sol (не показаны).

Каждая стадия жизненного цикла связана с **Процессами жизненного цикла (Life Cycle Processes)**, которые производят различные виды **рабочих продуктов (Work Products)**, включая **Модели (Models)**, **Системную архитектуру (System Architecture)**, **Требования (Requirements)**.



Sol – Целевая система
E – Элемент системы

Рисунок 1.9. Общая парадигма SE: [1]

Процессы жизненного цикла, собственно, и реализуют разработку и использование целевой системы (Sol).

Концепция жизненного цикла Sol иллюстрируется на рис. 1.9. В левой части рис. 1.9 показано структурное разбиение Sol 1 на основные элементы, которые в данном случае также являются системами (Sol 2 и Sol 3). Эти две системы состоят из системных элементов, структура которых не детализируется. В правой части рис. 1.9 каждая Sol имеет соответствующую модель жизненного цикла, состоящую из стадий, заполненных процессами жизненного цикла.

Назначение этих процессов состоит в том, чтобы определить работу, которая должна быть выполнена при реализации жизненного цикла системы, и связанные с ней артефакты, которые необходимо произвести. В подходе, основанном на моделях, эти артефакты фиксируются в модели Sol, в частности, могут быть распределены по разным системным элементам. Работа, выполняемая в процессах и стадиях, может выполняться параллельно в рамках жизненного цикла, а также среди множества жизненных циклов.

Концепция жизненного цикла Sol обеспечивает фундаментальную основу для применения SE к различным типам систем.

Общая модель жизненного цикла системы

Не существует единой универсальной модели жизненного цикла системы, которая могла бы предоставить конкретные рекомендации

для всех проектных ситуаций. На рис. 1.10 представлена некоторая общая модель жизненного цикла [1], в которой определен набор наиболее характерных стадий, в рамках которых выполняются технические и управленческие процессы. Стадии завершаются оценкой выполненной работы и принятием решений, перейти ли к следующей стадии, остаться ли на текущей стадии для повторения отдельных работ или изменить/прекратить проект. Более подробно модели жизненного цикла систем рассматриваются в главе 2.

Рассмотрим кратко представленные на рис. 1.10 стадии.

Стадия определения концепции начинается с решения вопроса об инвестировании создания некоторой системы (Sol). В частности, исследуется: целесообразность, возможность разработки, преимущество создания Sol, стоимость затрат на жизненный цикл Sol и др.

Стадия определения системы включает разработку системных архитектур; определение и согласование уровней системных требований; разработку планов жизненного цикла и выполнение системного анализа, чтобы показать совместимость и осуществимость итогового определения системы.

Стадия реализации системы начинается если есть уверенность, что создание Sol оправдывает выделение ресурсов, необходимых для разработки и поддержания начальной операционной способности (IOC) или разработки полной эксплуатационной способности (FOC). Деятельности стадии включают: создание элементов системы, проверку и испытание элементов, их интеграцию и подготовку к производству и др.

Последующими стадиями жизненного цикла являются: **Производство системы (Production)**, **Поддержка (Support)**, **Использование (Utilization)** и **снятие с эксплуатации (Retirement)**.

Далее рассмотрим важные понятия жизненного цикла.



Рисунок 1.10. Обобщенная модель жизненного цикла Sol [1]

Процесс — это последовательность действий или шагов, принятых для достижения определенной цели и преобразующих входные данные в выходные. Процессы могут выполняться людьми или машинами. Представление всей проектной и эксплуатационной деятельности в виде совокупности взаимосвязанных процессов называется **процессным подходом**.

Процессы жизненного цикла могут быть разных видов, в частности, техническими (например, проектирование, тестирование, документирование), управленческими (например, планирование, принятие решений), бизнес-процессами или производственными потоками (например, рациональный унифицированный процесс (RUP), процессы, связанными с услугами и бизнес-операциями предприятия).

Требование — это то, что необходимо или желательно, ожидать от Sol или ее жизненного цикла. Требования могут относиться к характеристикам или ограничениям продукта или процесса. Требования могут определяться на всех конструктивных уровнях предприятия или систем. Это варьируется от самого высокого уровня возможностей предприятия или потребностей клиентов до самого низкого уровня проектирования системы.

Архитектура относится к организационной структуре системы, при этом система может быть определена в различных контекстах. Архитектура — это искусство или практика проектирования структур.

Архитектура — важнейший рабочий продукт жизненного цикла Sol, определяющий основные компоненты системы и их взаимосвязи.

Виды процессов жизненного цикла: например анализ, интеграция, проверка, валидация, развертывание, эксплуатация, техническое обслуживание и утилизация. Важно отметить, что выполнение операций процесса не разбивается на отдельные стадии жизненного цикла.

На рис. 1.11 показана простая иллюстрация жизненного цикла технических и управленческих процессов. На этом рисунке демонстрируется метод «горбовой диаграммы», представляющий собой удобный инструмент для планирования и анализа процессов жизненного цикла.

Линии на этой диаграмме представляют объем деятельности для каждого процесса в течение общего жизненного цикла. Пики (или горбы) деятельности представляют собой периоды, когда деятельность процесса становится основным фокусом стадии. Деятельности

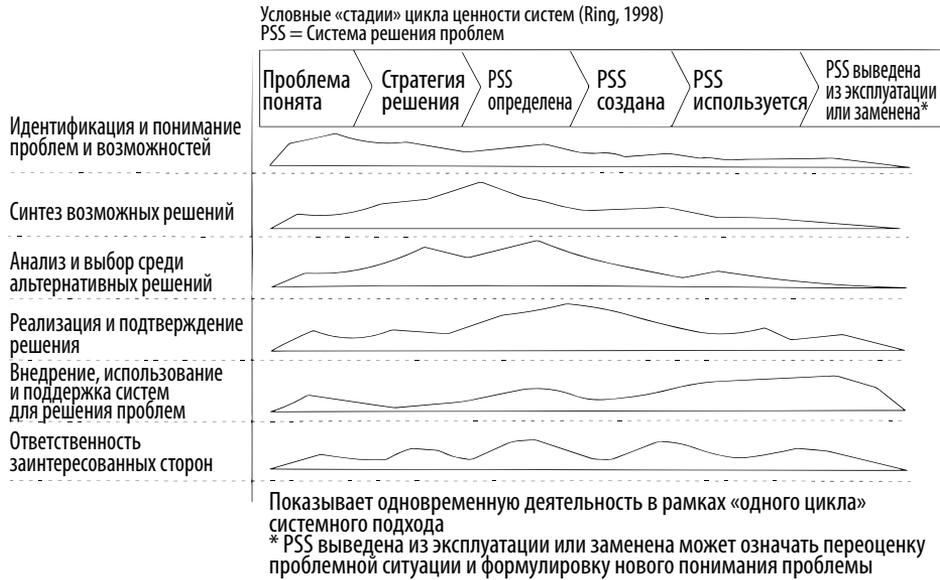


Рисунок 1.11. Процессы жизненного цикла [1]

до и после этих пиков может отражать жизненные проблемы, поднятые фокусом процесса, например, насколько вероятные ограничения обслуживания будут представлены в системных требованиях. Эти соображения помогают сохранить более целостную перспективу на каждой стадии или могут представлять собой перспективное планирование, чтобы гарантировать, что ресурсы, необходимые для выполнения будущих действий, будут включены в оценки и планы. Например, все ресурсы, необходимые для проверки, имеются или доступны. Применение метода горбовой диаграммы считается крайне важным для управления жизненным циклом системы.

1.7. ИТЕРАТИВНОСТЬ СТАДИЙ И ПРОЦЕССОВ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СИСТЕМ

Концепция итерации применяется к стадиям жизненного цикла в модели жизненного цикла, а также к процессам. Ниже, на рис. 1.12, показан пример итерации процессов жизненного цикла, связанных со стадиями определение концепции и определение системы.

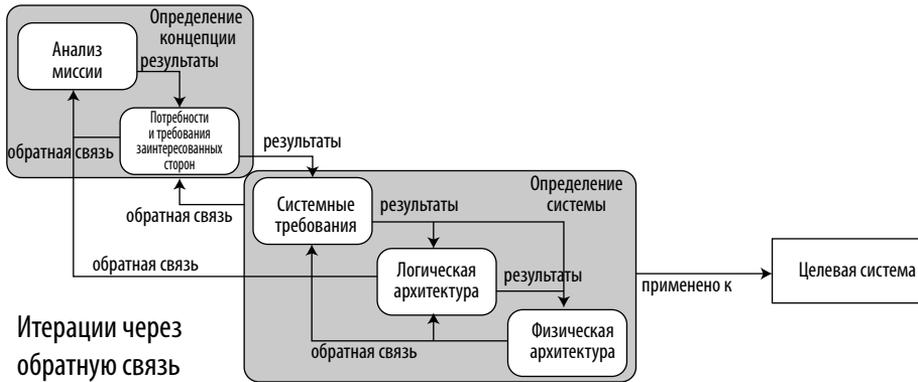


Рисунок 1.12. Пример итерации процессов жизненного цикла, связанных со стадиями определение концепции и определение системы [1]

На рис. 1.13 показан пример итерации между другими процессами жизненного цикла.

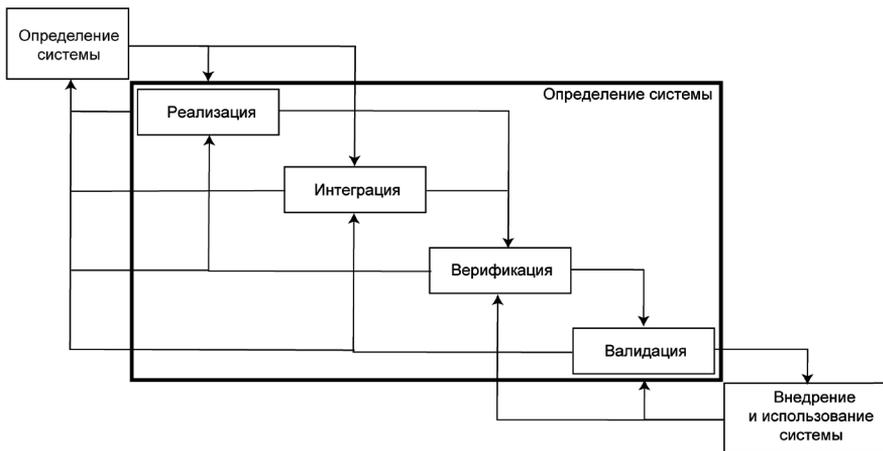


Рисунок 1.13. Пример итерации между другими процессами жизненного цикла [1]

Заключение

В водной главе рассмотрены такие вопросы как: определения основных понятий системной инженерии, история системной инженерии (SE), область применения SE, пользователи SE, область деятельности системных инженеров. Также рассмотрены методологические основы SE, включая: системный подход, системное мышление и системные принципы, принципы SE. С помощью концептуальных моделей рассмотрены понятия систем и связанные с ними понятия. Приведена классификация систем, включая продуктовые системы, сервисные системы, системы предприятий, системы систем. Рассмотрена концепция жизненного цикла систем, а также модели жизненных циклов систем и их стадии. В заключение представлена общая модель жизненного цикла системы, определены понятия процесса жизненного цикла, требований к системам, архитектура системы. Таким образом, в главе представлен достаточно емкий набор основных понятий SE, необходимых для дальнейшего изучения предмета SE.

Вопросы для самопроверки

- Определения инженерных систем и системной инженерии
- Основные вехи в история системной инженерии
- Область применения SE и связь ее с другими смежными областями
- Пользователи SE, роль и область деятельности системных инженеров
- Суть системного подхода
- Системное мышление и системные принципы
- Принципы системной инженерии
- Понятие системы и связанных с ним понятий
- Классификация инженерных систем
- Понятие жизненного цикла систем, модель жизненных циклов систем
- Общая модель жизненного цикла системы
- Понятие процесса жизненного цикла, процессного подхода, требований к системам и архитектуры системы

Литература

[1] Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK), version 2.7. 2022.

[2] Wiener, N. 1948. Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine / N. Wiener. — New York, NY, USA: John Wiley & Sons Inc].

- [3] Forrester, J. 1961. *Industrial Dynamics* / J. Forrester. — Winnipeg, Manitoba, Canada: Pegasus Communications].
- [4] Wymore, A. 1967. *A Mathematical Theory of Systems Engineering: The Elements* / A. Wymore. — New York, NY, USA: John Wiley.
- [5] Bertalanffy, L. von. 1968. *General System Theory: Foundations, Development, Applications* / L. Bertalanffy. New York, NY, USA: George Braziller].
- [6] Wymore, A. W. 1977. *A Mathematical Theory of Systems Engineering: The Elements* / A. W. Wymore. Huntington, NY, USA: Robert E. Krieger].
- [7] Wymore, A.W. 1993. *Model-Based Systems Engineering* / A.W Wymore. — Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Inc].
- [8] *Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities, Fourth Edition*, INCOSE, 2015.
- [9] {INCOSE. 2012. *INCOSE Systems Engineering Handbook, version 3.2.2*. San Diego, CA, USA: International Council on Systems Engineering (INCOSE), INCOSE-TP-2003-002-03.2.2}.
- [10] Блауберг, И.В. Становление и сущность системного подхода / И.В. Блауберг, Э.Г. Юдин. — М.: Изд-во «Наука», 1973. — 272 с.
- [11] Локтионов, М.В. А.А. Богданов как основоположник общей теории систем. *Философия науки и техники 2016* / М.В. Локтионов. — Т. 21. — № 2. С. 80–96 УДК 141.2? *Philosophy of Science and Technology 2016*, — Vol. 21, no 2, pp. 80–96 DOI: 10.21146/2413-9084-2016-21-2-80-96.
- [12] Берталанти, Л. *Общая теория систем — критический обзор* / Л. Берталанти // *Исследования по общей теории систем: Сб. пер. / общ. ред. и вст. ст. В.Н. Садовского и Э.Г. Юдина; пер. с англ. Н.С. Юлиной.* — М.: Прогресс, 1969. — С. 23–82.
- [13] Watson, M.D. 2018a. *Engineering elegant systems: Postulates, principles, and hypotheses of systems engineering* / M.D. Watson. — AIAA Complex Aerospace Systems Exchange (CASE) 2018, Future of Systems Engineering Panel, Orlando, FL, September 2018.
- [14] Hitchens, D. 2009. *What are the general principles applicable to systems?* / D. Hitchens. — INCOSE Insight, — Vol. 12, no. 4. — P. 59–63.

СОДЕРЖАНИЕ

Глава 1.	
Введение в SE. Основные понятия	23
Глава 2.	
Модели жизненного цикла систем	57
Глава 3.	
Модели итеративного процесса разработки программного обеспечения	91
Глава 4.	
Характерные черты и возможности языка UML	121
Глава 5.	
Язык моделирования SysML и его применение для разработки моделей систем	157
Глава 6.	
Инженерия требований	187
Глава 7.	
MBSE — системная инженерия на основе моделей	233
Глава 8.	
Описание архитектуры системы	257
Глава 9.	
Цифровые двойники	301
Глава 10.	
Система стандартов SE. Процессные стандарты	361
Глава 11.	
Эталонная модель модельно-ориентированной системной и программной инженерии (MBSSE) и ее связь с процессными стандартами системной инженерии	405
Глава 12.	
Интеграция системы и программного обеспечения. Методические аспекты	437
Глава 13.	
Математические основы системной инженерии	469
Приложение А	537
Приложение Б	590
Приложение В	618
Приложение Г	656
Приложение Д	664

Reviewers

M.A. Posypkin – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Director of the FRC ICS RAS

D.E. Namiot – Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher of the Faculty
of Computational Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University

Sukhomlin V. A., Romanov V. Yu., Gapanovich D. A.

Introduction to Model-Based Systems and Software Engineering (MBSSE) : Textbook / V.A. Sukhomlin, V.Yu. Romanov, D.A. Gapanovich. – Moscow : The Internet Media League Foundation; MAKS Press, 2024. – 672 c.

ISBN 978-5-317-07289-6

<https://doi.org/10.29003/m4300.978-5-317-07289-6>

Systems engineering is a transdisciplinary scientific and applied direction that combines the principles of a systems approach, methods, tools and standards that provide an integrated methodology and relevant technologies for the design and development of complex systems, their comprehensive analysis and verification, efficient and safe use. The modern approach to systems engineering is characterized by an accentuated modeling of systems throughout their life cycle with the ultimate goal of creating their digital twins. It is called model-based systems engineering (MBSE). Consistent integration of MBSE with software engineering leads to the formation of the MBSSE (Model-Based Systems and Software Engineering) direction. This textbook is devoted to this area, the main objective of which is to study the conceptual and scientific-methodological foundations of MBSE and MBSSE, models and methods of life cycle management of systems and software, basic standards of systems engineering, study and mastery of the UML and SysML systems modeling languages and the corresponding modeling tools, study of requirements engineering methods and development of a description of the system architecture, familiarization with the concept of digital twins and their role in MBSE, study of the MBSSE reference model and its relationship with the process standards of systems engineering, study of the methodological aspects of the system and software integration process. The final chapter of the textbook is devoted to the study of the mathematical foundations of systems engineering. The main aspects of the mathematical theory of systems by A. Wayne Wymore, which became an important stimulus for the development of the model-oriented approach in systems engineering, and modern research, including the apparatus of finite automata by David Harel, the formalism of modeling of discrete systems DEVS, research into category theory as a formal mathematical basis for model-based system design are considered. The authors recommend this course as a basic course for training IT professionals.

Keywords: Systems engineering, SE, model-based systems engineering, MBSE, MBSSE, requirements engineering, systems architecture, digital twins, systems and software integration, SysML, UML.

Об авторах

Сухомлин Владимир Александрович, заведующий лабораторией открытых информационных технологий факультета вычислительной математики и кибернетики, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» (119991, Российская Федерация, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1), доктор технических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9468-7138>, sukhomlin@mail.ru

Романов Владимир Юрьевич, старший научный сотрудник лаборатории открытых информационных технологий факультета вычислительной математики и кибернетики, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» (119991, Российская Федерация, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1), кандидат физико-математических наук, ORCID: orcid.org/0000-0001-5140-9576, vladimir.romanov@gmail.com

Гапанович Дмитрий Антонович, ведущий программист лаборатории открытых информационных технологий факультета вычислительной математики и кибернетики, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» (119991, Российская Федерация, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3222-694X>, dim.gapanovich@gmail.com

Vladimir A. Sukhomlin, Head of the Open Information Technologies Lab, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University (1 Leninskie gory, Moscow 119991, GSP-1, Russian Federation), Dr. Sci. (Tech.), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9468-7138>, sukhomlin@mail.ru

Romanov Vladimir Yuryevich, Senior Researcher, Laboratory of Open Information Technologies, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University (119991, Russian Federation, Moscow, GSP-1, Leninskie Gory, 1), Candidate of Physical and Mathematical Sciences, ORCID: orcid.org/0000-0001-5140-9576, vladimir.romanov@gmail.com

Dmitry A. Gapanovich, Senior Programmer of the Open Information Technologies Lab, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University (1 Leninskie gory, Moscow 119991, GSP-1, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3222-694X>, dim.gapanovich@gmail.com

Учебное издание

СУХОМЛИН Владимир Александрович
РОМАНОВ Владимир Юрьевич
ГАПАНОВИЧ Дмитрий Антонович

ВВЕДЕНИЕ В МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННУЮ
СИСТЕМНУЮ И ПРОГРАММНУЮ ИНЖЕНЕРИЮ
(MBSSE)

Учебник для вузов

Издательство «МАКС Пресс»
Главный редактор: *Е.М. Бугачева*
Компьютерная верстка и обложка: *А.В. Кононова*

Подписано в печать 05.11.2024 г.
Формат 70x100 1/16. Усл.печ.л. 54,6.
Тираж 1000 (1-200) экз. Заказ 184.

Издательство ООО «МАКС Пресс»
Лицензия ИД N 00510 от 01.12.99 г.

119992, ГСП-2, Москва, Ленинские горы,
МГУ им. М.В. Ломоносова, 2-й учебный корпус, 527 к.
Тел. 8(495)939-3890/91. Тел./Факс 8(495)939-3891.

Отпечатано в полном соответствии с качеством
предоставленных материалов в ООО «Фотоэксперт»
109316, г. Москва, Волгоградский проспект, д. 42,
корп. 5, эт. 1, пом. I, ком. 6.3-23Н