

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи



Шпотя Денис Александрович

**Системный подход к разработке методического инструментария
проектирования технических объектов с помощью
модельно-ориентированного системного инжиниринга**

Специальность 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования (в отраслях
информатики, вычислительной техники и в промышленности)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., профессор
Романов Алексей Александрович

Долгопрудный – 2022

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ НЕДОСТАТКОВ МЕТОДИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАРИЯ МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО СИСТЕМНОГО ИНЖИНИРИНГА.....	19
1.1. Анализ подхода МОСИ, языка SysML и программного обеспечения для их использования	19
1.2. Анализ методики «СФК», метода «ДК» и программного обеспечения для их использования	26
1.3. Недостатки языка SysML, методики «СФК», метода «ДК» и программного обеспечения для их использования.....	33
1.4. Проблемы языка SysML, методики «СФК», метода «ДК» и программного обеспечения для их использования.....	34
1.5. Выводы	35
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА НОВЫХ ПОДХОДОВ К КАЧЕСТВЕННОМУ И КОЛИЧЕСТВЕННОМУ АНАЛИЗУ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ В МОДЕЛИ «ДОМ КАЧЕСТВА».....	37
2.1. Аналитический обзор метода и модели «Дом качества», а также способов преодоления их недостатков	37
2.2. Синтез алгоритма приоритизации выходных параметров (требований) в модели «Дом качества» для идентификации критически важных требований.....	44
2.3. Выводы	46
ГЛАВА 3. СОЗДАНИЕ СПОСОБА АВТОМАТИЗАЦИИ РАЗРАБОТКИ SYSML-ДИАГРАММ ТРЕБОВАНИЙ И ОБНОВЛЕНИЯ В НИХ ИНФОРМАЦИИ.....	48
3.1. Аналитический обзор языка SysML и постановка задачи.....	48
3.2. Создание способа автоматизации разработки SysML-диаграмм требований и обновления в них данных	54
3.3. Выводы	62

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАРИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ КОНКРЕТИЗИРОВАННОЙ МОДЕЛИ «СТРУКТУРИРОВАНИЕ ФУНКЦИИ КАЧЕСТВА» 64

4.1. КОНКРЕТИЗАЦИЯ КЛАССИЧЕСКОЙ КАСКАДНОЙ МОДЕЛИ «СФК»	64
4.2. РАЗРАБОТКА УНИФИЦИРОВАННОГО АЛГОРИТМА ГЕНЕРИРОВАНИЯ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ ДАННЫХ ЭТАПОВ КОНКРЕТИЗИРОВАННОЙ МОДЕЛИ «СФК».....	67
4.3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА «УСФК для УДК № 0»: ПОТРЕБНОСТИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ – ТРЕБОВАНИЯ ЗАКАЗЧИКА	70
4.4. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА «УСФК для УДК № 1»: ТРЕБОВАНИЯ ЗАКАЗЧИКА – ТРЕБОВАНИЯ К ФУНКЦИОНАЛУ ИЗДЕЛИЯ	75
4.5. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА «УСФК для УДК № 2»: ТРЕБОВАНИЯ К ФУНКЦИОНАЛУ ИЗДЕЛИЯ – ТРЕБОВАНИЯ К АЧ/ПЧ ИЗДЕЛИЯ	79
4.6. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА «УСФК для УДК № 3»: ТРЕБОВАНИЯ К АЧ/ПЧ ИЗДЕЛИЯ – ТРЕБОВАНИЯ НТД К ПОРЯДКУ РЕАЛИЗАЦИИ ЖЦИ.....	84
4.7. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА «УСФК для УДК № 4»: ТРЕБОВАНИЯ НТД К ПОРЯДКУ РЕАЛИЗАЦИИ ЖЦИ – ТРЕБОВАНИЯ НТД К ДОКУМЕНТАЦИИ ЖЦИ.....	87
4.8. РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННЫХ ШАБЛОНОВ МОДЕЛЕЙ «УДК»	91
4.9. Выводы.....	91

ГЛАВА 5. ВЕРИФИКАЦИЯ И ВАЛИДАЦИЯ РЕШЕНИЙ И РАЗРАБОТОК ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ 93

5.1. Термины, задачи, план верификации и валидации.....	93
5.2. ВЕРИФИКАЦИЯ И ВАЛИДАЦИЯ УНИФИЦИРОВАННОГО АЛГОРИТМА ГЕНЕРИРОВАНИЯ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ЭТАПОВ КОНКРЕТИЗИРОВАННОЙ МОДЕЛИ «СФК».....	96
5.3. ВЕРИФИКАЦИЯ И ВАЛИДАЦИЯ КОНКРЕТИЗИРОВАННОЙ МОДЕЛИ «СФК» И ЭЛЕКТРОННЫХ ШАБЛОНОВ МОДЕЛИ «ДК»/«УДК»	97
5.4. ВЕРИФИКАЦИЯ И ВАЛИДАЦИЯ АЛГОРИТМА ПРИОРИТИЗАЦИИ «УДК»	98
5.5. ВЕРИФИКАЦИЯ И ВАЛИДАЦИЯ СПОСОБА АВТОМАТИЗАЦИИ РАЗРАБОТКИ SysML-диаграмм ТРЕБОВАНИЙ И ОБНОВЛЕНИЯ В НИХ ИНФОРМАЦИИ	103
5.6. ВЕРИФИКАЦИЯ И ВАЛИДАЦИЯ ОСНОВНЫХ РЕШЕНИЙ И РАЗРАБОТОК ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ КАК ЕДИНЫЙ МЕТОДИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ	107
5.7. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВЕРИФИКАЦИЯ И ВАЛИДАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ ИНТЕГРИРОВАННОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ.....	108
5.8. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ.....	112
5.9. Выводы	114

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	116
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	119
ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.....	121
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	124
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	136
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	137
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	140
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	143
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	146
ПРИЛОЖЕНИЕ Е	154
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....	158
ПРИЛОЖЕНИЕ И.....	159

Введение

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Для удержания передовых позиций в экономике высокотехнологичных производств подходы к взаимодействию заказчиков, разработчиков и производителей сложных технических объектов (к примеру, из ракетно-космической промышленности) и получаемые в итоге результаты, должны удовлетворять потребности пользователей, соответствовать самым современным требованиям качества, уменьшать сроки и стоимость появления инноваций. Но постоянно возрастающая сложность технических объектов обуславливает ужесточение предъявляемых к ним требований, что, в свою очередь, влечет за собой рост объема разрабатываемой и выпускаемой отчетной документации. В рамках текущей документно-ориентированной парадигмы создания продукции высок риск разночтений и совершения ошибок, что приводит к невыполнению всех требований, из-за чего увеличиваются сроки и стоимость проектирования (создания) технических объектов. Для решения комплекса этих проблем и соответствия современным требованиям необходим переход от разрозненных стадий жизненного цикла изделия (ЖЦИ): научно-исследовательские работы (НИР), опытно-конструкторские работы (ОКР), производство, эксплуатация – к единому проекту [1], реализуемому в новой парадигме проектирования сложных технических объектов [2], основанной на синтезе образовательной, научно-инновационной и производственной деятельности с программно-методическим обеспечением (ПМО) модельно-ориентированного системного инжиниринга (МОСИ, Model-Based Systems Engineering) [3].

В рамках теории систем автоматизации проектирования программно-методическое обеспечение МОСИ и результаты его использования относятся к **лингвистическому, информационному, программному и методическому** видам обеспечения CALS-технологий (Continuous Acquisition and Lifecycle Support). В русском языке понятию «CALS» соответствует ИПИ (Информационная поддержка изделий, либо Информационная поддержка процессов ЖЦИ). ИПИ определяется как совместная стратегия государства и бизнеса, направленная на совершенствование существующих процессов в промышленности [4] – повышение эффективности управления материальными, финансовыми, кадровыми и информационными ресурсами. Среди методик повышения качества (эффективности) наиболее известными

являются: «тотальное управление качеством» (Total Quality Management), «управление потребностью в материалах» (MRP – Material Requirements Planning), «управление производственными ресурсами» (MRP-II – Manufacturing Resource Planning), «управление ресурсами предприятия» (ERP – Enterprise Resource Planning). CALS направлена в первую очередь на повышение эффективности управления информационными ресурсами предприятия.

CALS является одним из важнейших компонентов при решении проблемы повышения конкурентоспособности промышленного изделия, который необходимо использовать вместе с другими способами повышения эффективности процессов ЖЦИ [5]. Идея CALS основана на интеграции функционала систем маркетинга (CRM), планирования, проектирования (CAE, CAD), производства (SCM, CAM) и управления (PDM, ERP) в единое информационное пространство (многофункциональную систему) для повышения эффективности и обеспечения информационной согласованности действий всех участников процесса создания, производства и использования продукции [6]. Такую интеграцию можно рассматривать как виртуальное производство. Главная проблема построения таких автоматизированных систем проектирования и управления – обеспечение единообразного описания и интерпретации данных, независимо от места и времени их получения [4]. В рамках методического инструментария (методов, принципов и средств) МОСИ для решения этой проблемы перспективными инструментами являются: язык SysML (Systems Modeling Language), методика «Структурирование функции качества» («СФК»; Quality Function Deployment) и метод «Дом качества» («ДК»; House of Quality) [7]. SysML, «СФК», «ДК» соответствуют лингвистическому и методическому обеспечениям CALS.

SysML развивается с 2000-х годов [8]. В 2018 на первой конференции Стэнфордского университета по SysML он был назван основой создания цифровых двойников (ЦД), цифрового предприятия, развития машинного обучения и искусственного интеллекта (ИИ). Эти утверждения и то, что использование модельно-ориентированного системного инжиниринга (SysML-моделей) обеспечивает абстрактное представление большого объема требований, функций и физических характеристик, а также ускорение всех процессов системного инжиниринга (СИ), сокращение сроков создания новой техники и переход на безбумажные сетевые формы документооборота обсуждается и показывается в работах зарубежных исследователей из академического сообщества и промышленности: М. Бэджажа [9, 10], Ф. Тао [11], А. М. Мадни [12], А. Фишера [13], Е. Бруса [14], Дж. Холквиста [15], а также в работах отечественных исследователей: А.И. Боровкова (СПбПУ) [16, 17], А.А. Романова (МФТИ НИУ) [2, 3], С.П. Ковалева, А.В. Толока (ИПУ РАН) [18], Д.В. Буздалова (ИСП РАН) [19]. SysML-модели лежат в основе проектирования и функционирования сетевых интегрированных интерактивных программных средств (ПС) взаимодействия проектировщик – система [20], а также программных средств автоматизации создания документации.

Методика «СФК» была представлена в рамках концепции тотального (всеобщего) управления качеством для повышения эффективности коммуникации между функциональными подразделениями компаний за счет связи требований заказчика с научно-исследовательскими, опытно-конструкторскими и производственными решениями [21]. В дальнейшем «СФК» была признана самым полезным инструментом в области тотального управления качеством [22]. «СФК» и «ДК» позволяют определять «Что», «Как» и с каким приоритетом выполнять на этапах ЖЦИ для эффективного инвестирования ресурсов.

В международных стандартах по управлению качеством продукции, системного и программного инжиниринга NASA [23], ECSS [24], ISO [25], IEC, IEEE [26], EIA [27] рекомендуется использовать методы, языки и инструменты СИ. Консорциум OMG [28], Международный совет по системной инженерии (INCOSE) [29], а также Институт «СФК» разрабатывают стандарты системного инжиниринга, предоставляют тренинги и программы сертификации знаний по SysML, «СФК» и «ДК», а также занимаются их систематизацией и развитием. Этот методический инструментариий используется зарубежными организациями: NASA, ESA, JAXA, JPL, Boeing, Thales и многими другими. В России формированием отечественного научно-методологического фундамента СИ (комплексной деятельности) активно занимаются специалисты ИПУ РАН (Д.А. Новиков, М.В. Белов) [30]. SysML преподают в Сколтех и МФТИ (НИУ). «СФК» и «ДК» преподают и изучают в МФТИ (НИУ), Самарском НИУ имени академика С.П. Королева [31], УГАТУ.

Несмотря на исследования и технологические разработки, демонстрирующие большой потенциал инструментов (SysML, «СФК», «ДК») модельно-ориентированного СИ, существуют недостатки, которые препятствуют их повсеместному использованию для проектирования изделий в парадигме МОСИ. Например, затраты времени на разработку SysML-диаграмм требований могут достигать нескольких дней; SysML-диаграммы не позволяют наглядно отслеживать все взаимосвязи требований «в» и «между» разными аспектами проектирования. Доступное для приобретения гос. организациями РФ программно-методическое обеспечение МОСИ, основанное на SysML, дорогое и сложное [32].

Модернизации, адаптации и разработке алгоритмов применения методики «СФК» и метода «ДК» для проектирования аппаратно-программных изделий посвящены работы зарубежных ученых: Йоджи Акао, Г. Мазура [33], Р. Цультнера [34–37], Г. Херцвурма [38], Х. Шиндо [39], Д. Мавриса [40], Р. Фанга [41–43], но ни в одной из работ «СФК» не конкретизирована под проектирование технических объектов в соответствии с подходом языка SysML, требованиями нормативно-технической документации (НТД), а в приоритизации требований по методу «Дом качества» количественно не учитывается анализ корреляций

требований. В 2016 г. ведущие исследователи и практики «СФК» К. Стэнсфилд и Г. Мазур заявили о намерении объединить «СФК» с модельно-ориентированным проектированием [44].

Среди отечественных публикаций встречаются работы, в основном посвященные применению «СФК» и «ДК» для анализа требований заказчика и не предлагающие решения указанных выше недостатков «СФК» и «ДК». Среди отечественных работ по «СФК» и «ДК» следует отметить работы М.А. Архиповой и Д.В. Кудрявцева по разработке модели онтологии «СФК» [45], Р.Р. Куруновой и В.Е. Гвоздева по разработке на основе «СФК» метода оценки качества спецификаций требований к программным средствам [46].

Эти недостатки, в сочетании с психологической инерцией человека работать по «старому», в целом негативно влияют на изучение, исследование и возможность использования методического инструментария системного инжиниринга [47] (в особенности, МОСИ). Из-за этого в России такой методический инструментарий практически не распространен и мало изучен. Отсутствует теоретический и прикладной методический инструментарий, основанный на SysML и локализованный под ЖЦ проектирования ТО (к примеру, спутниковой аппаратуры (СА)), под реализацию в доступных широкой аудитории пользователей программных средствах вычислительной техники [48]. Соответственно, лица, принимающие решения, практически не владеют и не осознают преимущества современных инструментов системного инжиниринга и модельно-ориентированного СИ («СФК», «ДК», SysML), не формируют запросы в ВУЗы и промышленный сектор информационных технологий (ИТ) на подготовку соответствующих специалистов и программного обеспечения (ПО)¹. Под таким ПО подразумеваются интерактивные комплексы, интегрирующие на основе МОСИ (SysML-моделей) системы автоматизации проектирования (САПР) и реализующие принципиально новые научно-методические основы взаимодействия проектировщика с системой для автоматизированного анализа и синтеза проектных решений, управления качеством работ и автоматизированного генерирования проектной, конструкторской и иной документации, разрабатываемой на этапах ЖЦИ. Как результат – цифровизация промышленности РФ в основном идет по пути локального внедрения CAE/CAD/CAM ИТ систем, а требуется интегрированное применение ИТ на всех этапах ЖЦИ (CALS) [49].

С учетом вышеперечисленного, был поставлен вопрос: «Можно ли использование программно-методического обеспечения модельно-ориентированного системного инжиниринга, основанного на SysML, удешевить и упростить средствами, доступными для широкой аудитории потенциальных пользователей?»

¹ В работе принято считать, что термин ПО [50, 51] является синонимом термина ПС [52, 53].

Цель и задачи

Цель исследования – создание методического инструментария для проектирования широкого класса технических объектов, основанного на модернизации, конкретизации и синтезе инструментов модельно-ориентированного системного инжиниринга, обеспечивающего снижение временных и финансовых затрат без ухудшения качества.

Для достижения цели требуется решить следующие задачи:

1. Провести анализ недостатков программно-методического обеспечения модельно-ориентированного СИ (SysML, «СФК», «ДК» и ПО для их использования).
2. Синтезировать алгоритм приоритизации выходных параметров (требований) в модели «Дом качества», обеспечивающий количественный учет их корреляций.
3. Создать способ автоматизации разработки SysML-диаграмм требований, снижающий трудозатраты до нескольких часов.
4. Разработать конкретизированную модель «СФК» для разработки технических объектов с учетом потребностей пользователей, требований заказчика, к функционалу, к аппаратной и программной частям (АЧ/ПЧ) изделия, нормативно-технической документации, к порядку реализации этапа ЖЦ изделия и к отчетной документации на этап ЖЦ изделия.
5. Разработать алгоритмы генерирования входных и выходных данных для этапов конкретизированной модели «СФК» на основе синтеза инструментов системного инжиниринга и современных методов и языков МОСИ (SysML, «Дом качества»).
6. Разработать новые электронные шаблоны модели «Дом качества», снижающие трудозатраты на их построение на 20%.
7. Синтезировать решения и разработки в единый методический инструментарий модельно-ориентированного системного инжиниринга.
8. Провести верификацию и валидацию (ВиВ) решений и разработок на примерах проектирования различных технических объектов.

Соответствие шифру специальности

Настоящая работа соответствует специальности 05.13.12 «Системы автоматизации проектирования» по пунктам паспорта специальности:

- п. 3 – Разработка научных основ построения средств САПР, разработка и исследование моделей, алгоритмов и методов для синтеза и анализа проектных решений, включая

конструкторские и технологические решения в САПР и автоматизированных системах технологической подготовки производства.

- п. 4 – Разработка принципиально новых методов и средств взаимодействия проектировщик – система.

- п. 6 – Разработка научных основ реализации жизненного цикла проектирование – производство – эксплуатация, построения интегрированных средств управления проектными работами и унификации прикладных протоколов информационной поддержки.

- п. 7 – Разработка научных основ построения средств автоматизации документирования, безбумажного документооборота, процессов работы электронных архивов технической документации, взаимодействия с изготовителем и потребителем изделий.

Объект исследования

Виды обеспечения CALS для автоматизации проектирования аппаратно-программных объектов.

Предмет исследования

Разработка новых, конкретизация и модернизация известных методов, языков, моделей, алгоритмов модельно-ориентированного системного инжиниринга, позволяющих снизить затраты на проектирование аппаратно-программных объектов.

Научная новизна

Полученные в диссертационном исследовании решения и разработки научно обоснованы, предложены впервые и обладают элементами научной новизны. В совокупности позволяют достичь поставленную цель.

1. Разработан алгоритм приоритизации выходных параметров (требований) в модели «Дом качества», *отличающийся* усовершенствованием уже существующего алгоритма метода «Дом качества» за счет применения математического аппарата метода анализа иерархий.

2. Создан способ автоматизации разработки SysML-диаграмм требований и обновления в них информации, *отличающийся* низкими трудозатратами на эти процессы проектирования — несколько часов и минут вместо нескольких дней и недель.

3. Разработана конкретизированная модель «Структурирование функции качества», отличающаяся от классической четырехэтапной модели «Структурирование функции качества» дополнительным этапом, конкретизацией назначений этапов и формализованным описанием перехода между этапами (аспектами) проектирования.

4. Разработан унифицированный комплекс алгоритмов генерирования входных и выходных данных этапов конкретизированной модели «Структурирование функции качества», отличающихся синтезом инструментов системного инжиниринга, модернизированных и конкретизированных инструментов модельно-ориентированного системного инжиниринга («СФК», «ДК» и SysML), программных средств вычислительной техники (MS Visio и Excel).

Достоверность полученных научных результатов

В диссертационной работе проанализирован и обобщен передовой опыт в области модельно-ориентированного СИ для совершенствования сроков проектирования и создания аппаратно-программных объектов на основе использования ПС вычислительной техники и информационных технологий. Используются современные методы и языки модельно-ориентированного СИ, соответствующие цели и задачам исследования. Достоверность обеспечивается верификацией и валидацией, проводимых в рамках различных аспектов проектирования спутниковой аппаратуры и информационной системы, экспертиз ОКР, в ходе которых были подтверждены требования, предъявляемые к полученным научным результатам.

Теоретическая значимость результатов диссертационной работы

1. Разработанный алгоритм приоритизации выходных параметров (требований) в модели «Дом качества» позволяет количественно и согласованно учесть экспертные оценки корреляций выходных параметров и получить иной ранг их приоритизации, повысить контраст весов приоритизации в два и более раз по сравнению с классическим алгоритмом метода «Дом качества».

2. Созданный способ автоматизации разработки SysML-диаграмм требований и обновления в них информации позволяет обеспечить в рамках лингвистического обеспечения CALS массовое использование нового языка SysML для представления и обмена информацией об изделиях и процессах на этапах ЖЦ. SysML-диаграммы разных типов (составляющие интегрированную (общую) модель системы (ИМС)) являются основами разработки цифровых двойников и их управления посредством синхронизации ИМС с системами автоматизации проектирования (САПР) в единый комплекс.

3. Конкретизированная модель «Структурирование функции качества» позволяет разрабатывать ТО в соответствии с потребностями пользователей, подходом SysML (требованиями к функционалу, архитектурам программной и аппаратной частей изделия) и требованиями нормативно-технической документации.

4. Разработанный унифицированный комплекс алгоритмов генерирования данных этапов конкретизированной модели «Структурирование функции качества» позволяет широкой аудитории пользователей с помощью инструментария классического СИ и модельно-ориентированного СИ (лингвистического и методического обеспечения CALS) единообразно получать, обрабатывать, анализировать, моделировать, а также приоритизировать требования (параметры) разных аспектов проектирования ТО широкого класса, позволяет реализовать разрозненные этапы ЖЦ проектирования (стадии ЖЦ) как единый проект.

Практическая значимость результатов диссертационной работы

Предложенный в диссертационной работе методический инструментарий модельно-ориентированного системного инжиниринга является научной основой для реализации стратегии CALS (ИПИ) и развития видов (лингвистического, методического, информационного и программного) обеспечения CALS-технологий широкой аудиторией потенциальных пользователей. Кроме того, данный инструментарий позволяет решать традиционные и вновь возникающие проблемы, связанные с проектированием технических объектов.

1. Созданный способ автоматизации разработки SysML-диаграмм требований и обновления в них информации позволяет сократить трудозатраты на указанные процессы проектирования с нескольких дней (недель) до нескольких минут (часов), а также минимизировать затраты ресурсов на внедрение программных средств для SysML.

2. Разработанный комплекс алгоритмов генерирования входных и выходных данных для этапов конкретизированной модели «СФК», включающий в себя и подразумевающий использование всех решений и разработок диссертационного исследования, обеспечивает снижение затрат времени на реализацию этапов ЖЦ проектирования ТО на 5–10% без ухудшения качества за счет, к примеру, разработки и использования SysML-диаграмм (моделей) требований. Верификация и валидация разработанных SysML-моделей показала, что они позволяют сокращать трудозатраты на экспертизу готовности результатов ОКР с нескольких дней до нескольких часов, а также сроки планирования этапов ЖЦ новых изделий-аналогов до 60%; снижать на 5–10% стоимость проекта за счет минимизации рисков несоответствия качества результатов проектных работ этапам ЖЦ исходным требованиям.

Реализация и внедрение результатов диссертационной работы

Практическая значимость результатов диссертационной работы подтверждается актами о внедрении результатов диссертационной работы, полученными от АО «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем» и от МФТИ (НИУ) (см. Приложение И). Результаты внедрения получили высокую оценку от менеджмента среднего и высшего звена научно-производственных предприятий, а также от научно-педагогического состава МФТИ (НИУ).

Полученный методический инструментарий МОСИ использован при проектировании и разработке тактико-технического задания на информационную систему автоматизированной поддержки выполнения работ по созданию спутниковой аппаратуры на этапах жизненного цикла и при непосредственной реализации информационной системы [54]; при выполнении составной части (СЧ) ОКР «Разработка и изготовление высокоскоростной радиолинии для российско-белорусского космического аппарата», шифр СЧ ОКР «ВРЛ-РБ» на этапе «Эскизный проект»; в учебно-образовательном процессе двух кафедр МФТИ (НИУ) для проведения:

1) семинаров, в ходе которых команды магистрантов за 6 месяцев спроектировали в парадигме МОСИ и выполнили синтез макетов МКА формата CubeSat [55];

2) ежегодных научных семинаров и мастер-классов по изучению инструментов МОСИ (SysML, «СФК», «ДК») и их использованию в проектировании технических объектов.

Внедрение показало, что результаты диссертационной работы: повышают скорость реализации этапов жизненного цикла проектирования на 5–10% за счет минимизации количества итераций из-за исправления ошибок; позволяют в сжатые сроки реализовать ЖЦ киберфизической системы (от полугода до 2 лет вместо 5–7 лет); минимизируют затраты ресурсов на внедрение ПО для использования МОСИ (особенно SysML) за счет конкретизации под реализацию в ПО, доступном широкой аудитории пользователей.

Учебно-методические материалы и ИТ, основанные на предложенных решениях и разработках, снимают ограничения на изучение SysML, «СФК», «ДК», их прикладное использование, а также мотивируют изучать междисциплинарно STEM-дисциплины (от англ. Science, Technology, Engineering and Math), CAE/CAD/CAM/PDM/PLM системы; становятся главными конструкторами принципиально новых программно-методических средств для взаимодействия проектировщиков с системами и для реализации ЖЦИ как единый проект.

Методы исследования

Использовались научно-методические инструменты классического системного инжиниринга и модельно-ориентированного системного инжиниринга: опросы, модель Кано, метод анализа иерархий (МАИ), методика «СФК», метод «ДК», язык SysML.

Положения, выносимые на защиту

1. Алгоритм приоритизации выходных параметров в модели «Дом качества».
2. Способ автоматизации разработки SysML-диаграмм требований и обновления в них информации.
3. Конкретизированная каскадная модель «СФК».
4. Унифицированный комплекс алгоритмов генерирования входных и выходных данных (параметров) этапов конкретизированной каскадной модели «СФК».

Апробация результатов

Результаты работы прошли рецензирование, докладывались и обсуждались на научных конференциях МФТИ № 58, 59, 60, 61 (ежегодно с 2015 г.), на Первой всероссийской конференции по космическому образованию «Дорога в космос» (ИКИ РАН, 2019 г.), на научных семинарах: кафедры системного инжиниринга МФТИ (с 2018 г.), факультета аэрофизики и космических исследований МФТИ (2019 г.), в ходе курса «Системное проектирование космической техники» (МФТИ, 2019 г.), диссертационного совета Д002.226.02 при ИПУ РАН (2021 г.), кафедры РК-6 САПР МГТУ им. Н.Э. Баумана (2022 г.); на IX Форуме по цифровизации оборонно-промышленного комплекса России «ИТОПК-2020» (Калуга, 2020 г.), на международных конгрессах: 64th EOQ Scientific&Business Quality Congress (SRMEK, 2021 г.), на 18th WOSC Congress «WOSC2021» (ИПУ РАН, 2021 г.), на VIII International Conference «En&T-2021» (МФТИ, 2021 г.).

Публикации

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 13 работах. Из них: 5 статей (3 в журналах по Перечню ВАК РФ, 2 в рецензируемом научном издании); 8 работ в сборниках

конференций (из них 1 индексируется Scopus). Получено 1 свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ (см. Приложение Ж).

Личный вклад автора

Постановка задач исследования осуществлялась совместно с научным руководителем. Все результаты, составляющие содержание диссертационной работы, получены автором лично. В работах, опубликованных в соавторстве, автор осуществил: [1, 6] – определение, проведение качественного и количественного анализа данных, выполнение синтеза алгоритма приоритизации выходных параметров в модели «Дом качества» с методом анализа иерархий, для обеспечения количественного учета экспертных оценок корреляций выходных параметров в ходе их приоритизации в модели «Дом качества», проведение вычислений и анализа результатов; [2, 7, 9, 11, 12, 13] – анализ недостатков и проблем связанных с SysML, «СФК», «ДК», определение ПО для использования SysML, «СФК», «ДК» широкой аудиторией пользователей, конкретизацию (усовершенствование) классической каскадной модели «СФК», разработку унифицированного алгоритма генерирования входных и выходных данных этапов модели «усовершенствованное СФК», разработку электронных шаблонов моделей «уДК», создание способа автоматизации разработки SysML-диаграмм требований и последующего обновления в них информации, объединение разработок исследования в единый методический инструментарий модельно-ориентированного системного инжиниринга; [3, 8, 10] – проведение верификации и валидации результатов исследования, вычислений и анализа результатов, разработка алгоритма создания и реализации концепции интегрированной (общей) модели системы (CALS-технологии) с точки зрения управления требованиями с помощью полученных результатов диссертационного исследования; [4] – разработку методик (алгоритмов) «усовершенствованное Структурирование функции качества» («уСФК») для «усовершенствованного Дома качества» («уДК») № 0 и № 1, модели требований к системе, структуры модели «усовершенствованный Дом качества»; [5] – анализ применимости языка SysML в построении интегрированной (общей) модели системы.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав основного текста, заключения, списков сокращений и публикаций, 8 приложений. Объем работы составляет 160 страниц, включая 23 таблицы, 60 рисунков и списка литературы из 150 пунктов.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность диссертационного исследования. Анализируется степень разработанности основных направлений диссертационного исследования, формулируется научная проблема (задача), заключающаяся в разработке методического инструментария проектирования технических объектов широкого класса в парадигме модельно-ориентированного системного инжиниринга и с помощью ее современного инструментария (языка SysML, методики «СФК» и метода «ДК»). Формулируются цель и задачи исследования, указываются сведения о: методах, научной новизне и практической значимости, внедрении, области исследования, положениях, выносимых на защиту, достоверности и апробации результатов, личном вкладе автора, публикациях и структуре диссертационной работы.

В **первой главе** проводится анализ источников литературы на предмет выявления недостатков (иными словами – дефектов) методического инструментария модельно-ориентированного системного инжиниринга (языка SysML, методики «СФК», метода «ДК» и ПО для их использования), препятствующих его широкому распространению. Определяется ПО для использования SysML, «СФК» и «ДК», доступное широкой аудитории пользователей. Определяются недостатки, в том числе ПО. Формулируются проблемы (процессы или их отсутствие), которые появляются из-за этих недостатков.

Во **второй главе** предлагаются новые подходы к качественному и количественному анализу данных в модели «ДК». Выполняется аналитический обзор классического метода «ДК». Рассматривается недостаток классических структур матриц «Крыльцо» и «Крыша» в модели «ДК» и предлагается новый способ их построения для обеспечения в них двустороннего качественного анализа корреляций параметров. Предложено заменить классическую структуру на структуру схожую со структурой матрицы, используемой в методе анализа иерархий для попарного сравнения параметров. Учитывая предложенный способ построения матриц «Крыльцо» и «Крыша», предлагается алгоритм приоритизации выходных параметров в модели «ДК» для идентификации критически важных параметров (требований). Разработанный алгоритм основан на синтезе классического алгоритма приоритизации выходных параметров в модели «ДК» с количественными оценками их корреляций, получаемых с помощью подхода и математического аппарата МАИ.

В **третьей главе** описывается способ автоматизации разработки SysML-диаграмм требований и обновления в них информации. Для этого проводится аналитический обзор таксономии SysML-моделей, включая базовые модельные конструкции SysML-диаграмм требований. Ставится задача по разработке способа автоматизации разработки SysML-диаграмм требований и обновления в них информации. Способ обеспечивает синхронизацию и

конвертацию данных из модели «ДК» в SysML-фигуры требований. Способ реализуется с помощью ПО MS Visio и Excel, доступного широкой аудитории пользователей. Для решения задачи предлагается комплекс алгоритмов действий. В рамках разработки первого алгоритма рассматривается порядок действий для: 1) создания в MS Excel структуры базы данных (БД), 2) заполнения БД требованиями из модели «ДК», и 3) подключения БД к MS Visio. В рамках разработки второго, третьего и четвертого алгоритмов рассматривается порядок действий для: 1) создания в MS Visio шаблонов SysML-фигур требований, 2) автоматизированного преобразования текстовых формулировок требований (из БД) в SysML-фигуры требований, 3) представления фигур в виде SysML-диаграмм требований и 4) автоматизированного обновления информации в SysML-диаграммах требований.

В **четвертой главе** рассматриваются: конкретизированная модель «Структурирование функции качества»; унифицированный алгоритм и основанные на нем алгоритмы генерирования входных и выходных данных для этапов конкретизированной каскадной модели «СФК»; электронные шаблоны модели «ДК». Классическая модель «СФК» дополнена новой моделью (этапом) «ДК» для формулировки требований заказчика в соответствии с потребностями пользователей. Классические этапы модели «СФК» № 1–4 конкретизированы в соответствии с подходом (языком) SysML и требованиями отраслевой нормативно-технической документации к созданию аппаратно-программных средств. Для генерирования входных и выходных данных этапов конкретизированной модели «СФК» (потребностей пользователей, требований заказчика, инженерных требований, требований нормативно-технической документации) были разработаны алгоритмы, основанные на синтезе методов, языков и инструментов системного инжиниринга и МОСИ. Описание каждого из пяти алгоритмов содержит: 1) формулировку физического смысла и формализацию ключевых процессов алгоритма; 2) рекомендуемую обобщенную структуру шаблона модели «ДК»; 3) рамочную (обобщенную) концепцию алгоритма и порядок действий ее реализации. Для практической реализации этапов конкретизированной модели «СФК» и новых алгоритмов генерирования входных и выходных данных для этих этапов были разработаны соответствующие электронные шаблоны моделей «ДК».

В **пятой главе**, демонстрируется верификации и валидации решений и разработок диссертационного исследования, а также их синтез в единый методический инструментарий. Показывается эффективность и целесообразность его практического применения. Формулируются задачи, методы и план верификации и валидации. Верификация и валидация унифицированного алгоритма генерирования входных и выходных данных для этапов конкретизированной модели «СФК» и основанных на нем алгоритмов проводятся в рамках генерирования потребностей пользователей, требований заказчика, инженерных требований к МКА. Приводятся результаты анализа качественного и количественного ранжирования

требований, доказывающие, что алгоритмы способны выполнять поставленные перед ними требования: генерировать и ранжировать входные и выходные данные (параметры разных аспектов проектирования [56]). Верификация и валидация нового алгоритма приоритизации выходных параметров в модели «ДК» для идентификации критически важных требований, а также верификация и валидация разработанных электронных шаблонов модели «ДК» проводятся на примере приоритизации требований к малоразмерному космическому аппарату (МКА) с помощью классического и нового алгоритмов. Приводится сравнение результатов приоритизации требований, которое доказывает, что новый алгоритм позволяет в несколько раз повысить контрастность весов приоритизации требований, что обеспечивает идентификацию критически важных требований. Верификация и валидация способа автоматизации разработки SysML-диаграмм требований и обновления в них информации реализуются в рамках моделирования требований к МКА. Эффективность способа доказывается в ходе сравнительного анализа затрат времени на операции по разработке SysML-диаграмм, который показывает, что новый автоматизированный способ позволяет сокращать трудозатраты на разработку SysML-диаграмм и последующее обновление в них информации до нескольких часов и минут. ВиВ синтеза всех основных решений и разработок диссертационного исследования в единый методический инструментарий демонстрируются на примере объединения разработанных моделей «ДК» с соответствующими им SysML-диаграммами требований в единое рабочее пространство, реализованное с помощью программного обеспечения, доступного широкой аудитории пользователей. Таким образом демонстрируется: эффективность коммуникации данных модели «ДК» с помощью SysML-диаграмм; отслеживания всех взаимосвязей требований из SysML-диаграмм с помощью моделей «ДК». Дополнительные действия по ВиВ решений и разработок диссертационного исследования демонстрируются на примере реализации на их основе ИМС. Представлены: алгоритм создания ИМС, результат его реализации, а также преимущества и перспективы развития полученных результатов.

В заключении кратко излагаются полученные результаты, выводы и перспективы.

Глава 1

Анализ недостатков методического инструментария модельно-ориентированного системного инжиниринга

В главе 1 анализируются недостатки методического инструментария модельно-ориентированного системного инжиниринга. В разделе 1.1 проанализированы подход МОСИ и язык SysML, в разделе 1.2 проанализированы методика «СФК» и метод «ДК». В каждом разделе рассматриваются термины, проводится обзор применения, определяется доступное широкой аудитории пользователей ПО для использования данных инструментов. В разделе 1.3 формулируются недостатки SysML, «СФК», «ДК» и ПО для их использования. В разделе 1.4 на основе выявленных недостатков формулируются проблемы, связанные с SysML, «СФК», «ДК» и ПО для их использования. Формулируется путь преодоления недостатков.

1.1 Анализ подхода МОСИ, языка SysML и программного обеспечения для их использования

В разделе 1.1 рассматриваются термины и определения модельно-ориентированного системного инжиниринга и языка SysML, на примере мета-модели МОСИ представляется их взаимосвязь, приводится краткая справка возникновения SysML (подраздел 1.1.1), их актуальность и применение (подраздел 1.1.2), а также анализ и выбор программного обеспечения, доступного широкой аудитории пользователей, для их использования (подраздел 1.1.3).

1.1.1 Термины и определения

Для того чтобы понять, что такое модельно-ориентированный системный инжиниринг, необходимо рассмотреть такие понятия как система и системный инжиниринг.

Система – это конструкция или совокупность различных элементов, которые вместе дают результаты, недостижимые при их использовании по отдельности [23]. Исходя из этого определения, система не может быть воспринята корректно, если рассматривать ее как сумму составных частей. Система должна обязательно восприниматься с учетом взаимосвязей ее элементов между собой и функциями, которые эти взаимосвязи порождают [57]. В связи с этим, сложность и запутанность – это важные характеристики системы [58], которые требуют использования соответствующего подхода для рассмотрения системы в целом [59].

Согласно определению INCOSE от 2014 года **системный инжиниринг** – это междисциплинарный подход и средства, позволяющие реализовывать успешные системы. Этот подход помогает справиться со сложностью, присущей системам, избежать упущений и неверных допущений, управлять непредвиденными ситуациями и вырабатывать наиболее эффективное экономичное и надежное решение. СИ начинается с определения потребностей пользователей и необходимого функционала, а затем переходит к созданию целостного проекта системы [60]. В 2019 INCOSE опубликовало новое определение СИ [61] - это трансдисциплинарный и интегративный подход, позволяющий успешно реализовывать, использовать и выводить из эксплуатации инженерные системы, используя системные принципы и концепции, а также научные, технологические и управленческие методы.

Модельно-ориентированный системный инжиниринг является одним из подходов системного инжиниринга, в котором цели СИ достигаются с помощью формализованного использования моделей. В работе [62] дано следующее определение: **модель системы** – это комплекс управления информацией, представляющей реальную физическую систему посредством связанных, строгих и однозначных взаимозависимостей между ее структурой, поведением и требованиями. Исходя из этого, **МОСИ** определяется как формализованное применение технологии моделирования для поддержки действий, направленных на формирование системных требований, проектирование, анализ, верификацию и валидацию, которые начинаются на этапе концептуального проектирования, продолжаются на протяжении всей разработки и дальнейших этапах и стадиях ЖЦИ [63]. Следовательно, модельно-ориентированный подход к разработке систем представляет собой консолидированный метод, основанный на моделировании управления сложностью создаваемой системы, привлекающий все технические инженерные дисциплины, а также повышающий эффективность разработки за счет использования соответствующего инструментария [64, 65].

С точки зрения модельно-ориентированного системного инжиниринга, **модель** – это абстрактное представление заданного набора аспектов системы/функции/изделия, которое используется для анализа, моделирования и/или генерации кода и которое имеет однозначный, четко определенный синтаксис и семантику [66, 67]. Также **модель** – это абстракция системы,

направленная на понимание, коммуникацию, объяснение или проектирование соответствующих аспектов этой системы [68].

Модель системы содержит элементы модели, к примеру, информацию о требованиях, функциях, физические компоненты, сценарии тестирования изделия. Модель не является целью, она является ресурсом, используемым в модельно-ориентированном системном инжиниринге. За счет разработки на протяжении ЖЦИ и использования в качестве основных рабочих «артефактов» модели, а не текстовых документов, обеспечивается переход от документо-ориентированного управления проектом к проектированию в парадигме МОСИ [69].

На рисунке 1.1 представлена мета-модель МОСИ, которая показывает, что для создания модели системы в парадигме МОСИ используется нескольких концепций:

- 1) язык моделирования, отражающий систему;
- 2) методика моделирования [70, 71], определяющая порядок и состав создаваемых конструкций модели, таблиц и т.д.;
- 3) ПО, обеспечивающее реализацию языка и методики моделирования.

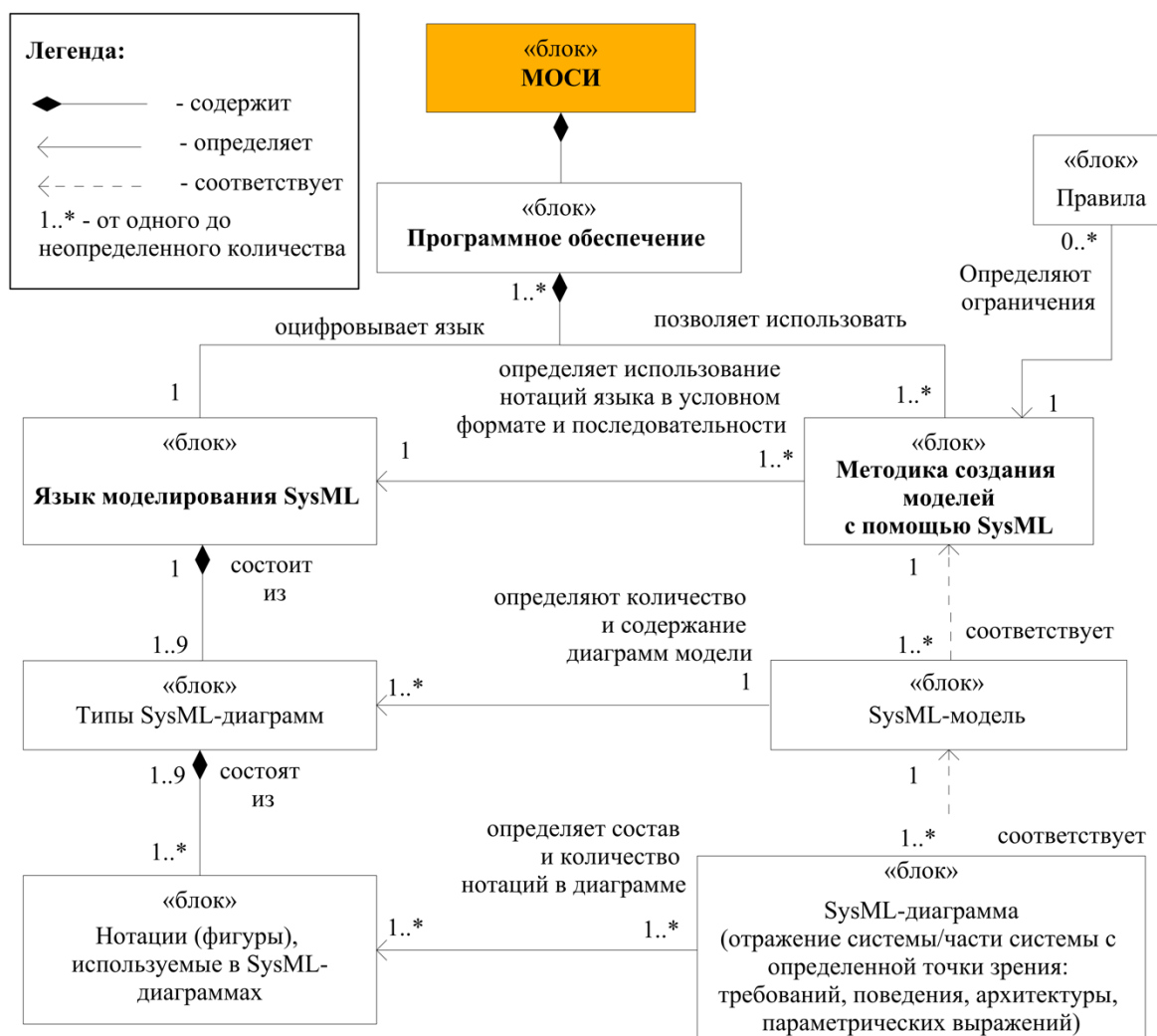


Рисунок 1.1 – Мета-модель, отражающая состав МОСИ

Во второй половине XX века бурно развивались объектно-ориентированные языки программирования (Simulia, Objective C, C++ и другие). Вследствие непрекращающегося усложнения программного обеспечения появилась потребность в создании языка, который позволил бы разработчикам единообразно анализировать и проектировать программное обеспечение. Для этих целей в 1997 г. появился язык UML (от англ. Unified Modeling Language, унифицированный язык моделирования). UML – это язык графического описания объектного моделирования в области разработки программного обеспечения для моделирования бизнес-процессов и программного инжиниринга. Он основан на графовых сетях и теории графов, обеспечивает моделирование компьютерных программ [50].

В связи с ориентацией UML на разработку программных средств, онтология, семантика и таксономия этого языка ограничены программными артефактами. К примеру, с помощью UML едва ли можно выразить физические параметры системы. Более того, UML не поддерживает моделирование иерархий, что является очень важной задачей в системном инжиниринге, как при формулировании требований, так и при разработке архитектуры системы. Ввиду этих ограничений с 2003 г. выполнялась работа по модификации UML для решения задач СИ, а в 2007 г. была опубликована первая спецификация языка SysML. С октября 2018 г. используется версия языка SysML 1.6 [28, 65]. Язык SysML является на момент выполнения диссертационной работы самым популярным [71] и международным стандартом [28].

Язык SysML – это язык общего назначения для графического моделирования, который поддерживает анализ, описание, детализацию, проектирование, разработку, верификацию и валидацию сложных систем [73]. Под системами может подразумеваться АЧ/ПЧ, информация, процессы, персонал и объекты. Второе определение **языка SysML** – это стандартизованный язык графического моделирования систем любой сложности [65]. В рамках CALS SysML относится к лингвистическому и методическому видам обеспечений.

Мета-модель МОСИ показывает, что ПО обеспечивает использование языка SysML и соответствующего метода. Язык SysML в свою очередь состоит из 9 типов SysML-диаграмм, каждая из которых состоит из более, чем одного вида нотаций (графических фигур). Каждая SysML-диаграмма с помощью определенного набора нотаций языка SysML, отражает архитектуру системы или часть системы с точки зрения [74]: требований, поведения (функций), структуры (физической архитектуры) [19], параметрических выражений. Создаваемый набор SysML-диаграмм должен соответствовать создаваемой SysML-модели, которая, в свою очередь, должна соответствовать методике создания SysML-моделей. Методика определяет, какие типы SysML-диаграмм и SysML-фигур использовать в SysML-модели для отражения системы или ее части с той или иной точки зрения.

1.1.2 Обзор применения

В статистике Scopus (крупнейшая библиографическая база данных и инструмент для отслеживания цитируемости статей, опубликованных в научных изданиях) публикации с ключевым словом SysML начинают появляться с 2004 года. В соответствии с рисунком 1.2, анализ статистики за период с 2004 по 2019 год показывает, что почти ежегодно происходил рост количества публикаций, связанных с SysML. За весь период опубликовано 1854 работ.

Детальный анализ статистики Scopus показывает, что с 2000 по 2011 год было проиндексировано 480 публикаций, а с 2012 по 2019 год проиндексировано 1374 публикации. За период с 2004 по 2019 год графика количества публикаций по предметным областям выглядит следующим образом (первые семь предметных областей): компьютерные науки – 1222, инженерия – 1038, математика – 429, науки о земле и планетах – 87, физика и астрономия – 85, науки о принятии решений – 82, бизнес, менеджмент и бухгалтерский учет – 64, материаловедение – 48, гуманитарные науки – 48, энергетика – 30, экология – 25, химическое машиностроения – 15, экономика, эконометрика и финансы – 9, химия – 3, медицина – 3, биохимия, генетика и молекулярная биология – 1. Большинство работ, начиная с дисциплины математика, опубликованы за последние пять лет, что говорит о стабильной «экспансии» SysML в другие предметные области. Анализ по странам за периоды с 2004 по 2011 и с 2012 по 2019 год представлен в таблице 1.1.

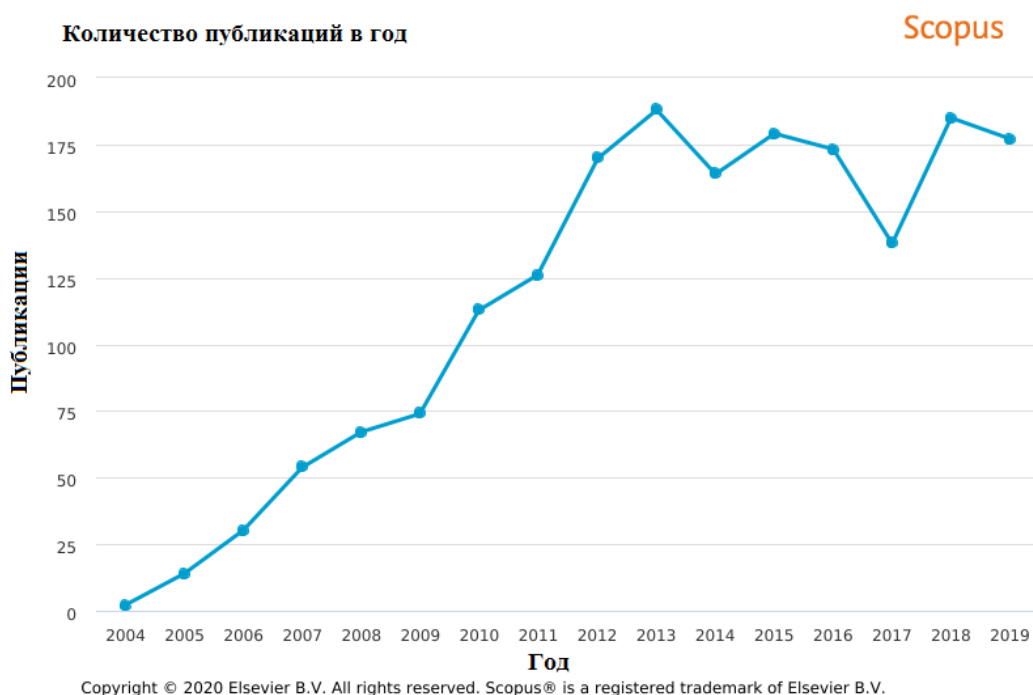


Рисунок 1.2 – Ежегодная статистика проиндексированных системой Scopus публикаций, связанных с SysML за период с 2004 по 2019 год

Таблица 1.1 – Анализ статистики публикаций, связанных с SysML, по 10 странам за периоды с 2004 по 2011 и с 2012 по 2019 год (данные Scopus)

Период: с 2004 по 2011 год		Период: с 2012 по 2019 год	
Страна	Количество публикаций	Страна	Количество публикаций
США	133	США	314
Франция	65	Франция	258
Германия	56	Германия	208
Великобритания	42	Китай	97
Китай	22	Италия	78
Япония	20	Великобритания	63
Канада	17	Бразилия	59
Швеция	15	Япония	56
Италия	14	Канада	43
Бразилия	13	Австрия	34

Данная статистика также подтверждается исследованием, в котором использованы данные с 2009 по 2015 год [71]. В рамках исследования в 2012 году было опрошено 134 респондента, а в 2014 году – 192 респондента из 99 компаний 19 стран мира. Данные компании были из следующих секторов промышленности: авиационная – 28,6%, автомобильная – 17,7%, оборонная – 17,7%, ИТ-отрасль – 15,6%, медицинская – 9,4%, космическая – 27,1%, другие – 25%. Среди выводов исследования выделяются два важных тезиса:

1. Возрастает количество компаний, практикующих модельно-ориентированный системный инжиниринг и разрабатывающих собственные методики, инструменты и учебно-методический материал для использования МОСИ (SysML).

2. По состоянию на 2015 год МОСИ является наиболее эффективным подходом для управления требованиями и моделирования архитектур систем.

Первый тезис подтверждается в самом последнем исследовании публикаций о SysML [75] и коррелирует с анализом результатов опроса инженеров Германии из промышленности и ВУЗов [76]. В результатах исследования указывается на то, что существующие организации не совместимы с междисциплинарным системным инжинирингом в связи с отсутствием методик использования современных стандартов и языков моделирования. Для решения этой проблемы была издана работа, в которой проведен обзор самых значимых методик МОСИ [71]. Несмотря на это, ни одна из рассмотренных в указанной работе методик не получила значимого становления. Причиной тому служит отсутствие единого мнения о процессах системного инжиниринга и об использовании инструментов и методов для управления сложностью и запутанностью систем [77].

Аналогичные результаты получены в Великобритании. В 2013 году более 100 респондентов из консалтинговых, оборонных и космических компаний приняли участие в опросе, связанном с модельно-ориентированным системным инжинирингом и SysML [78]. Результаты исследования показали, что на тот момент модельно-ориентированный системный инжиниринг уже был широко распространен (только 14% респондентов ответили, что не используют МОСИ). Было выявлено, что пользователи применяют множество различных языков моделирования, среди которых самыми популярными были (в порядке убывания популярности): UML, блок-схемы, контекстная диаграмма, SysML. Об использовании методики или стандартов МОСИ 43% респондентов ответили, что не используют их, 16% используют собственные разработки, 11% – методику IBM RUP-SE (Rational Unified Process for Systems Engineering). Среди используемого программного обеспечения были выделены 6 самых часто используемых программ: Microsoft Visio (57%), Sparx Systems Enterprise Architect (44%), IBM-Rhapsody (24%), Atego – ARTiSAN Studio (21%), Simulink (19%), Mood (14%). Среднее количество инструментов, используемых респондентами, равнялось 2.6. В выводах констатируется, что отсутствуют доказательства, практические рекомендации, тематические исследования и примеры; кроме того, присутствуют недостатки, связанные с инфраструктурой, инструментами и процессами использования модельно-ориентированного системного инжиниринга. Исходя из вышесказанного, в данном исследовании не отражены особенности и недостатки методик использования языка SysML [70, 71, 78].

1.1.3 Анализ и определение ПО

Статистика Scopus и ряд исследований [15, 71, 79] показывают, что число пользователей, использующих SysML, возрастало и продолжает возрастать. В связи с этим стал чаще звучать вопрос: «Как минимизировать затраты на моделирование?» Учитывая этот контекст, в рамках диссертационного исследования был проведен анализ программных продуктов для SysML, которые на 2020 год государственные организации России могут официально закупить² или уже имеют на рабочих местах своих сотрудников:

1. IBM – Rational Rhapsody Designer for Systems Engineers: от 245 тыс. руб. в год, требует освоения специальной методики.

2. Siemens PLM – System Modeling Workbench: от 300 тыс. руб., требуется наличие ПО Siemens Teamcenter, оплата ежегодной лицензии, освоение специальной методики.

² Продукцию иностранных компаний, не имеющих зарегистрированных филиалов на территории России, государственные организации России официально приобрести и внедрить не могут.

3. Dassault Systems – Magic Cyber Systems Engineer: от 545 тыс. руб., требуется оплата ежегодной лицензии и технической поддержки.

4. Microsoft Office – Visio Professional от 2013: бесплатно³ или от 30 тыс. руб. Отсутствуют встроенные библиотеки SysML-фигур, но есть библиотеки UML-фигур (предшественник языка SysML). Следовательно, MS Visio Professional обладает нераскрытым потенциалом с точки зрения его использования для разработки SysML-моделей. В отличие от первых трех дорогостоящих продуктов MS Visio позволяет «из коробки» установить взаимосвязь со средой автоматизации разработки MS Excel.

Учитывая обострившийся в 2020 году всемирный социально-экономический кризис, затраты на внедрение и эксплуатацию программного обеспечения для SysML являлись и будут в будущем являться одним из ключевых ограничителей и критерием, по которому можно сделать вывод о том, какое ПО является доступным широкой аудитории пользователей. Программное обеспечение MS Visio Professional версия от 2013 года стоит в 2020 году примерно в 8 раз меньше, чем самое дешевое программное обеспечение, настроенное для использования SysML от указанных выше трех корпораций. Соответственно, MS Visio было определено как среда автоматизации разработки, доступная широкой аудитории пользователей, функционал которой можно адаптировать для использования SysML.

1.2 Анализ методики «СФК», метода «ДК» и программного обеспечения для их использования

В разделе 1.2 рассматриваются термины и определения «СФК» и «ДК» (подраздел 1.2.1), их актуальность (подраздел 1.2.2), а также анализ и выбор программного обеспечения для их использования, доступного широкой аудитории пользователей (1.2.3).

Меняющаяся глобальная социо-экономическая обстановка запустила сдвиг парадигмы проектирования, в частности в аэрокосмической отрасли. Важной составляющей сдвига является отказ от традиционного (и до сих пор популярного) пути достижения качества, связанного с выявлением и исправлением недостатков на этапе предпроизводственных экспериментов, попытками их исправления. Иллюстрация этого пути показана на рисунке 1.3а [80].

С точки зрения системной разработки сложных технических объектов (например, космической техники), достижение качества путем проведения изменений в продукте на поздних этапах ЖЦИ – весьма затратное и опасное занятие для успеха миссии (см. рисунок 1.3б [81]).

³ Многие промышленные предприятия РФ уже имеют MS Visio (Professional). ВУЗы партнеры Microsoft бесплатно предоставляют студентам и сотрудникам лицензии на данные продукты.

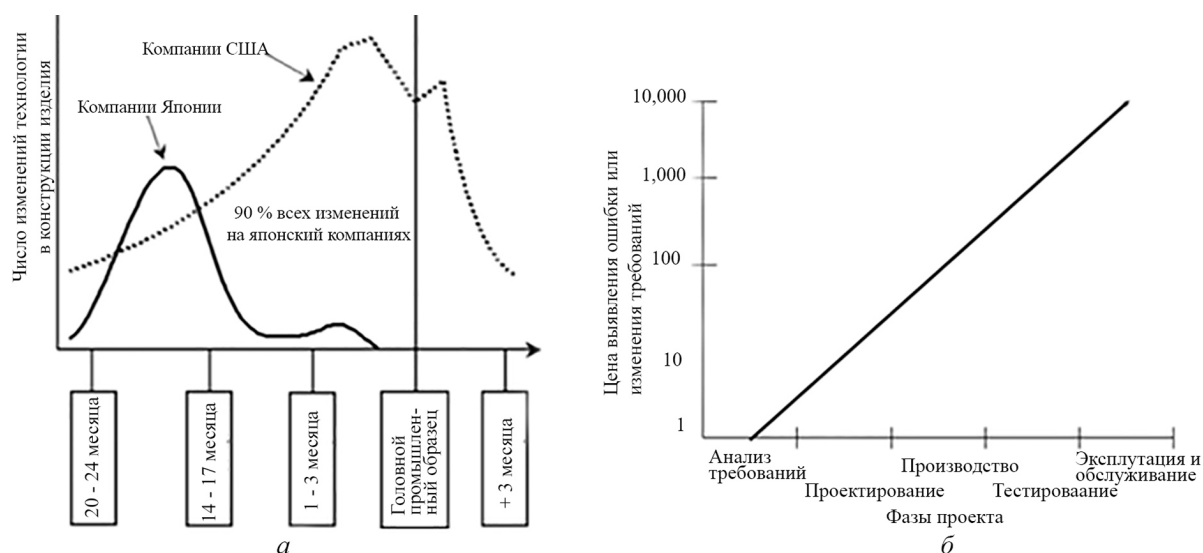


Рисунок 1.3 – Сравнение числа вносимых изменений (а) и стоимость исправления ошибок (б)

Традиционная позиция компаний США и Европы – «качество стоит очень больших средств» – как раз и является основой парадигмы, традиционного стадийно-этапного подхода. Также на рисунке 1.3а видно, что в Японии подход достижения качества отличается в корне – «качество должно быть спроектировано в продукт, а не найдено в нем» (философия эксперта по качеству Генучи Тагучи) [82]. Для этого в 1966 году Йоджи Акао, специалист по планированию (доктор Токийского технологического института), нашел «ключ от двери», ведущей к массовому внедрению в промышленность философии Тагучи. Акао понял, что финансовые издержки, ограничивающие в традиционном подходе достижение качественного продукта, вызваны неспособностью разработчиков правильно определить требования к продукту и проконтролировать их достижение на всех этапах разработки или усовершенствования продукта. Для решения этой проблемы профессора Йоджи Акао и Шигэру Мицуно разработали методику «структурирование функции качества» [83].

1.2.1 Термины и определения

В литературе имеется два перевода Quality Function Deployment – «развертывание функции качества» и «структурирование функции качества» [84]. В этой работе используется второй вариант. «СФК» это перевод японских слов «hinshitsu kino tenkai». Эти слова означают структурирование каждым ответственным подразделением компании участвующих в создании продуктов таких их функций/свойств, которые удовлетворяют [85] или даже превосходят ожидания заказчика [86]. Это коррелирует с устоявшимся мнением в управлении технологиями, что кооперация и коммуникация подразделений, отвечающих за маркетинг, научно-исследовательские и ОКР, производство – позволяют создавать прибыльные изделия [21].

Со временем, появлялись разные определения того, что такое «СФК» (см. таблицу 1.2).

Таблица 1.2 – Определения «Структурирование Функции Качества»

Автор	Определение «Структурирование функции качества»
Йоджи Акао	Перевод с английского [87]: метод разработки качественного замысла (проекта), способного удовлетворить потребителя, а также метод перевода потребительских требований в целевые показатели проекта и основные элементы, обеспечивающие качество, которые в дальнейшем используются на протяжении всей фазы производства.
Йоджи Акао	Перевод с английского [88]: преобразование требований (запросов) потребителей в «характеристики качества» и разработка качественного замысла (проекта) итогового продукта путем систематического развертывания взаимосвязей между требованиями и характеристиками (начиная с качества каждого функционального компонента и расширяя развертывание до качества каждой детали и процесса). Общее качество продукта будет формироваться через эту сеть взаимоотношений.
Сулли- ван	Перевод с английского [80]: общая концепция, которая обеспечивает перевод требований заказчика в соответствующие технические требования для каждого этапа разработки и производства продукта (например, маркетинговые стратегии, планирование, проектирование и разработка продукта, оценка прототипа, разработка производственных процессов, производство, продажи).
Куру- нова, Гвоздев	Это структурированный процесс, язык визуального моделирования, последовательность внутренне связанных моделей, ориентированных на решение проектных задач, характерных для разных стадий жизненного цикла изделий [46].
Романов, Шпотя	Это методика, состоящая из рамочного (обобщенного) алгоритма реализации определенных аспектов создания продукта (как правило, присущих этапам ЖЦ проектирования, разработки и производства изделия) и метода графического моделирования «Дом качества», обеспечивающая согласованный переход между требованиями разных аспектов создания: от анализа требований – к функциональному анализу и к синтезу системы. Концептуально выражается в виде графической модели, на которой модели «Домов качества» последовательно связаны между собой.

Для перевода требований заказчика в инженерные требования в «СФК» используется метод и язык графического моделирования «Дом качества». «ДК» получил свое название потому, что одна из его матриц выполняется в виде треугольника и напоминает «крышу дома» [89]. В таблице 1.3 представлены определения «ДК». В связи с этим стоит отметить, что так как методика «СФК» была признана самым полезным инструментом в области тотального управления качеством [22], которая используется для реализации стратегии CALS, то, соответственно, развитие методики «СФК», метода и языка «ДК», будет также развивать методическое и лингвистическое обеспечение CALS и создавать основы для развития CALS.

Таблица 1.3 – Определения «Дом Качества»

Автор	Определение «Дом качества»
Херцвурм, Меллис	Это, с одной стороны, язык графического моделирования для построения нескольких взаимосвязанных диаграмм, таблиц и матриц в форме «дома», а с другой стороны метод, которые позволяют анализировать и приоритизировать требования заказчика (голос заказчика (Voice of the Customer) – ГЗ) и переводить их на язык разработчиков (голос инженера (Voice of the Engineer) – ГИ) [38].
Андон	Самая распространенная матрица, используемая в «СФК» [90].
Клаузинг	Матрица, которая предоставляет концептуальную карту процесса проектирования продукта [91].
Переми-тина	Основа «СФК» – построение фигурной матрицы, названной в соответствии со своей формой «Дом качества», в рамках которой фиксируется информация о качестве продукта и принимаемых решениях [92].
Абу-Ассаб	Это конструкция для сбора и понимания как ГЗ (требований заказчика), так и нахождения и приоритизации ГИ (инженерных требований) [93].
Романов, Шпота	С одной стороны, это язык графического моделирования для построения нескольких взаимосвязанных таблиц и матриц в форме «дома», а с другой стороны – метод, который позволяет анализировать зависимость удовлетворения входных параметров этапа жизненного цикла изделия, фазы проекта или аспекта проектирования (к примеру, потребностей пользователей) от реализации выходных параметров (к примеру, требований заказчика) и приоритизировать последние.

Приведенные определения указывают на то, что методика «СФК» и метод «ДК» ориентированы в первую очередь на требования заказчика и их перевод в инженерные требования таким образом, чтобы итоговое изделие удовлетворило или даже превзошло требования заказчика. Стоит отметить, что многие исследователи не отделяют «СФК» от «ДК» [21, 94], что не является корректным, поэтому в таблицах 1.2 и 1.3 указаны новые определения, в которых указано, что метод «ДК» – это основной инструмент методики «СФК».

1.2.2 Обзор применения

Первая публикация Йоджи Акао про «СФК» вышла в 1972 году [95]. Последние два десятилетия «СФК» продолжает набирать популярность среди самых разных дисциплин. Об этом свидетельствует анализ статистики проиндексированных Scopus публикаций с ключевым словом «QFD» («СФК») в рецензируемых изданиях (см. рисунок 1.4). Анализ таких публикаций по странам за периоды с 1972 по 1999 и с 2000 по 2019 годы представлен в таблице 1.4.

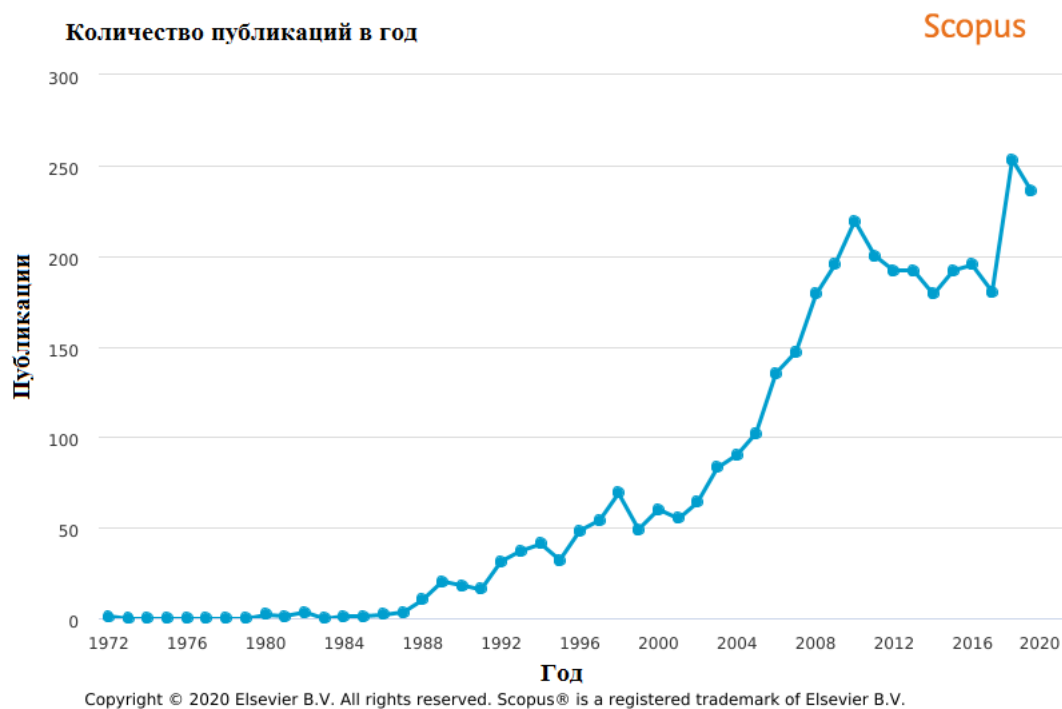


Рисунок 1.4 – Ежегодная статистика проиндексированных системой Scopus публикаций, связанных с «СФК» («ДК») за период с 1972 по 2019 год

Таблица 1.4 – Анализ публикаций, связанных с «СФК» («ДК»), по 10 странам за периоды с 1972 по 1999 и с 2000 по 2019 годы (данные Scopus)

Период: с 1972 по 1999 годы		Период: с 2000 по 2019 годы	
Страна	Количество публикаций	Страна	Количество публикаций
США	213	Китай	669
Великобритания	38	США	372
Германия	13	Тайвань	316
Япония	12	Индия	237
Китай	11	Турция	146
Канада	10	Иран	132
Гонконг	9	Великобритания	132
Швеция	9	Индонезия	123
Финляндия	8	Италия	108
Италия	7	Бразилия	102

Детальный анализ статистики показал, что с 2000 по 2010 годы было проиндексировано 1329 публикаций, а с 2011 по 2019 проиндексировано 1819 публикаций связанных с «СФК». За период с 2000 по 2019 градация количества публикаций по предметным областям выглядит так: инженерия – 1866, компьютерные науки – 1026, бизнес, менеджмент и бухгалтерский учет – 848,

принятие решений – 449, математика – 382, гуманитарные науки – 244, материаловедение – 170, экология – 150, энергия – 100, экономика, эконометрика и финансы – 87.

По данным таблицы 1.4 можно сделать косвенный вывод о положительной корреляции применения методики «СФК» («ДК») с развитием научно-технического потенциала стран в которых он изучается. Это подтверждается конкретными выводами о положительном влиянии «СФК» на повышение эффективности компаний разных стран мира, включая США, Бразилию, Германию, Японию, Швецию, Индию, Китай [93, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102]. Из этих работ важно отметить следующие преимущества методики «СФК» (метода «ДК»):

- сокращает технологические изменения на 30% – 50%;
- сокращает производственные циклы на 30% – 50%;
- снижает стартовые затраты на 20% – 60%;
- уменьшает количество гарантийных претензий на 20% – 60%;
- снижает стоимость проектирования на 60%;
- снижает риск неверных интерпретаций требований заказчика;
- улучшает коммуникацию между департаментами внутри организации.

С 2015 по 2019 год опубликовано шесть из восьми частей международного стандарта ИСО 16355, посвященных разным аспектам реализации «СФК» на практике [103, 104, 105, 106, 107, 108]. Данный стандарт является рамочным алгоритмом применения так называемой «комплексной модели СФК» (от англ. Comprehensive QFD) [109]. Несмотря на то, что в литературе связанной с «СФК» указывается на необходимость изучения потребностей пользователей и требований заказчика [22, 109], анализ известных модификаций моделей «СФК», отражающих жизненный цикл изделия или проекта [34, 37, 39, 93, 110, 111, 112, 113], показывает, что отдельной фазы «СФК» для перевода потребностей пользователей в требования заказчика не существует. Также имеет место неопределенность в терминологии: иногда встречаются такие словосочетания как «требования пользователей» [46, 93, 21, 94] или «потребности заказчика» [114]. Дополнительный анализ показывает, что широко практикуются модификация и адаптация методики «СФК» для решения персонализированных задач пользователей [102, 116, 117]. С точки зрения процесса создания технических объектов широкого класса (в том числе, спутниковых систем и услуг) необходимо разделять конечного потребителя продукции/услуг с его пожеланиями/потребностями (голос пользователей (Voice of User) – ГИ [54, 115]) от требований заказчика, а для этого необходимо, чтобы модель жизненного цикла изделия методики «СФК» содержала дополнительную фазу (этап). Эта фаза должна быть предназначена для перевода потребностей пользователей в требования заказчика. Также для проектирования и разработки модель «СФК» должна быть адаптирована под требования

нормативно-технической документации к порядку реализации жизненного цикла (включая требования к отчетным документам, разрабатываемым на этапах ЖЦ).

1.2.3 Анализ и определение ПО, доступного широкой аудитории пользователей

Современный анализ программного обеспечения для использования «СФК» в РФ выполнен в работе [46], в которой сформулирован вывод: что в настоящее время наиболее удобным ПО для создания моделей «ДК» с помощью таблиц (с учетом использования готовых шаблонов или с учетом разработки собственных шаблонов модели «ДК») являются MS Excel или Open Office Calc. Такая оценка программного обеспечения MS Excel коррелирует с результатами анкетирования 60 пользователей «СФК» в 1997 году. Было отмечено, что существовавшее на рынке программное обеспечение для «СФК» имело много слабых сторон, в результате чего пользователи разрабатывали чаще всего свое ПО. Исследование также показало, что самым популярным программным обеспечением для «СФК» на тот момент был MS Excel [118]. В 2003 году эти же исследователи опубликовали результаты нового аналогичного опроса, в котором уже отмечается появление как минимум трех иностранных производителей программного обеспечения для «СФК», превосходящего MS Excel [119].

В условиях отсутствия отечественного специализированного программного обеспечения для реализации классического варианта «СФК» («ДК»), а также их персонализированных модификаций для решения научно-технических, производственных задач, возникает потребность в исследовании и использовании инструментов, которые уже есть у потенциальных пользователей. В этом контексте исследование [120], посвященное выбору языка программирования для реализации программного обеспечения для «СФК», установило, что язык Visual Basic (VB) является самым оптимальным языком для создания эффективного программного обеспечения для реализации подхода и модели «СФК», метода и модели «ДК». А так как MS Excel и другие продукты от Microsoft содержат интегрированную среду разработки на языке VBA (Visual Basic for Applications), то это в очередной раз свидетельствует в пользу использования для «СФК» и «ДК» ПО MS Excel.

Сопоставление результатов анализа указанных источников литературы с личным опытом создания моделей «ДК» [54, 121] обосновывает, что MS Excel – это единственное повсеместно имеющееся (доступное широкой аудитории пользователей) программное обеспечение в России, которое предоставляет гибкий функционал для реализации той или иной концепции модели «СФК», а также для создания персонализированных моделей «ДК» и для реализации метода «ДК» с учетом возможности его персонализированного изменения.

1.3 Недостатки языка SysML, методики «СФК», метода «ДК» и программного обеспечения для их использования

В результате проведенного обзора применения (подраздел 1.1.2), анализа программного обеспечения (подраздел 1.1.3), обзора источников [71, 75, 76, 77, 78, 79], а также личного опыта [54, 121], выполнен анализ теории и практики, позволивший определить недостатки («дефекты») SysML и ПО для его использования (см. таблицу 1.5, выделение ячейки цветом указывает на то к чему относится формулировка – к SysML, к ПО или к SysML и ПО).

Таблица 1.5 – Недостатки SysML и программного обеспечения для его использования

№	Формулировка	SysML	ПО
1	Разработка SysML-диаграмм требований и их актуализация требуют значительных трудозатрат (от нескольких часов до недель).		
2	Внедрение иностранного SysML-ПО требует больших затрат.		
3	SysML-диаграммы не эффективны для системного отслеживания всех взаимосвязей параметров «в» и «между» различными аспектами проектирования технического объекта.		
4	Русскоязычные учебно-методические материалы и примеры внедрения SysML в промышленные проекты – отсутствуют.		
5	Трудозатраты на изучение модельно-ориентированного системного инжиниринга сопоставимы с изучением моделирования программных, электрических и других дисциплин.		

В результате аналогичной работы в рамках методики «СФК», метода «ДК» (подразделы 1.2.2 и 1.2.3), дополнительного обзора источников литературы [46, 93, 102, 119, 122] и личного опыта [54, 121] выполнен анализ теории и практики, который позволил определить недостатки методики «СФК», метода «ДК» и ПО для их использования, препятствующие их использованию широкой аудиторией пользователей, особенно в России (см. таблицу 1.6) [32].

Таблица 1.6 – Недостатки «СФК», «ДК» и программного обеспечения для их использования

№	Формулировка	СФК	ДК	ПО
1	Классическая четырехфазная модель «Структурирование функции качества» [94, 123, 124] не подразумевает в явной формулировке проектирование технических объектов в соответствии с потребностями пользователей, языком «SysML» и требованиями НТД.			

Продолжение таблицы 1.6

№	Формулировка	СФК	ДК	ПО
2	Классический алгоритм метода «Дом качества» количественно не учитывает корреляции выходных параметров в модели «Дом качества» и не позволяет однозначно приоритизировать требования, выделять из них критически важные требования [121].			
3	«СФК» использует, но не генерирует входные (к примеру, потребности пользователей) и выходные данные (требования заказчика) для анализа.			
4	Заполнение информацией модели «Дом качества» требует значительных трудозатрат (от нескольких месяцев до полутора лет) [94].			
5	Создание архитектуры модели «Дом качества» требует трудозатрат времени до нескольких дней [93, 121].			
6	Программное обеспечение MS Excel не содержит шаблоны модели «ДК».			
7	Существующие иностранные шаблоны модели «Дом качества» для программного обеспечения MS Excel от «qfdonline.com» позволяют построить только четыре модели «Дом качества» с фиксированным набором полей, что не подходит для анализа сложных объектов [46].			
8	Человек может эффективно воспринимать, анализировать и управлять в модели «Дом качества» не более 20–25 параметрами, но в случае таких технических объектов как, к примеру, спутниковая аппаратура, их, как правило, больше [121].			

1.4 Проблемы языка SysML, методики «СФК», метода «ДК» и программного обеспечения для их использования

Выявленные в предыдущем подразделе недостатки в сочетании с ограниченными временными и финансовыми ресурсами каждого проекта создают ряд проблем, а именно:

1) недостатки препятствуют изучению, исследованию, созданию, развитию и внедрению программно-методического обеспечения модельно-ориентированного системного инжиниринга, основанного на SysML, «СФК» и «ДК»;

2) в РФ разработчики технических объектов не видят смысла в создании (помимо утвержденного отчетного текстового документа) «дублирующей» его содержание SysML-модели и/или модели «ДК»;

3) SysML и «ДК» модели не являются отчетными документами, которые заказчик (к примеру, спутниковой аппаратуры) может принять в качестве результата работы.

Указанные выше проблемы, в свою очередь, приводят к следующим:

1) крайне редко проводятся инвестиции в программное обеспечение для использования SysML, «СФК», «ДК»;

2) не формируются запросы в ВУЗы на подготовку соответствующих специалистов;

3) в отраслях народного хозяйства, к примеру, в космической отрасли, не проводится стандартизация в области методического инструментария модельно-ориентированного системного инжиниринга: SysML, «СФК» и «ДК».

Как результат, цифровизация промышленности в большинстве случаев заключается в локальном внедрении CAE/CAD/CAM ИТ-систем, а необходимо интегрированное их использование с помощью различных видов обеспечения CALS-технологий на всех этапах ЖЦ технических объектов. Также следствием указанных проблем является то, что в РФ отсутствует теоретическое и прикладное программно-методическое обеспечение модельно-ориентированного СИ для его применения на этапах ЖЦ проектирования и разработки технических объектов (к примеру, спутниковой аппаратуры), реализуемое в доступном для широкой аудитории пользователей программном обеспечении.

Решение данных проблем возможно за счет массового применения программно-методического обеспечения модельно-ориентированного системного инжиниринга, но для этого необходимо преодолеть выявленные недостатки SysML (см. таблицу 1.5) и «СФК», «ДК» (см. таблицу 1.6), включая недостатки программных средств для их использования, доступных широкой аудитории пользователей. Для этого была сформулирована цель по созданию методического инструментария модельно-ориентированного системного инжиниринга для проектирования технических объектов широкого класса, состоящего из новых решений, позволяющих преодолеть недостатки из таблиц 1.5 и 1.6, и основанного на конкретизации, модернизации и синтезе SysML, «СФК», «ДК», а также реализации в программном обеспечении MS Visio и Excel. Верификация и валидация методического инструментария модельно-ориентированного системного инжиниринга, должны быть осуществлены в ходе реализации различных аспектов (этапов ЖЦ) проектирования аппаратно-программных систем.

1.5 Выводы

В главе 1 выполнен анализ недостатков методического инструментария модельно-ориентированного системного инжиниринга: SysML, «Структурирование функции качества», «Дом качества» и программного обеспечения для их использования.

1. Проанализирован опыт использования модельно-ориентированного системного инжиниринга, в частности языка SysML. Проанализированы программные продукты и определено потенциальное ПО для использования SysML, доступное широкой аудитории

пользователей, – MS Visio от 2013 года, включая версию «Professional». «Из коробки» не настроено для использования SysML, но содержит в себе библиотеки языка UML.

2. Проанализирован опыт использования методики «СФК» и метода «ДК». Проанализированы программные продукты и определено, что MS Excel является программным обеспечением, доступным широкой аудитории пользователей для построения каскадной модели «СФК» из персонализированных моделей «ДК».

3. Выявлены недостатки языка SysML, препятствующие его широкому распространению, среди которых выделяются следующие: 1) требуются большие трудозатраты на разработку SysML-диаграмм; 2) высокая стоимость внедрения и эксплуатации программного обеспечения для применения SysML.

4. Выявлены недостатки методики «СФК», метода и языка графического моделирования «ДК», среди которых выделяются следующие: 1) алгоритм приоритизации требований метода «ДК» не позволяет однозначно приоритизировать выходные параметры (требования); 2) в модели «ДК» пользователь может эффективно управлять (анализировать) ограниченным набором параметров (не более 20–25).

5. Сформулированы проблемы языка SysML, методики «СФК», метода и языка «ДК», а также программного обеспечения для их использования.

6. Для преодоления определенных недостатков и проблем необходимо разработать методический инструментарий, основанный на модернизации и конкретизации инструментов модельно-ориентированного системного инжиниринга («СФК», «ДК», SysML), а также на их синтезе как между собой, так и с инструментами системного инжиниринга. Для его реализации необходимо: 1) синтезировать алгоритм приоритизации требований в модели «ДК», который позволяет количественно учитывать корреляции выходных параметров в модели «ДК»; 2) создать способ автоматизации разработки и обновления SysML-диаграмм требований; 3) разработать конкретизированную каскадную модель «СФК», позволяющую проектировать технические объекты с учетом потребностей пользователей, языка SysML и требований нормативно-технической документации; 4) разработать новые алгоритмы генерирования входных и выходных данных для этапов модели «СФК»; 5) разработать электронные шаблоны модели «ДК»; 6) выполнить верификацию и валидацию полученных в диссертационном исследовании решений и разработок.

Глава 2

Разработка новых подходов к качественному и количественному анализу выходных параметров в модели «Дом качества»

В главе 2 рассматривается разработка новых подходов к качественному и количественному анализу входных и выходных параметров в модели «Дом качества». В разделе 2.1 приводится аналитический обзор метода и языка графического моделирования «ДК». В разделе 2.2 рассматривается разработка нового способа моделирования матриц «Крыльцо» и «Крыша» в модели «ДК» для обеспечения в них двустороннего качественного анализа корреляций входных и выходных параметров с помощью экспертных оценок. В разделе 2.3 рассматривается синтез нового алгоритма приоритизации выходных параметров (требований) различных аспектов проектирования в модели «ДК» для идентификации критически важных требований.

2.1 Аналитический обзор метода и модели «Дом качества», а также способов преодоления их недостатков

В разделе 2.1 приводятся описание метода и модели «Дом качества» (подраздел 2.1.1), результаты анализа источников литературы о подходах к повышению точности оценок приоритизации выходных параметров в модели «Дом качества» (подраздел 2.1.2), дается краткая характеристика метода анализа иерархий (подраздел 2.1.3).

2.1.1 Обзор метода и модели «Дом качества»

Основным инструментом методологии «СФК» является метод «Дом качества». Он подразумевает построение модели «ДК», состоящей из структурных элементов. В каждом структурном элементе модели «ДК» указывается определенная информация и/или производится

соответствующее действие, направленное на анализ входных и выходных параметров. На рисунке 2.1 представлена абстрактная структура классической модели «ДК», которая обычно используется для реализации первого этапа классической каскадной модели «СФКа». В таблице 2.1 представлено краткое описание каждого структурного элемента модели.

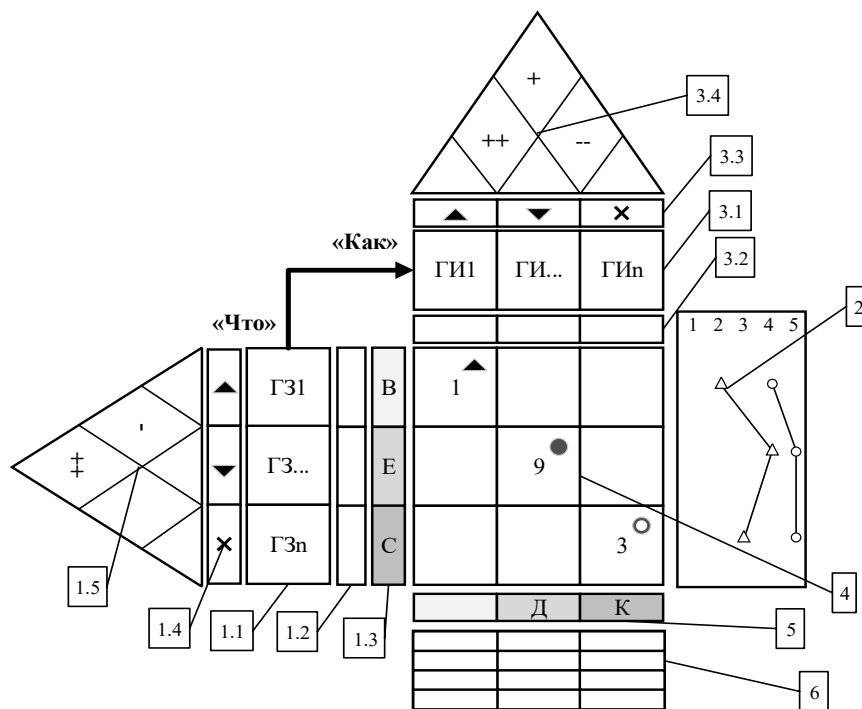


Рисунок 2.1 – Структура классической модели «Дом качества»

Таблица 2.1 – Описание структурных элементов классической модели «Дом качества»

Часть	№ п/п	Название элемента структуры модели «ДК» и краткое его описание
Левая часть модели «ДК»	1.1	Текстовые формулировки входных параметров в модели «ДК». В данном примере указаны требования заказчика (ГЗ).
	1.2	Показатели качества входных параметров в модели «ДК».
	1.3	Числовые оценки весов важности входных параметров в модели «ДК».
	1.4	Направления стремлений по улучшению показателей качества входных параметров: либо увеличивать (▲), либо уменьшать (▼), либо достичь и удерживать определенное значение (X).
	1.5	В матрице под названием «Крыльцо» указывают степени влияний (корреляции) одного входного параметра на другие. Для отображения корреляции используются графические обозначения: очень положительно (++), положительно (+), отрицательно (-), очень отрицательно (--). Как правило, если планируется структурировать несколько моделей «ДК», данная матрица строится только в первой модели «ДК», используемой в рамках первого этапа модели «СФК».

Продолжение таблицы 2.1

Часть	№ п/п	Название элемента структуры модели «ДК» и краткое его описание
Правая часть модели «ДК»	2	Результаты бенчмаркинга в ходе которого анализируются уже реализованные аналогичные изделия или услуги с точки зрения их способности удовлетворить входные параметры модели «ДК» (как правило этот процесс в методе «ДК» выполняется только для анализа ГЗ). В этом элементе указывают по каким требованиям планируемое изделие должно превосходить, быть таким же или уступать изделиям конкурентов. Визуализация оценок реализуется с помощью искусственных нейронных сетей по шкале от 1 до 5.
Верхняя часть модели «ДК»	3.1	Текстовые формулировки выходных параметров в модели «ДК». В данном примере указаны инженерные требования к изделию/услуге (ГИ).
	3.2	Показатели качества выходных параметров в модели «ДК».
	3.3	Направления стремлений по улучшению показателей качества выходных параметров (по аналогии с пунктом 1.4).
	3.4	В матрице «Крыша» указывают степени влияния (корреляции) одного выходного параметра модели «ДК» на другие.
Центральная часть модели «ДК»	4	В матрице «Центральная» указывают степень зависимости удовлетворения каждого входного от реализации каждого выходного параметра. Для записи и выражения степени зависимости используются три числовых или графических обозначения: слабая = 1 (▲), средняя = 3 (○), сильная = 9 (⊙). Если зависимости нет, то ячейку оставляют пустой.
Нижняя часть модели «ДК»	5	<p>Веса приоритизации выходных параметров рассчитывают по формуле (2.1):</p> $B_j = \sum_i (T_i * a_{ij}), \quad (2.1)$ <p>где B_j – вес приоритизации j-го выходного параметра; j – отдельно взятые выходные параметры модели «ДК» от 1 до n; T_i – нормализованный вес важности i-го входного параметра модели «ДК» (в этой работе он подсчитывается с помощью математического аппарата МАИ); i – все отдельно взятые входные параметры модели «ДК» от 1 до n; a_{ij} – коэффициент (1, 3, 9), указанный в центральной матрице, степени зависимости i-го входного параметра от реализации j-ого выходного параметра.</p> <p>Для наглядного сопоставления и визуализации полученных весов приоритизации всех параметров их целесообразно нормализовать [121].</p> <p>На рисунке 2.1 алгоритм формулы (2.1) подписан цифрами 1,3, 4, 5.</p> <p>Это заключительная операция перед переходом к следующему аспекту проектирования (к следующей модели «ДК») (см. Приложение А).</p>
	6	В этой таблице (в случае необходимости) может быть отражен бенчмаркинг показателей качества выходных параметров.

Как было отмечено в главе 1, ключевой недостаток метода «Дом качества» заключается в том, что он не позволяет количественно учитывать корреляции выходных параметров в модели «ДК» и однозначно выделять критически важные требования. Для преодоления этого недостатка был проведен дополнительный обзор литературы для анализа известных подходов для повышения точности приоритизации выходных параметров (см. подраздел 2.1.2).

2.1.2 Обзор известных подходов к точности приоритизации выходных параметров в модели «Дом качества»

Классический алгоритм приоритизации выходных параметров в модели «ДК» согласно формуле (2.1) не учитывает то, как выходные параметры коррелируют *между* собой. В классическом методе «ДК» проводится только качественный анализ корреляций выходных параметров, что не позволяет учитывать в модели «ДК» все факторы, которые способны повлиять на веса приоритизации V_j выходных параметров. Следовательно, появляется задача количественно оценивать корреляции выходных параметров и учитывать получаемые оценки в приоритизации выходных параметров в модели «ДК».

Изначально в модели «ДК» проводилось только экспертное ранжирование входных параметров в матрице «Крыльцо». Для этого заказчик самостоятельно субъективно оценивает указанные им требования по шкале от одного до пяти [115] или от одного до семи [125]. Для получения более осмысленных и научно обоснованных оценок было предложено использовать метод анализа иерархий [126, 127]. В последующем метод анализа иерархий стал самым часто используемым инструментом для работы с неполной и неточной информацией, связанной с требованиями заказчика [128]. В работе [129] предложен метод количественной оценки эмоционального ранжирования требований заказчика с помощью модели Кано. Также были разработаны подходы использования теории нечеткой логики [60, 130, 131] для конвертации вербальных экспертных оценок входных параметров, зависимостей удовлетворения входных от выходных параметров. Также было предложено заменить используемые в матрице «Крыльцо» символы, отражающие степень корреляций, на числа [132].

Для количественной экспертной оценки корреляций выходных параметров в матрице «Крыша» в модели «ДК» применялись также подходы ранжирования, основанные: на использовании метода ELECTRE-II [133]; на оценке с помощью шкалы от одного до пяти [134]; на использовании теории нечеткой логики [135]; на замене используемых в матрице «Крыша» графических символов, отражающих степень корреляций выходных параметров, на числа [136]. Также существуют работы, в которых после заполнения модели «ДК» входными и выходными параметрами, метод анализа иерархий использовался для ранжирования и выбора альтернатив,

способных удовлетворить указанные входные параметры [137, 138]. Однако, в этих работах оценки, получаемые с помощью метода анализа иерархий, не использовались для уточнения весов приоритизации выходных параметров, получаемых по методу «ДК» [136].

Использование метода анализа иерархий предпочтительно, так как он является эффективным для принятия решений в вопросах, связанных с многокритериальностью. Важное преимущество МАИ заключается в том, что метод позволяет обрабатывать интуитивные суждения человека, используя попарные сравнения со шкалой числовых коэффициентов, выверенной в течение нескольких десятилетий большим количеством пользователей. Эта шкала позволяет идентифицировать приоритеты, выражаемые экспертами естественным языком, а затем преобразовать их в числа [139, 140].

2.1.3 Алгоритм действий для реализации метода анализа иерархий

В подразделе 2.1.3 рассматривается алгоритм действий для определения количественных весов рассматриваемых параметров по методу анализа иерархий. МАИ поделен на три этапа: 1) построение иерархии и проведение попарного сравнения элементов иерархии; 2) определение собственного вектора (ранжирование); 3) проверка оценок (весов, полученных в результате ранжирования) на согласованность.

2.1.3.1 Проведение попарного сравнения элементов иерархии

Согласно логике применения метода анализа иерархий, сначала производится построение иерархической структуры, которая отражает решение поставленной задачи, далее – проводится попарная оценка элементов уровней иерархий и влияния элементов одного уровня на элементы более высокого уровня (для этого каждый элемент матрицы сравнивается попарно между собой). Результаты сравнений выражаются с помощью оценок (чисел) по шкале от 1 до 9. Значения оценок приведены в таблице 2.2 [139].

Таблица 2.2 – Описание размерности шкалы, по которой проводятся суждения во время попарных сравнений по методу анализа иерархий

Оценка	Описание оценки
1	Критерии равно важны.
3	Умеренное превосходство одного над другим.
5	Существенное превосходство одного над другим.
7	Значительное превосходство одного над другим.
9	Очень сильное превосходство одного над другим.

Продолжение таблицы 2.2

Оценка	Описание оценки
2, 4, 6, 8	Соответствующие промежуточные значения.
Обратные величины приведенных выше чисел (1 разделить на число оценки)	Если действию i при сравнении с действием j приписывается одно из приведенных выше чисел, то действию j при сравнении с i приписывается обратное значение.

2.1.3.2 Определение собственного вектора (ранжирование) и проверка полученных оценок на согласованность

Алгоритм действий для реализации этих операций отражен в таблице 2.3, где порядковый номер каждого действия выделен подчеркнутым курсивом в скобках. Описание каждого действия представлено в таблице 2.4.

Таблица 2.3 – Абстрактный пример обратно-симметричной матрицы с перечислением набора действий для ранжирования параметров по методу анализа иерархий

Параметры	A1	A...	A _n	ФОСП	НОСП	λ	ИС	ОС
A1	1 (<u>2</u>)	3	4	(<u>4</u>)	(<u>6</u>)	—	—	—
A...	1/3	1	2	(<u>4</u>)	(<u>6</u>)	—	—	—
A _n	1/4	1/2	1	(<u>4</u>)	(<u>6</u>)	—	—	—
(<u>1</u>)	(<u>3</u>)	(<u>3</u>)	(<u>3</u>)	(<u>5</u>)	—	(<u>7</u>)	(<u>8</u>)	(<u>9</u>)

Таблица 2.4 – Описание шагов действий по ранжированию параметров и проверки результатов на согласованность по методу анализа иерархий

Шаг	Нахождение собственного вектора (ранжирование)
1	Постройте обратно-симметричную матрицу по аналогии с матрицей из таблицы 2.3.
2	Заполните матрицу результатами попарного сравнения элементов иерархии.
3	Найдите сумму значений каждого столбца j , количество столбцов j от 1 до n .
4	Определите фактические оценки собственного приоритета. Для этого необходимо перемножить между собой n элементов каждой строки и извлечь корень степени n .
5	Найдите сумму фактических оценок собственного приоритета.
6	Определите нормализованные оценки собственного приоритета (вектора W). Для этого каждую фактическую оценку собственного приоритета необходимо разделить на их сумму [139].

Продолжение таблицы 2.4

Нахождение собственного вектора (ранжирование)	
Оценка результатов на согласованность	
7	<p>Найдите значение λ по формуле (2.2), перемножив по отдельности (по каждой строке i, количество которых от 1 до n) значения нормализованных оценок собственного приоритета W_i на сумму значений каждого столбца j.</p> $\lambda = \sum(W_i * \sum_{j=1}^n A_{ij}), \quad (2.2)$ <p>где W_i – это вес (нормализованная оценка собственного приоритета) отдельной компоненты собственного вектора приоритета W, A_{ij} – это отдельно взятое число столбца обратно-симметричной матрицы парных сравнений.</p>
8	<p>Найдите индекс согласованности (ИС) по формуле (2.3):</p> $\text{ИС} = (\lambda - n)/(n - 1), \quad (2.3)$ <p>где n – это количество параметров в рассматриваемой матрице (размерность матрицы).</p>
9	<p>Найдите оценку согласованности (ОС) по формуле (2.4):</p> $\text{ОС} = \text{ИС}/\text{Случайный индекс}, \quad (2.4)$ <p>где «случайный индекс» – это постоянная величина (см. таблицу 2.5).</p>

Таблица 2.5 – Статистически выверенные Т. Саати значения «случайного индекса»

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
значения «случайного индекса», соответствующие матрице заданной размерности														
0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Считается, что значение ОС должно быть не более 10–15%. Если же значение ОС лежит за пределами этого диапазона, рекомендуется пересмотреть суждения попарных сравнений элементов. В случае, если в анализе принимают участие несколько лиц (экспертов), итоговые веса получают посредством вычисления среднего значения [141].

В последующих разделах рассматриваются разработки новых подходов к качественному и количественному анализу выходных параметров в модели «ДК» с помощью МАИ.

2.2 Синтез алгоритма приоритизации выходных параметров (требований) в модели «Дом качества» для идентификации критически важных требований

2.2.1 Структурирование матриц «Крыльцо» и «Крыша» в модели «Дом качества» для двустороннего качественного анализа корреляций параметров

В подразделе 2.2.1 рассматривается способ структурирования матриц «Крыльцо» и «Крыша» в модели «Дом качества» для реализации в них двустороннего качественного анализа корреляций параметров с помощью экспертных оценок.

На рисунке 2.2 (см. изображение слева) показано, что в классической модели «ДК», в матрицах «Крыльцо» и «Крыша» [46], параметр «А» можно сравнить с параметром «Б» только один раз и в одном направлении. Но бывают случаи, когда требуется указать, как параметр «Б» влияет на параметр «А», когда корреляции влияний характеристик параметров друг на друга нелинейно и несимметрично зависимы. Классическая структура рассматриваемых матриц не позволяет отразить такие случаи. Для того, чтобы преодолеть этот недостаток и обеспечить анализ корреляций параметров в обратном и/или двустороннем направлении (как слева направо, так и справа налево), рекомендуется [94, 124] анализировать параметры с помощью построения отдельной матрицы размерностью $N \times N$. Структура подобной матрицы напоминает матрицу для попарного сравнения параметров используемую в методе анализа иерархий [139] (см. на рисунке 2.2 изображение справа).

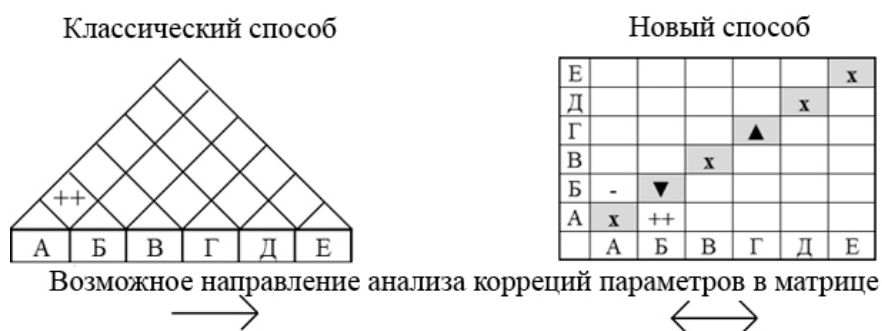


Рисунок 2.2 – Классический и новый способ структурирования матрицы «Крыша» в модели «Дом качества»

В отличие от указанных источников [94, 124], где структура матриц «Крыльцо» и «Крыша» модели «Дом качества» остается треугольной, в данной работе рекомендуется структурировать модели «Дом качества» изначально с указанными матрицами размерности $N \times N$

(рекомендованные структуры модели «ДК» см. в главе 4). Такой новый базовый способ структурирования матриц «Крыльцо» и «Крыша» в модели «ДК» характеризуется тем, что:

1. Выходные параметры указываются, к примеру, по оси X и дублируются по оси Y.
2. Направления (см. в таблице 2.1 пункт 1.4), к чему нужно стремиться по каждому параметру с целью максимизации полезного состояния системы, интегрированы в матрицы.

2.2.2 Синтез нового алгоритма приоритизации выходных параметров в модели «ДК»

В подразделе 2.2.2 рассматривается синтез алгоритма количественной приоритизации выходных параметров (требований) в модели «Дом качества» с учетом их корреляций.

На основании результатов раздела 2.1 и подраздела 2.2.1 был проведен синтез классического алгоритма получения весов приоритизации выходных параметров B_j (см. формулу (2.1)) с операцией количественных экспертных оценок корреляций выходных параметров в модели «ДК» с помощью математического аппарата метода анализа иерархий. Суть нового алгоритма заключается в том, чтобы после перемножения весов важности входных параметров T_i на веса в центральной части «ДК» a_{ij} (это классический алгоритм, на рисунке 2.3 подписан цифрами 1 и 2), полученные значения затем умножить на веса e_j выходных параметров и на веса их категорий (подсистем) $S_{1...n}$, полученные с помощью попарных сравнений выходных параметров и математического аппарата МАИ (на рисунке 2.3 эти веса подписаны цифрой 3); новый алгоритм также выражен в таблице 2.6 формулой (2.5)).

Таблица 2.6 – Формулы расчета весов приоритизации выходных параметров в модели «ДК»

Алгоритм	Классический	Усовершенствованный
Формула	$B_j = \sum_i (T_i * a_{ij}), \quad (2.1)$	$B_j = (\sum_i (T_i * a_{ij})) * (S_{1...n} * e_j), \quad (2.5)$
<p>где B_j – вес приоритизации j-го выходного параметра*; j – все отдельно взятые выходные параметры модели «ДК» от 1 до n; T_i – нормализованный вес важности i-го входного параметра модели «ДК» (в данной работе он подсчитывается по МАИ); i – все отдельно взятые входные параметры модели «ДК» от 1 до n; a_{ij} - коэффициент степени зависимости i-го входного параметра от реализации j-го выходного параметра (может принимать значения 1, 3 или 9 – указывается в центральной матрице модели «ДК»); $S_{1...n}$ – подсчитанная с помощью математического аппарата МАИ количественная оценка (нормализованная) корреляции выбранной категории выходных параметров; e_j – подсчитанная с помощью математического аппарата МАИ оценка (нормализованная) корреляции j-го выходного параметра с параметрами в рассматриваемой категории выходных параметров $S_{1...n}$.</p>		
<p>* Тип выходных параметров (ГИ или ГИ) зависит от этапа (фазы) модели «СФК»/«уСФК».</p>		

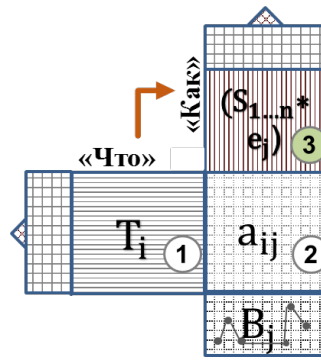


Рисунок 2.3 – Абстрактное представление модели «Дом качества» с отражением операций классического и нового алгоритмов приоритизации выходных параметров

Новый алгоритм назван «усовершенствованный Дом качества» («уДК»). Он призван обеспечить идентификацию критически важных параметров (требований) и улучшить (по сравнению с классическим алгоритмом «ДК») объективность и согласованность весов приоритизации выходных параметров B_j , которые могут выражаться в ином порядке (ранге) приоритизации и в повышении контраста получаемых весов. Модель «ДК», которая учитывает шаги алгоритма «уДК» – была названа модель «усовершенствованный ДК» (модель «уДК»).

2.3 Выводы

В главе 2 представлен новый способ структурирования матриц «Крыльцо» и «Крыша» в модели «ДК», заключающийся в изменении структуры матриц с классической (в виде треугольника) на матрицу размерности $N \times N$, схожую с той, что используется в методе анализа иерархий для попарного сравнения параметров. Это позволяет осуществлять системный (двусторонний, а не односторонний) анализ взаимовлияний рассматриваемых в модели «ДК» параметров, что повышает вероятность принятия правильного управленческого решения.

Разработан алгоритм (метод) «усовершенствованный ДК» приоритизации выходных параметров в модели «ДК», который основан на синтезе классического алгоритма приоритизации «ДК» с дополнительным учетом количественных экспертных оценок корреляций выходных параметров (требований). Для получения количественных оценок выходных параметров предложено использовать попарные сравнения параметров и математический аппарат метода анализа иерархий. Алгоритм «усовершенствованный ДК» призван обеспечить иной, более согласованный, ранг приоритизации выходных параметров и более высокий контраст их весов (по сравнению с классическим алгоритмом метода «ДК»).

Полученные результаты целесообразно учитывать при построении средств автоматизированного проектирования или специализированного ПО для анализа и синтеза проектных

решений, так как обеспечивают согласованный количественный анализ взаимосвязи рассматриваемых параметров аспектов (этапов) проектирования и их приоритизацию. Кроме того, данные результаты необходимы для разработки научной основы реализации стадий и этапов ЖЦИ как единого проекта в рамках конкретизации модели «СФК» (рассматривается далее, в главе 4). А так как было показано, что «СФК» признана самым полезным инструментом в области тотального управления качеством [22], который используется для реализации стратегии CALS, то можно утверждать, что представленные в данной главе результаты вносят вклад в развитие стратегии CALS, а также методического и лингвистического обеспечения CALS. Результаты верификации и валидации алгоритма «УДК» представлены далее в главе 5.

Глава 3

Создание способа автоматизации разработки SysML-диаграмм требований и обновления в них информации

В главе 3 рассматривается способ автоматизации разработки SysML-диаграмм требований и обновления в них информации. В разделе 3.1 проводится аналитический обзор языка SysML и формулируется задача создания указанного способа. В разделе 3.2 рассматривается концепция способа, состоящего из четырех алгоритмов.

3.1 Аналитический обзор языка SysML и постановка задачи

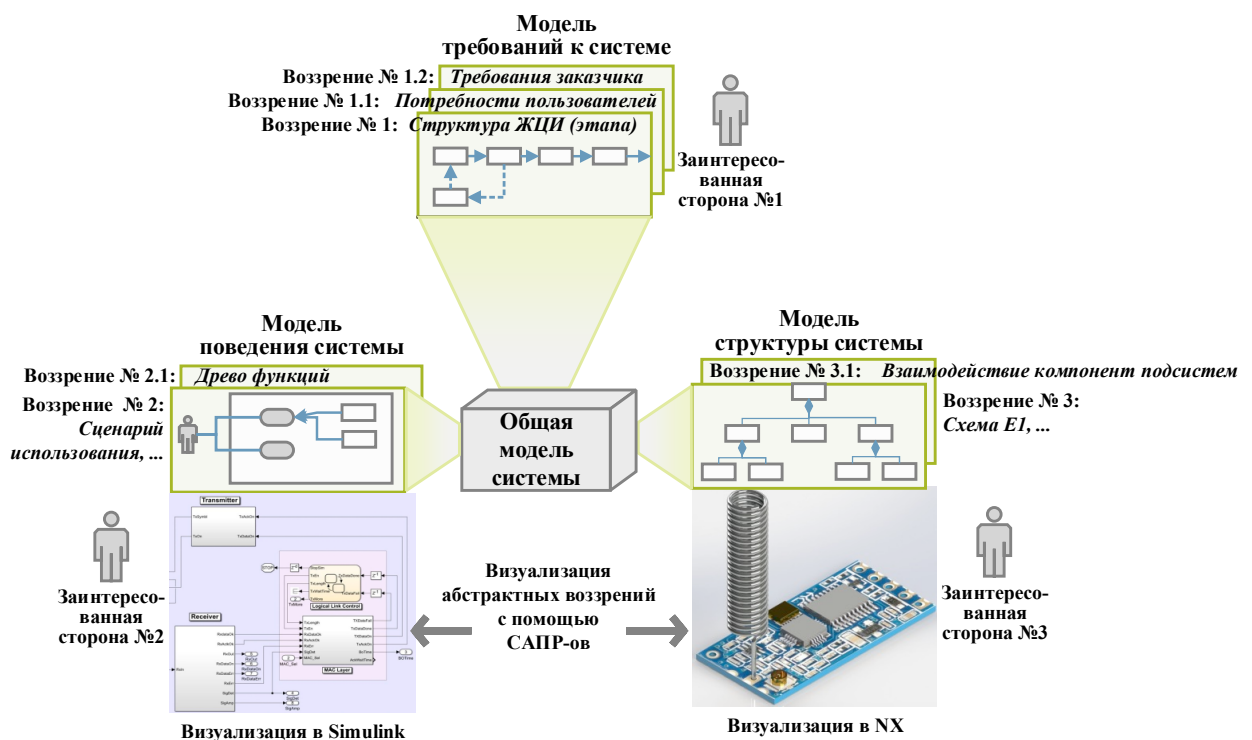
В данном разделе рассматривается роль SysML в разработке интегрированной (общей) модели системы (подраздел 3.1.1), приводится таксономия SysML-моделей, обзор их базовой конструкции (подраздел 3.1.2), обосновывается задача главы (подраздел 3.1.3).

3.1.1 Анализ роли языка SysML в разработке интегрированных моделей систем

Научные основы, формируемые на методах и средствах следующего поколения, обеспечивающие принципиально новое взаимодействие проектировщика (и иных заинтересованных сторон) с системой на протяжении всего жизненного цикла изделия, относятся в теории САПР к CALS (информационной поддержке изделий), а в системном инжиниринге к МОСИ++. МОСИ++ основан на идее разработки и использования интегрированной (общей) модели системы (программно-аппаратного объекта) на всех стадиях жизненного цикла [2]. Интегрированная (общая) модель системы служит как цифровой «чертеж» (при простой реализации), так и цифровым двойником системы (при высокотехнологичной реализации). Концептуально полнофункциональная интегрированная модель системы представлена на рисунке 3.1 [142].

С одной стороны, интегрированную модель системы можно сравнить с «ветвистым деревом». Анализируя каждую «ветвь», можно изучить сложный технический объект с разных точек зрения (воззрений): предъявляемых требований, функций (поведения) и архитектур аппаратной и/или программной частей, а также проследить взаимосвязи между воззрениями.

Каждая точка зрения на систему выражается с помощью соответствующих абстрактных SysML-моделей: 1) требований; 2) поведения (функций); 3) структур (архитектуры) [143]. Следует отметить, что SysML (язык разработки ИМС [2]) не заменяет языки моделирования инженерных дисциплин, таких как машиностроение, электротехника, теплотехника и другие.



Источник: Flavio Oquendo, Jair Leite, Thais Batista. Software Architecture in Action. Springer. 2016

Рисунок 3.1 – Концепция интегрированной (общей) модели системы (полнофункциональной)

С другой стороны, ИМС можно сравнить сначала с «мозгом», в котором «сознание» (пользователь) формирует сигнал по осуществлению определенного действия (к примеру изменения объекта), а затем с «нервной системой», по которой передается сигнал в «органы» (САПР или иные программные средства), которые осуществляют свою функцию. Далее по ней же, из «органов» передается через «мозг» в «сознание» обратная связь, по которой пользователь делает суждение о выполненном действии и полученном результате. Иными словами, пользователи, изменяя целевые параметры в SysML-моделях, могут непосредственно из нее, в отличие от ситуации, когда, к примеру, используются чертежи, представляющие статическое отображение рассматриваемого функционала системы, запустить САЕ ИТ систему для

имитационное моделирование, а также проследить динамику поведения (а также всех изменений) системы и ее составных частей при изменении их параметров. Таким образом, интегрированная модель системы выступает в роли «ядра» вокруг которого формируется единый источник достоверной информации о создаваемом объекте. Также с помощью ИМС и соответствующих видов обеспечения CALS можно автоматизировать формирование отчетной документации, верификацию и валидацию, идентификацию возможных дефектов [65].

Реализация концепции интегрированной модели системы с помощью программно-методического обеспечения модельно-ориентированного СИ требует разработок как минимум по двум направлениям: 1) разработка научно-практических основ эффективного моделирования технических объектов с помощью современных языков (методов) МОСИ – SysML, ДК (данный пункт описан в рамках этого диссертационного исследования); 2) разработка соответствующего программного средства вычислительной техники, основанного на видах обеспечения CALS, обеспечивающего двустороннюю взаимосвязь и синхронизацию данных из SysML-моделей (диаграмм) с параметрами создаваемых объектов, содержащихся в файлах целевых САПР или иных программных средствах, используемых в ходе реализации проекта (ЖЦИ).

Разработка ПМО, основанного на указанных выше пунктах, станет основой для проектирования, построения, масштабирования и функционирования интегрированных интерактивных комплексов МОСИ для автоматизации анализа и синтеза проектных решений, а также создания проектной, конструкторской, технологической и иной документации на всех этапах жизненного цикла изделий. Реализация таких информационных технологий позволит кардинально сократить сроки создания и ввода в эксплуатацию образцов новой техники, ускорить научно-технический прогресс в различных отраслях промышленности, ускорить унификацию протоколов передачи данных между SysML-моделями и целевыми САПР, программными средствами, используемыми в реализации жизненного цикла изделий.

Определенные в главе 1 недостатки и проблемы языка SysML препятствуют изучению, разработке и использованию научных основ CALS, интегрированной модели системы.

3.1.2 Анализ таксономии и назначений использования SysML-моделей

Структура языка SysML состоит из трех видов SysML-моделей (см. рисунок 3.2), состоящих из диаграмм, которые, в свою очередь, состоят из модельных конструкций для представления текстовых требований и для их взаимосвязи с другими элементами моделирования. На рисунке 3.2 отображена таксономия SysML-моделей, основанная на концепции консорциума OMG (Object Management Group). Заголовки блоков, которые отражают

названия видов SysML-моделей и типов их диаграмм, переведены с английского языка и адаптированы с точки зрения их применения для разработки интегрированной модели системы.

Самой часто используемой конструкцией (абстракцией высокого уровня) является SysML-фигура с заголовком (стереотипом) – «блок». С помощью «блоков» определяют любой компонент системы с позиций внутреннего концептуального единства или логических абстракций [65]. В таблице 3.1 представлено описание SysML-моделей и их диаграмм.

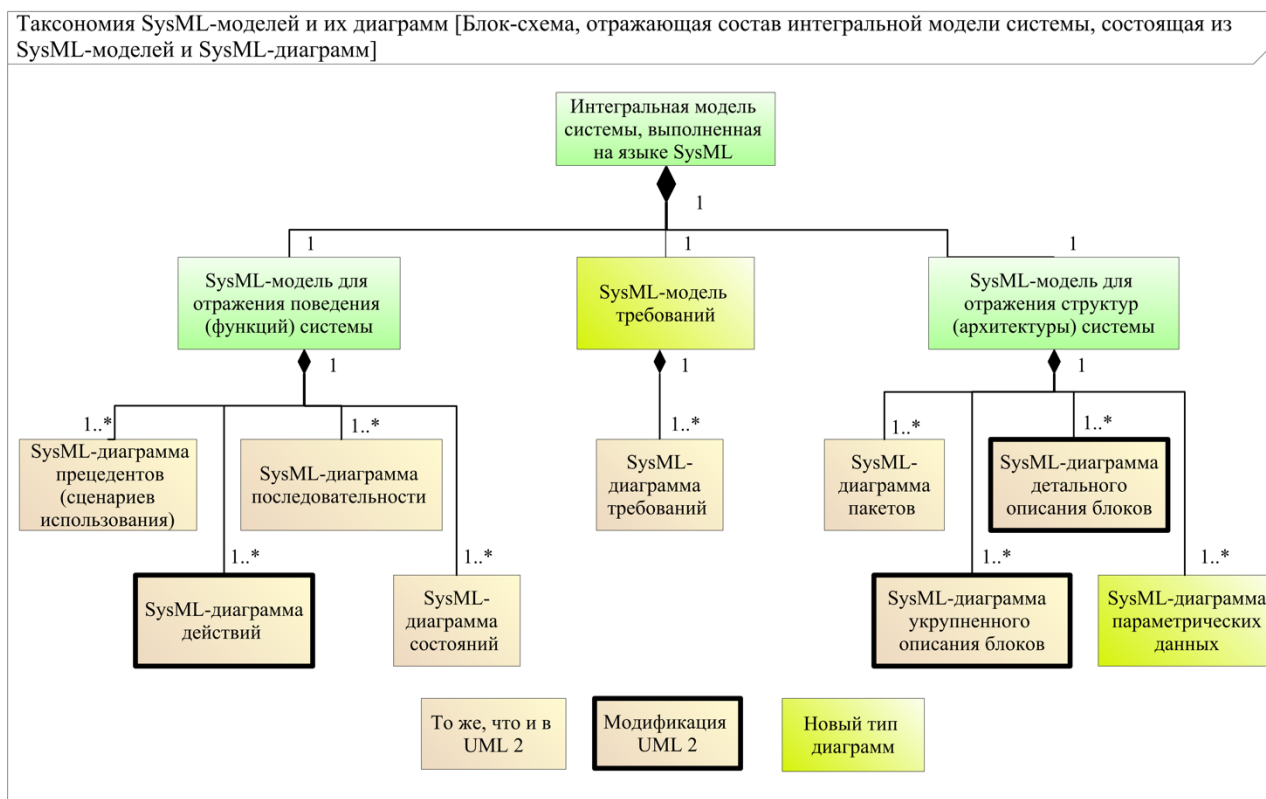


Рисунок 3.2 – Таксономия SysML-моделей и входящих в их состав SysML-диаграмм

Таблица 3.1 – Краткое описание SysML-моделей и их диаграмм

Рассматриваемая SysML-модель и краткое описание ее назначения	
SysML-диаграмма	Краткое описание рассматриваемой SysML-диаграммы
SysML-модель требований:	призвана обеспечить взаимосвязь между традиционными инструментами к управлению требованиями и другими моделями SysML. Требование уточняет возможность или условие, которое должно быть удовлетворено [28].
SysML-диаграмма требований	Может содержать требования и их взаимосвязи с другими требованиями, элементами проектирования, а также правилами тестирования для поддержки отслеживаемости, соответствия, верификации и валидации. Определяет и конкретизирует функции или тактико-технические характеристики, которые система (технический объект) должна выполнять и достигать.

Продолжение таблицы 3.1

Рассматриваемая SysML-модель и краткое описание ее назначения	
SysML-диаграмма	Краткое описание рассматриваемой SysML-диаграммы
SysML-модель для отражения поведения (функций) системы: определяет, как система (ТО) или ее составная часть взаимодействует со средой, в которой они функционируют, и каким образом эксплуатационная среда модифицирует их состояние. Диаграммы этой модели показывают «Что и как» система или составная часть должны выполнять, чтобы соответствовать требованиям.	
SysML-диаграмма прецедентов	Описывает целевые задачи системы в терминах функциональности с позиции ее пользователей.
SysML-диаграмма действий	Описывает аспекты поведения системы через последовательность выполняемых действий, а также конкретные мероприятия, преобразующие входы в выходы.
SysML-диаграмма последовательности	Описывает поведение и взаимодействие блоков как последовательность обмена информационными сообщениями. Используется, в основном, для отображения временных последовательностей.
SysML-диаграмма состояний	Описывает поведение, зависящее от состояния блока на протяжении его жизненного цикла, с позиции понимания всех его дискретных состояний и переходов между ними.
SysML-модель для отражения структур (архитектуры) системы: предназначена для отображения построения составных частей в соответствии с архитектурой моделируемой системы (ТО). Также используется для конкретизации элементов, параметров системы (ТО) и их количественных характеристик, таких, как физические свойства или показатели эффективности.	
SysML-диаграмма пакетов	Описывает верхнеуровневые структуры и содержание SysML-модели. Под пакетом понимается место накопления конструкций SysML-модели, к примеру SysML-диаграмм из которых состоит SysML-модель.
SysML-диаграмма укрупненного описания блоков	Описывает характеристики блоков с точки зрения конструкции и особенностей поведения, взаимосвязей между ними и предельных значений моделируемых параметров.
SysML-диаграмма детального описания блоков	Описывает внутреннее построение блоков, с уточнением соединений между блоками и портов на входе и выходе каждого блока.
SysML-диаграмма параметрических данных	Используются блоки с заданными ограничениями, определяющие предельные значения в терминах уравнений. Для этого блоки ограничений сопоставляются непосредственно с аналитическими инструментами (САПР), позволяющими расширить пределы возможностей начальной системы уравнений и масштабируемость параметрических диаграмм [65].

3.1.3 Постановка задачи главы

Главные объекты, вокруг которых выстраиваются все проектные работы – это всевозможные потребности и требования к рассматриваемому (создаваемому) объекту. В интегрированной модели системы требования возможно моделировать с помощью SysML-моделей (диаграмм) требований. Основная конструкция моделирования таких диаграмм – это SysML-фигура с заголовком «требование» (см. рисунок 3.3). Как правило, она состоит из краткого названия и детального описания, а также свойств/характеристик (атрибутов).

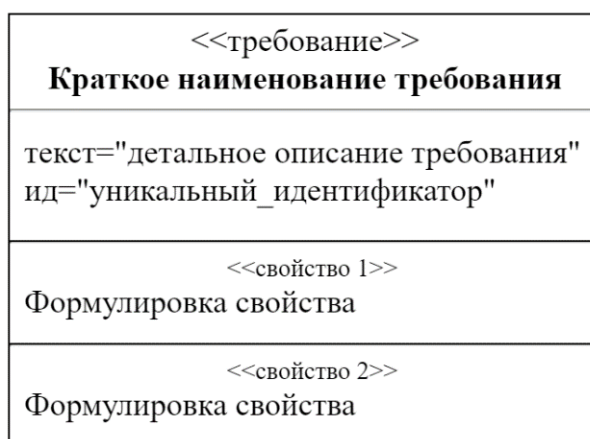


Рисунок 3.3 – Пример SysML-фигуры требований с дополнительными уточняющими атрибутами (свойствами)

Как было отмечено в главе 1, важный недостаток SysML заключается в том, что разработка SysML-моделей требований – весьма трудозатратный процесс. Анализ функционала офлайн версий программного обеспечения MS Visio (Professional) от 2013 года показал, что оно позволяет: 1) синхронизировать графические фигуры с данными из внешних источников (к примеру, из базы данных в виде таблицы книги MS Excel, баз данных MS Access или MS SQL Server); 2) разрабатывать персональные графические фигуры. Такой функционал позволяет экономить трудозатраты на перенос текстовой информации из текстовых документов в графические конструкции SysML-диаграмм.

С учетом выявленного функционала MS Visio была поставлена задача создания способа автоматизации разработки SysML-диаграмм требований и обновления в них информации за счет объединения данных из модели «ДК» с SysML-фигурами требований, реализуемого с помощью ПО MS Excel и MS Visio.

3.2 Создание способа автоматизации разработки SysML-диаграмм требований и обновления в них данных

В данном разделе рассматривается создание способа автоматизации разработки и обновления SysML-диаграмм требований, состоящего из четырех алгоритмов действий.

Было разработано четыре алгоритма (см. рисунок 3.4), каждый из которых представлен в виде пошагового описания действий (подразделы 3.2.1–3.2.4).

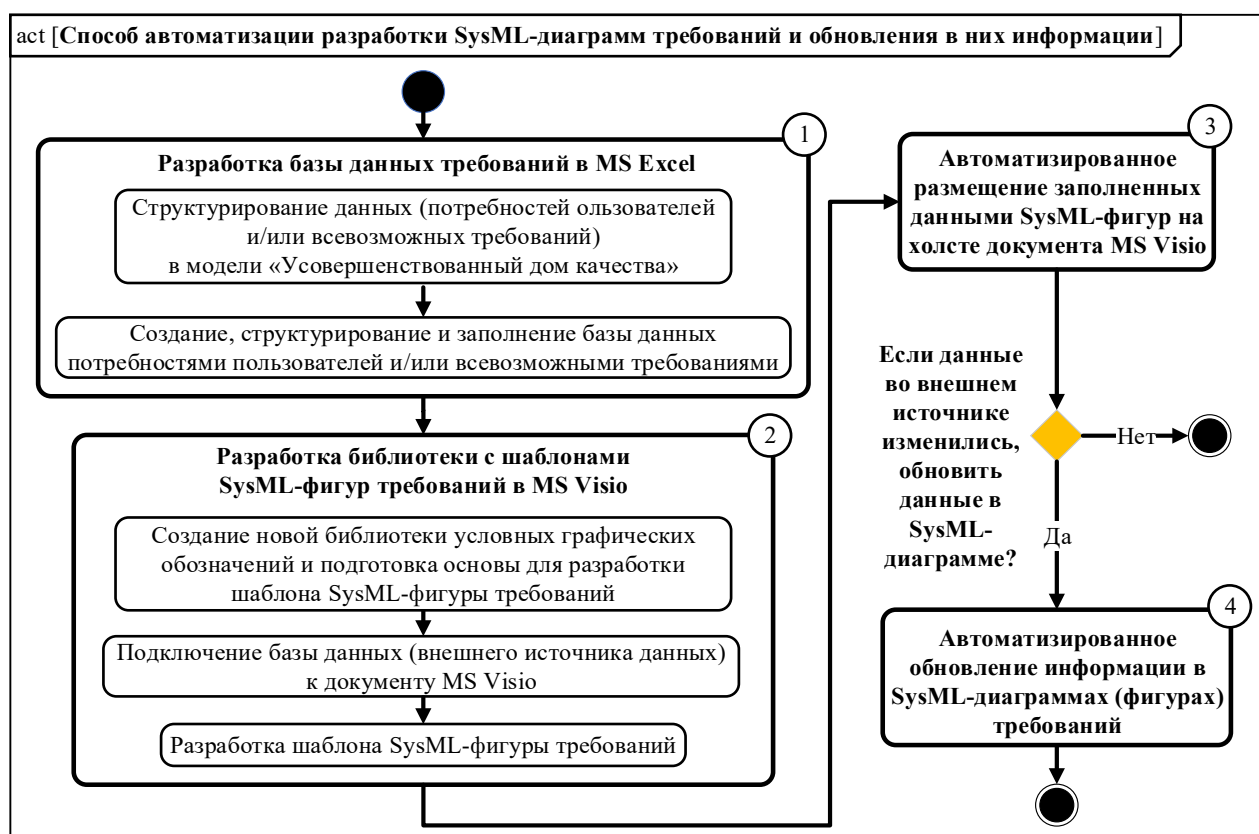


Рисунок 3.4 – Способ автоматизации разработки SysML-диаграмм требований и обновления в них информации: комплекс алгоритмов

1. Алгоритм разработки базы данных (БД) в MS Excel для конвертации параметров и их характеристик из модели «ДК» в SysML-фигуры требований в MS Visio.
2. Алгоритм разработки библиотеки шаблонов SysML-фигур требований в MS Visio.
3. Алгоритм автоматизированного размещения SysML-фигур требований на холсте документа MS Visio.
4. Алгоритм автоматизированного обновления информации в SysML-диаграммах требований в MS Visio.

3.2.1 Алгоритм разработки базы данных для конвертации текстовых требований из модели «ДК» в SysML-фигуры требований

В данном подразделе рассматривается алгоритм, предназначенный для подготовки БД с целью последующей автоматизированной конвертации исходных текстовых данных (потребностей, требований разных аспектов проектирования) из таблиц/матриц в графический вид SysML-фигур требований, а также последующей автоматизированной синхронизации внешнего источника (БД) с текстовыми параметрами с SysML-фигурами требований. Процесс рассматриваемого алгоритма поделен на два этапа действий:

1. Этап № 1. Подготовка данных в модели «ДК»/«уДК» (пункт 3.2.1.1).
2. Этап № 2. Создание, структурирование и заполнение БД (пункт 3.2.1.2).

3.2.1.1 Этап № 1. Подготовка данных в модели «ДК»/«уДК»

Для подготовки данных в модели «ДК» или «уДК» необходимо структурировать и заполнить характеристиками входных и выходных параметров следующие поля моделей:

- Идентификаторы (как правило, это уникальная аббревиатура, состоящая только из цифр, букв или цифр и букв одновременно).
- Детальные текстовые формулировки параметра (потребности или требования).
- Показатели качества (это может быть единица измерений).
- Результаты ранжирования параметров (к примеру, по модели Кано, МАИ).
- Веса параметров, полученные по алгоритму приоритизации «уДК».

3.2.1.2 Этап № 2. Создание, структурирование и заполнение базы данных

Структура базы данных характеризуется категориями информации, которые являются в дальнейшем основой разработки шаблонов SysML-фигур требований и точками синхронизации данных из внешнего источника (к примеру, из модели «уДК») с шаблонами SysML-фигур требований. Для создания БД в Excel-документе, где хранится модель «уДК», необходимо создать новый лист и разработать структуру БД. Важно отметить, чтобы пользователь назвал заголовок первой колонки БД – «Ид» («идентификатор» рассматриваемого параметра). «Ид» отвечает за стыковку информации из каждой строки БД с SysML-фигурами требований, созданных на основе шаблонов, которые, в свою очередь были основаны (автоматизировано созданы) на структуре БД. Важно, чтобы была введена в БД колонка, отвечающая за идентификацию и уникальность каждой строки, поэтому лучше ее назвать «Ид» и после

автоматизированного создания SysML-фигур на основе созданной БД, значения в строках этой колонки не менять. Названия второй и последующих колонок пользователь может указать по своему усмотрению. Пример заполнения структуры БД представлен в таблице 3.2. Рекомендуется программно (с помощью формул MS Excel) увязать ячейки матриц «удК» с ячейками БД, чтобы изменения данных в модели «удК» автоматически обновлялись в БД. Результатами выполнения данного алгоритма должны стать заполненные (полностью или частично) части модели «удК» (см. таблицу 2.1) и структура БД.

Таблица 3.2 – Пример структуры базы данных и ее заполнения

Ид	Короткое_название	Детальное_описание	Модель Кано	МАИ	удК	Характеристики:
П	Потребности пользователей	—	—	—	—	—
П.1.1	Доступность МКА	Доказать, что спутники могут создавать и запускать не только крупные компании, но и энтузиасты	Т	0,2	—	—
Т.зак.	Требования заказчика	—	—	—	—	—
Т.зак. 1	Видимость с Земли	Спутник должен быть виден с Земли как самая яркая звезда на ночном небе.	Т	44,61	75,4	Звездная величина в вспышке минус 8 m

3.2.2 Алгоритм разработки шаблонов SysML-фигур требований для их синхронизации с требованиями из модели «ДК»/«удК»

В данном подразделе рассматривается алгоритм действий по созданию в офлайн версиях MS Visio Professional от 2013 года шаблонов персонализированных SysML-фигур потребностей и/или требований на основе данных из модели «ДК»/«удК» или базы данных. Рассматриваемый процесс поделен на три этапа действий:

1. Этап № 1. Создание библиотеки для хранения шаблонов SysML-фигур требований и подготовка основы для разработки шаблона SysML-фигуры требований (пункт 3.2.2.1).
2. Этап № 2. Подключение внешних источников данных (с информацией о потребностях и/или требованиях) к документу MS Visio (п. 3.2.2.2).
3. Этап № 3. Разработка шаблонов SysML-фигур требований (п. 3.2.2.3).

3.2.2.1 Этап № 1. Создание библиотеки шаблонов SysML-фигур требований

Для создания библиотеки SysML-фигур требований, а также основы для разработки шаблона SysML-фигуры требований (потребностей) в Visio-документе предлагается выполнять следующий порядок действий:

1. Открыть в MS Visio Professional содержимое библиотеки фигур «Класс UML».
 - 1.1. Далее выбрать фигуру под названием «Перечисление».
2. Нажав левой кнопкой мышки на фигуру «Занятие» и удерживая нажатие, перетянуть и разместить ее на рабочем пространстве документа (холсте) Visio.
3. Создать новую библиотеку фигур. Для этого необходимо:
 - 3.1. В разделе «Фигуры» нажать на «Дополнительные фигуры».
 - 3.2. В открывшемся меню выбрать пункт «Создать набор элементов (метр)». В разделе «Фигуры» должна появиться новая строка с названием «Набор элементов».
 - 3.3. Нажать правой кнопкой мышки на строку «Набор элементов», затем выбрать и нажать на «Сохранить как». Указать название библиотеки и сохранить ее.
 - 3.4. В разделе «Фигуры» нажать на название созданной библиотеки. Под названием библиотеки появится надпись: «Поместите экспресс-фигуры сюда».
 - 3.5. Перетащить фигуру, созданную в пункте 2, с холста в новую библиотеку. В библиотеке появится три элемента. Оставить только элемент с названием «Master».

Результатом выполнения этапа № 1 (пункта 3.2.2.1) становится новая библиотека фигур в Visio-документе с основой для дальнейшей разработки шаблона SysML-фигур требований.

3.2.2.2 Этап № 2. Подключение внешнего источника данных к документу MS Visio

Для подключения БД в виде таблицы из книги MS Excel требований как внешнего источника данных к Visio-документу предлагается выполнять следующий порядок действий:

4. На верхней панели MS Visio выбрать вкладку «Данные» и в окне «Внешние данные» нажать на «Настраиваемый импорт».
5. В открывшемся окне в рамках ответа на вопрос: «Какие данные следует использовать?» выбрать «Книга Microsoft Excel» и нажать «Далее», затем нажать «Обзор». Выбрать Excel-файл, в котором содержится БД, нажать «Далее».
6. В рамках ответа на вопрос: «Укажите лист или диапазон, который следует использовать» нажать «Выбрать настраиваемый диапазон».
 - 6.1. В открывшемся документе выбрать лист с БД и выделить диапазон данных, начиная с ячейки A1 и до конца колонок и строк, информацию которых планируется

моделировать в Visio с помощью SysML. После выделения программа сама напишет в строке «Выберите диапазон:» значение «A1:xx». Нажать «Ок» и нажать «Далее».

7. На странице «Подключение к данным» оставить «Все столбцы» и «Все данные».

8. На странице «Настройка уникального кода обновления» в рамках «Выберите способ обозначения измененных данных» выбрать первый пункт: «Строки данных однозначно определяются значениями в следующих столбцах». Под этой строкой должны быть отображены заголовки колонок БД. Необходимо, чтобы выбрать только колонку с названием «Ид».

В результате выполнения действий этапа № 2 (пункта 3.2.2.1) в нижней части документа Visio появляется окно «Внешние данные» где отображается информация из БД.

3.2.2.3 Этап № 3. Разработка шаблонов SysML-фигур требований

Для разработки в MS Visio Professional персонализированных шаблонов SysML-фигур требований (потребностей), позволяющих автоматизировать как создание таких фигур, так и обновление в них информации, предлагается выполнять следующий порядок действий:

9. Выбрать в новой библиотеке фигуру с названием «Master» (см. пункт 3.1 в этапе №1): на нее необходимо щелкнуть левой кнопкой мышки, но не перетаскивать на холст.

10. В окне «Внешние данные» выделить максимально заполненную данными строчку (требование из БД). Нажав на эту строчку левой кнопкой мышки и удерживая нажатие, перетащить строчку на холст. На холсте появится фигура с хаотичным текстом вокруг.

11. Нажать правой кнопкой на появившуюся на холсте фигуру, в пункте «Данные» выбрать «Изменить рисунок, связанный с данными».

12. В открывшемся диалоговом окне под названием «Изменить рисунок, связанный с данными» необходимо визуально проанализировать, какие поля данных (из базы данных) MS Visio автоматически связало с новой фигурой на холсте.

13. В случае если «Поля данных» новой фигуры не соответствуют всем заполненным колонкам из выбранной строки базы данных, то необходимо в этом же диалоговом окне нажать на верхней панели «Создать элемент...» (см. рисунок 3.5).

14. Чтобы добавить не добавленные автоматически программной MS Visio «Поля данных», необходимо в открывшемся диалоговом окне под названием «Создать элемент»:

14.1. Выбрать в графе под названием «Поле данных» (в ее выпадающем меню) пункт «Другие поля...». Затем выбрать в окне «Поле» (в левой части окна «Категории») пункт «Данные фигуры», а в правой части окна «Имя поля» выбрать категорию данных, которую необходимо добавить (см. рисунок 3.5).

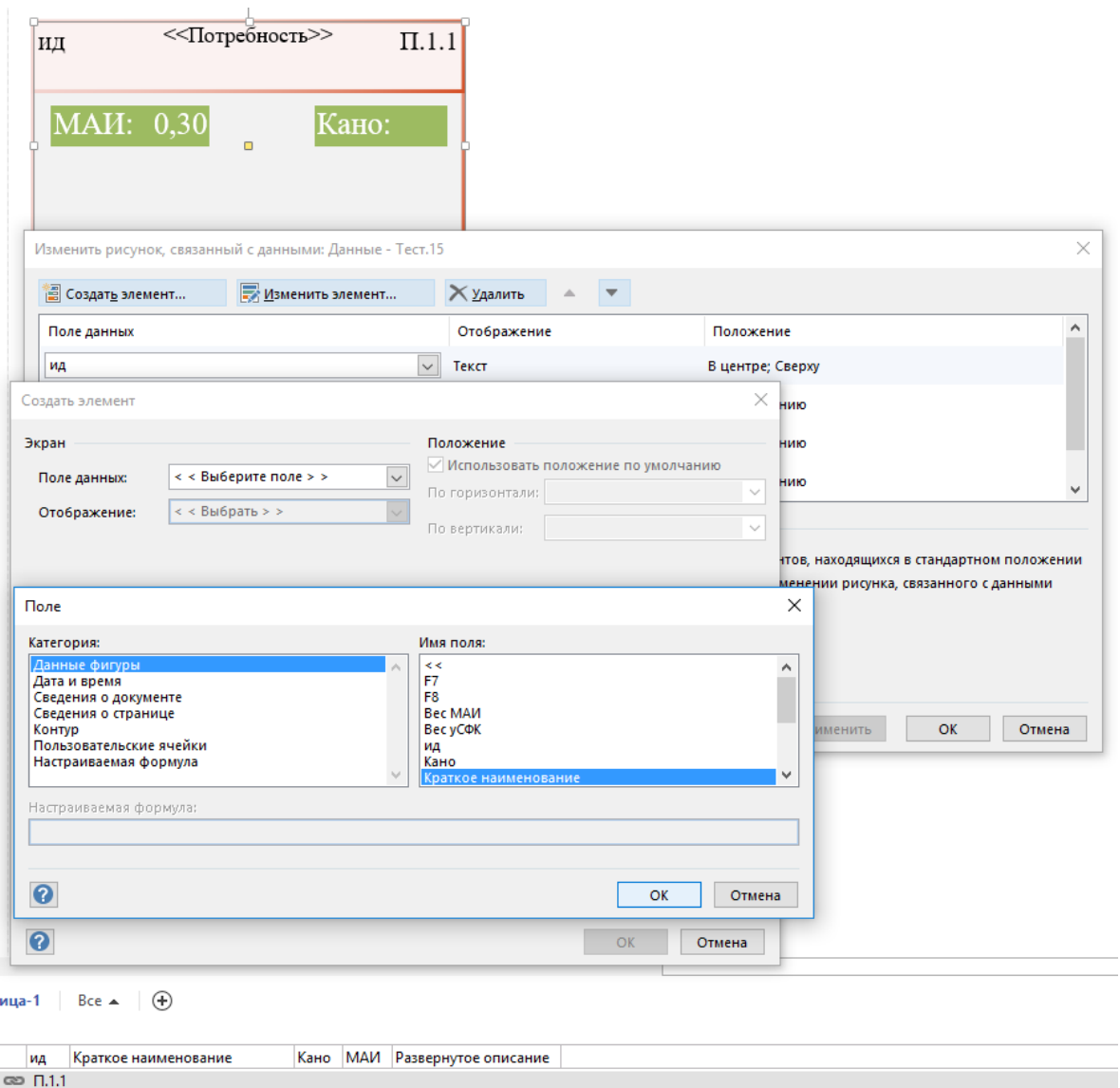


Рисунок 3.5 – Создание нового структурного элемента в шаблоне SysML-фигуры в MS Visio

- 14.2. Вернувшись в окно «Создать элемент», выбрать в следующей графе «Отображение» один из четырех видов отображения информации. Для большинства случаев подходит вариант из выпадающего списка под названием «Текст».
- 14.3. Выбрать в графе «Стиль» из выпадающего списка стиль, который удовлетворит необходимый конечный вид SysML-фигуры требования (см. рисунок 3.6).
- 14.4. В следующей графе «Сведения» в поле «Формат значения» нажать на кнопку «...» и выбрать требуемый формат. Для отображения текста – выбрать категорию «Текстовый», а для отображения чисел – «Числовой».
- 14.5. Заполнить другие поля в зависимости от требуемого внешнего вида SysML-фигуры требований (см. рисунок 3.6).
- 14.6. В окне «Создать элемент» в следующей графе «Положение» выбрать из выпадающего списка один из вариантов расположения нового поля данных по

горизонтали и по вертикали по отношению к самой фигуре. Важно снять отметку с опции «Использовать местоположения по умолчанию» и определить, в каком месте по отношению к шаблону, взятому за основу, указанный элемент будет расположен. Иначе после обновления информации есть вероятность того, что все элементы (несмотря на их заведомое размещение в структуре шаблона) займут «Положение по умолчанию» относительно шаблона. Данная особенность обнаружена в MS Visio Professional 2021. В таком случае пользователь будет вынужден вновь настраивать шаблоны SysML-фигур, переделывать SysML-диаграмму.

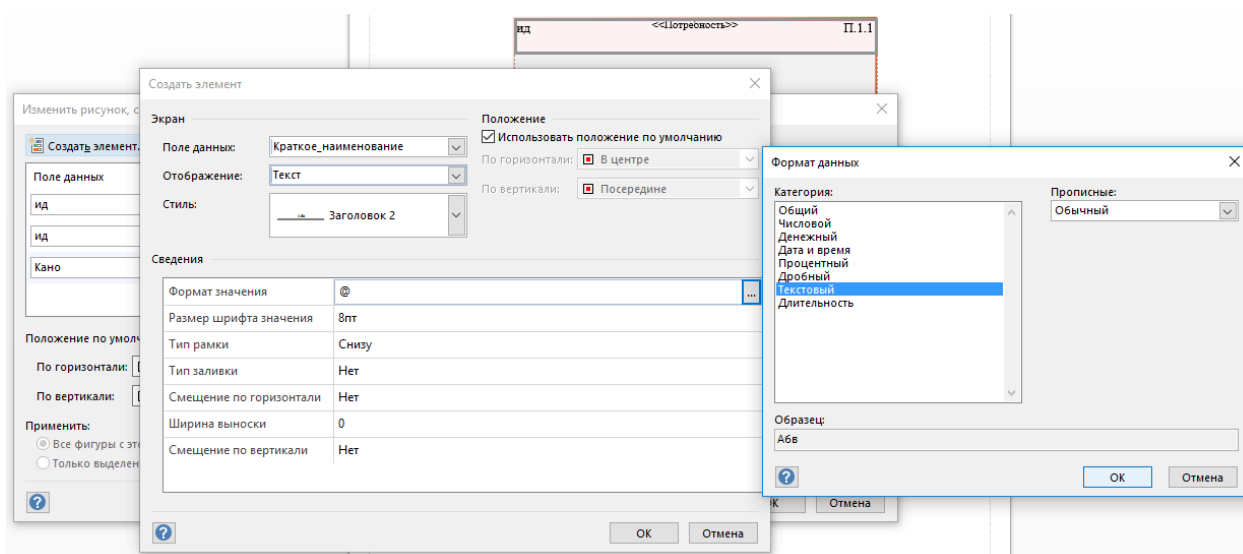


Рисунок 3.6 – Настройка структурного элемента в шаблоне SysML-фигуры

14.7. Повторить итерации пунктов 14.1 – 14.6 до тех пор, пока в фигуру не будут добавлены все необходимые «Поля данных». Нажать ОК.

15. Изменить цвет текста, связанного с фигурой из «Полей данных» (цвет может быть любым, к примеру красным – главное, чтобы он отличался от стандартного).

16. Каждое «Поле данных» перетащить в нужное место на фигуре, привести фигуру в требуемый вид SysML-фигуры требований; перетащить ее в библиотеку и переименовать.

17. Выбрав созданный шаблон SysML-фигуры, повторить пункты № 9-10.

18. В появившейся на холсте SysML-фигуре вновь появятся дубли «Полей данных», но они будут черного цвета. Необходимо удалить дубли с выбранным ранее цветом.

19. В случае необходимости вновь добавить необходимые «Поля данных» и привести шаблон SysML-фигуры в требуемый внешний вид (см. рисунок 3.7), переместить его в созданную библиотеку шаблонов SysML-фигур требований. Базовый шаблон был создан.

Примечание – Начиная с версии MS Visio от 2016 года, пункты 15, 16, 17 и 18 могут быть неактуальными.

ид	<<Потребность>>		П.1.1
Потребность пользователя			
МАИ: 0,40		Кано: Т	
Тут должно быть указано развернутое описание потребности пользователя.			

ид	Краткое наименование	Кано	МАИ	Развернутое описание
П.1.1	Потребность пользователя	Т	0,4	Тут должно быть указ...

Рисунок 3.7 – Пример шаблона SysML-фигуры потребностей конечных пользователей, заполненного данными из подключенной БД

20. По аналогии с разработкой базового шаблона SysML-фигуры требований подготовить шаблоны SysML-фигур требований для всех остальных вариантов заполнения информацией строк базы данных, сохранить шаблоны в библиотеке.

3.2.3 Алгоритм автоматизированного построения SysML-диаграмм требований

В данном подразделе рассматривается последовательность действий алгоритма построения SysML-диаграмм требований с помощью автоматизированной конвертации текстовых параметров из БД в SysML-фигуры. Для этого необходимо:

1. В окне «Внешние данные» выбрать однотипно заполненные строки.
2. В созданной библиотеке SysML-фигур выбрать шаблон SysML-фигуры требований, который может корректно отразить данные выбранных однотипно заполненных строк.
3. Перетащить выделенные строки из «Внешних данных» на холст Visio-документа.
4. Повторить шаги 1–3 для конвертации всех текстовых требований в SysML-фигуры.
5. Распределить SysML-фигуры по холсту Visio-документа в соответствии с порядком, иерархией и логикой выполнения или прочтения требований (см. рисунок 3.8).
6. Отформатировать по ширине и высоте SysML-фигуры требований.

Таким образом, большой объем информации (сотни параметров или требований с их характеристиками) безошибочно конвертируется, к примеру, из БД в виде таблицы книги MS Excel, в SysML-фигуры требований за секунды или минуты.

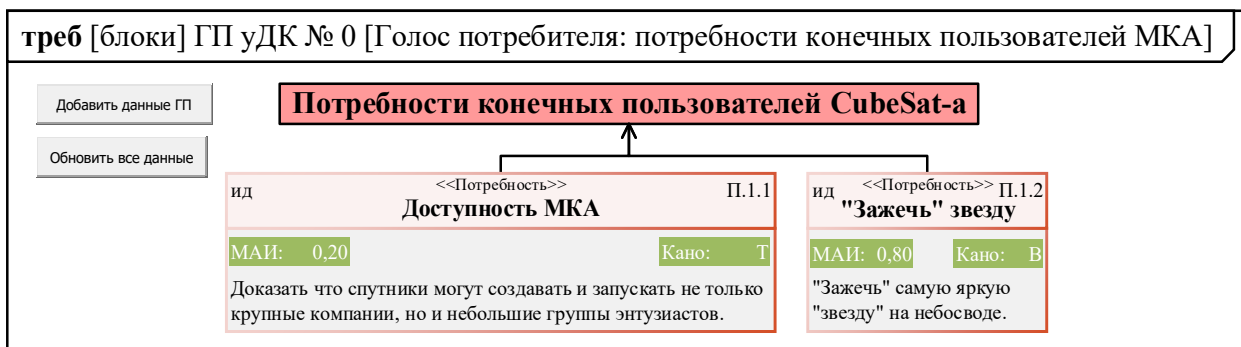


Рисунок 3.8 – Пример SysML-диаграммы потребностей пользователей, построенной с помощью способа автоматизации разработки SysML-диаграмм требований

3.2.4 Алгоритм автоматизированного обновления информации в SysML-диаграммах

В данном подразделе предлагается порядок действий алгоритма автоматизированного обновления информации в SysML-фигурах, -диаграммах, -моделях требований (при условии их построения по указанным выше алгоритмам действий (см. подразделы 3.2.1–3.2.3)).

После внесения изменений во входные или выходные параметры в модели «уДК» или в подключенной к ней БД обновить основанные на этих параметрах SysML-фигуры можно за несколько секунд. Для этого необходимо:

1. Открыть Visio-документ с SysML-диаграммой требований.
2. В окне «Внешние данные» выбрать любую строку с символом «Цепь» (символ расположен слева от колонки «Ид») (см. рисунок 3.7).
3. Нажать на эту строку правой кнопкой мыши и выбрать пункт «Обновить данные».

Для автоматизации некоторых действий подразделов 3.2.1–3.2.4 с помощью интегрированной в продукты MS среды разработки на языке VBA были написаны программы (макросы). Один из таких макросов, выраженный в виде кнопки «Обновить данные» (см. рисунок 3.8), позволяет выполнить действия подраздела 3.2.4 по обновлению данных.

3.3 Выводы

В главе 3 предложена автоматизация процессов моделирования требований разных аспектов проектирования на языке SysML с помощью разработки новых графических элементов, соответствующих языку SysML и конкретизации применения программных средств MS Visio (Professional) и MS Excel, доступных широкой аудитории пользователей. В результате создан способ автоматизации разработки SysML-диаграмм требований и обновления в них информации,

снижающий трудозатраты на указанные процессы с нескольких дней до нескольких часов и минут. Для реализации указанного способа:

1. Получен алгоритм для реализации в MS Excel действий по разработке структур баз данных, которые являются промежуточным звеном для последующей конвертации параметров (требований и их характеристик), выраженных в текстовом виде (хранящихся в матрицах и таблицах модели «ДК»/«уДК»), в графические SysML-фигуры требований.

2. Получен алгоритм для реализации в MS Visio 2013 (Professional) действий по разработке шаблонов SysML-фигур требований, которые в последующем используются для автоматизированной конвертации текстовых требований из модели «ДК»/«уДК» (баз данных) в SysML-фигуры требований.

3. Получен алгоритм для реализации в MS Visio действий по разработке SysML-диаграмм требований с помощью автоматизированной конвертации текстовых требований из баз данных в SysML-фигуры требований.

4. Получен алгоритм для реализации в MS Visio действий по автоматизированному обновлению информации в SysML-диаграммах требований. Для автоматизации действий по обновлению разработан и реализован в MS Visio макрос (программа) на языке VBA.

Созданный способ обеспечивает минимизацию финансовых затрат на ПО для проектирования систем с помощью методического инструментария МОСИ (SysML). Также он обеспечивает для широкой аудитории пользователей возможность с минимальными трудозатратами изучить и применить методику и язык SysML, в том числе для разработки интегрированных моделей систем с точки зрения требований к системе. ИМС является основой для построения цифрового двойника изделия и управления им.

Таким образом, полученный результат развивает в первую очередь лингвистическое обеспечение CALS – позволяет использовать новый язык моделирования SysML и формат данных о промышленных изделиях и процессах, используемые для представления и обмена информацией на этапах жизненного цикла изделий. Это, в свою очередь, положительно влияет на развитие методического обеспечения CALS. Также способ (его алгоритмы) является научной основой, которую важно учитывать при построении новых или при обновлении функционала существующих интегрированных средств взаимодействия проектировщик – система (единого информационного пространства) для: анализа и синтеза проектных решений; управления проектными работами; автоматизации документирования, безбумажного документооборота на этапах жизненного цикла изделий. А это в свою очередь означает, что полученный результат создает основы для разработки и развития информационного и программного обеспечения CALS. Верификация и валидация способа, включая генерируемых им преимуществ, рассматриваются далее, в главе 5

Глава 4

Разработка методического инструментария для реализации конкретизированной модели «Структурирование функции качества»

В главе 4 рассматриваются разработка методического инструментария для реализации конкретизированной модели «Структурирование функции качества». В разделе 4.1 рассматривается конкретизация классической модели «СФК». В разделе 4.2 проводится синтез классических практик и инструментов системного инжиниринга с модернизированными (новыми) инструментами МОСИ (результаты глав 2 и 3) в унифицированный алгоритм генерирования входных и выходных данных для этапов конкретизированной модели «СФК». В разделах 4.3–4.7 осуществляется конкретизация и формализация унифицированного алгоритма под категории требований этапов предложенной новой модели «уСФК». В разделе 4.8 характеризуются разработанные электронные шаблоны модели «уДК».

4.1 Конкретизация классической каскадной модели «СФК»

В разделе 4.1 рассматривается конкретизация классической модели «СФК».

Классическая каскадная модель «СФК» (концептуально представлена на рисунке 4.1) ограничивается четырьмя моделями «ДК» и не подразумевает проектирование технических объектов (систем) в соответствии с потребностями пользователей, подходом SysML, требованиями нормативно-технической документации.

Подход (методика) SysML, в соответствии с таксономией SysML-моделей (см. рисунок 3.2), подразумевает проведение особого анализа требований заказчика с выделением сценариев использования изделия разными пользователями, что означает, в том числе, идентификацию спектра пользователей и их потребностей. Также таксономия SysML-моделей указывает на проведение углубленного функционального анализа системы, что подразумевает определение функциональных требований. Этот тип требований отсутствует в модели «СФК».

Процесс проектирования техники, как правило, характеризуется разработкой соответствующей отчетной документации, а не производством и сборкой изделия (за исключением случаев выполнения макетирования). Требования к отчетной документации, как правило, содержатся в специализированных нормативно-технических документах (стандартах). Этот тип требований также отсутствует в модели «СФК».

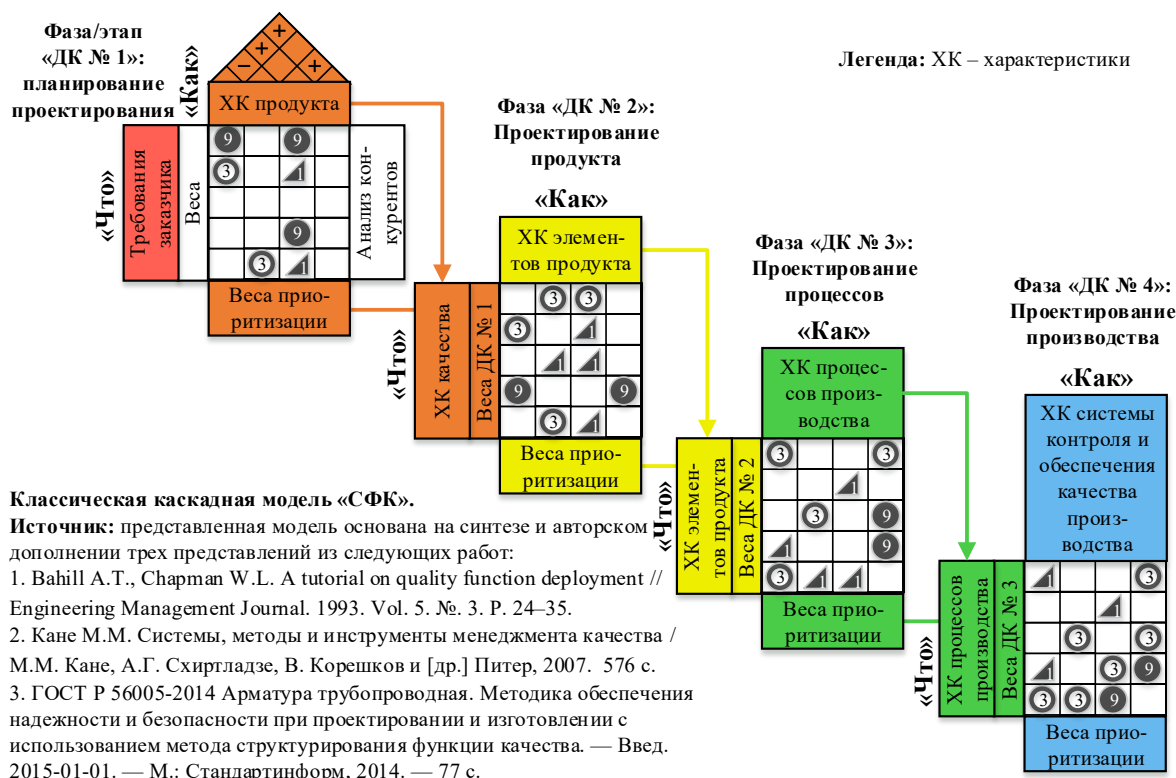


Рисунок 4.1 – Абстрактное представление классической каскадной модели «СФК»

Для реализации ЖЦ проектирования ТО в парадигме модельно-ориентированного системного инжиниринга как единый проект, в соответствии с потребностями пользователей, языком SysML и требованиям нормативно-технической документации, классическая модель «СФК» была конкретизирована в части количества и назначения ее этапов:

1. Добавлен новый этап в виде дополнительной модели «удК № 0» для идентификации потребностей пользователей и определения на их основе требований заказчика.
2. Конкретизировано назначение этапа № 1 для формулировки требований к функциям технического объекта в соответствии с подходом SysML.
3. Конкретизировано назначение этапа № 2 для формулировки требований к аппаратной/программной частям технического объекта в соответствии с подходом SysML.
4. Конкретизировано назначение этапа № 3 для формулировки требований НТД к плану реализации этапов жизненного цикла проектирования технического объекта.

5. Конкретизировано назначение этапа № 4 для формулировки требований НТД к документации на этап жизненного цикла проектирования технического объекта.

6. Концептуально отображена взаимосвязь и рекомендация использовать совместно с моделями «Дом качества» SysML-диаграммы.

В результате разработана конкретизированная модель «СФК», состоящая из 5 этапов:

1) **«уДК № 0»:** подготовка к проектированию изделия (*идентификация потребностей пользователей (ГП) – формулировка требований заказчика (ГЗ)*);

2) **«уДК № 1»:** проектирование поведения (функционала) изделия (*перенос или формулировка требований заказчика – определение функций изделия (ГИ № 1)*);

3) **«уДК № 2»:** проектирование архитектур аппаратной/программной частей изделия (*перенос или определение ГИ № 1 – определение требований к АЧ/ПЧ (ГИ № 2)*);

4) **«уДК № 3»:** проектирование порядка реализации жизненного цикла изделия или этапа ЖЦИ (*перенос или определение требований к АЧ/ПЧ – определение требований НТД к порядку реализации жизненного цикла изделия или этапа ЖЦИ (ГИ № 3)*);

5) **«уДК № 4»:** проектирование системы контроля качества реализации ЖЦИ или этапа ЖЦИ (*перенос или определение ГИ № 3 – определение требований НТД к отчетной документации ЖЦИ или этапа ЖЦИ (ГИ № 4)*).

Конкретизированная модель «СФК» (далее в тексте модель «усовершенствованное СФК» («уСФК»)) представлена в таблице 4.1 и в Приложении А.

Таблица 4.1 – Сравнение входных и выходных данных этапов моделей «СФК»

ДК	Классическая модель «СФК»		Конкретизированная модель «СФК» («уСФК»)	
	Вход	Выход	Вход	Выход
№ 0	–	–	Потребности пользователей	Требования заказчика
№ 1	Требования заказчика	Технические требования	Требования заказчика	Требования инженеров к функционалу изделия
№ 2	Технические требования	Детальное проектирование	Требования инженеров к функционалу изделия	Требования инженеров к архитектурам АЧ/ПЧ изделия
№ 3	Детальное проектирование	Процессы производства	Требования инженеров к архитектурам АЧ/ПЧ изделия	Требования НТД к порядку реализации ЖЦИ (этапа ЖЦИ)
№ 4	Процессы производства	Контроль качества	Требования НТД к порядку реализации ЖЦИ (этапа ЖЦИ)	Требования НТД к отчетной документации ЖЦИ (этапа ЖЦИ)

Физический смысл модели «уСФК» был выражен в математических терминах:

$$iQFD = iQFD(\overrightarrow{UN_p}; \overrightarrow{iHoQCR_m}; \overrightarrow{iHoQFR_n}; \overrightarrow{iHoQDR_k}; \overrightarrow{iHoQLP_l}; \overrightarrow{iHoQLC_t}),$$

где $iQFD$ – это функция, которая зависит от количественного ранжирования потребностей пользователей ($\overrightarrow{UN_p}$), количественной приоритизации выходных параметров по новому алгоритму «уДК»: требований заказчика ($\overrightarrow{iHoQCR_m}$), инженерных требований к функциям ($\overrightarrow{iHoQFR_n}$) и аппаратной и/или программной частям изделия ($\overrightarrow{iHoQDR_k}$), требований нормативно-технической документации (НТД) к порядку реализации ЖЦИ (этапа) ($\overrightarrow{iHoQLPR_l}$), требований нормативно-технической документации к документации разрабатываемой на заданном этапе жизненного цикла изделия ($\overrightarrow{iHoQLR_t}$).

4.2 Разработка унифицированного алгоритма генерирования входных и выходных данных этапов конкретизированной модели «СФК»

В разделе 4.2 рассматривается унифицированный алгоритм генерирования входных и выходных данных этапов конкретизированной модели «СФК».

Был проведен анализ литературы [144] для подбора практик и инструментов системного инжиниринга, методов и языков модельно-ориентированного системного инжиниринга, позволяющих: 1) идентифицировать потребности пользователей; 2) определить требования заказчика; 3) сформулировать инженерные требования.

С учетом данных анализа и полученных в главах 2 и 3 результатов был разработан унифицированный алгоритм генерирования входных и выходных данных этапов модели «СФК». Алгоритм был назван «усовершенствованное СФК для уДК» («уСФК для уДК»). Алгоритм условно поделен на пять элементов (концептуально представлен на рисунке 4.2):

«Вход» – исходные данные (ими могут быть – в зависимости от выполняемого аспекта проектирования – параметры: ГП, ГЗ, ГИ).

«Выход» – структурированные и приоритизированные (определены критически важные) с помощью инструментов МОСИ параметры ГЗ или ГИ № 1–4.

«Управляющее воздействие» – коррекция параметров в случае обратной связи по итогам верификации и валидации (анализа, инспекции, тестирования, демонстрации).

«ПС для цифровой обработки требований» – MS Visio, Excel, Word; Jira и прочие.

«Генерация данных» (ключевой элемент) – подразумевает определение как «области проблем», так и «области решений». Для унификации и обеспечения точности идентификации потребностей пользователей («область проблем») и их перевод в требования заказчика («область

решений)), или перевод требований заказчика в инженерные требования, рекомендовано использовать практики и инструменты СИ и МОСИ, поделенные на три группы:

- **Получение данных:** описание проекта, знакомство с заказчиком, контекстная диаграмма, интервью, опросы, мозговой штурм.
- **Качественный анализ:** вербальный анализ системных требований (ВАСТ), схемы деления работ и продукта, группирующие диаграммы, SysML-модели (требований, поведения и структур (см. раздел 3.1)), SWOT-анализ [145], диаграмма «N2», модель Кано (эмоциональное ранжирование).
- **Количественный анализ:** МАИ (ранжирование) и «ДК» (приоритизация).



Рисунок 4.2 – Унифицированный алгоритм генерирования входных и выходных данных этапов конкретизированной модели «СФК» (модели «уСФК»)

4.2.1 Логика реализации концепции унифицированного алгоритма «уСФК для уДК»

В подразделе 4.2.1 рассматривается логика реализации алгоритма «уСФК для уДК».

Область проблем: «Что» нужно?

На «Входе» этапа жизненного цикла проекта (технического объекта) происходит идентификация и анализ исходных данных. Первая задача в разработке этого направления заключается в определении контекста проекта [146]. Для этого, к примеру, рекомендуется проводить знакомство с заказчиком (этнографию), чтобы выявить его пожелания, идеи, требования, группы заинтересованных сторон, целевую аудиторию (ЦА) пользователей и

сценарии того, как они, к примеру, будут пользоваться новым изделием. Определив контекст, констатируются предварительная верхнеуровневая цель и ограничения проекта. Далее проводится аналогичная работа с потенциальными пользователями и заинтересованными сторонами проекта. Собирается информация о проблемах, пожеланиях и идеях по их удовлетворению. Для этого используются такие подходы как мозговой штурм, анкетирование, опросы. Часто респонденты высказывают одно и то же, но разными словами, поэтому рекомендуется использовать инструмент «вербальный анализ системных требований» [54], для углубленного анализа причин пожеланий, потребностей, требований, проблем. ВАСТ позволяет эффективно отсортировать собранную информацию по категориям «Что» и «Как».

После этого первопричины (к примеру потребностей пользователей) моделируются по способу автоматизации разработки SysML-диаграмм требований, могут моделироваться выявленные функции, затем итоговые параметры группируются в иерархическую структуру.

Далее проводится качественное (модель Кано) и количественное (метод анализа иерархий) ранжирование полученных исходных данных (параметров) [54].

Область решений: «Как» удовлетворить?

Для определения требований заказчика (параметров ГЗ), способных удовлетворить параметры ГП, используются данные, полученные после применения ВАСТ. В зависимости от этапа ЖЦ (проработки проекта) могут применяться дополнительные инструменты СИ (к примеру, бенчмаркинг, SWOT-анализ) для выявления всей информации о технических решениях, обоснованности и экономической целесообразности их выбора. Итоговая информация группируется с помощью SysML-диаграмм и ранжируется по модели Кано и МАИ.

Заключительным этапом структурирования и приоритизации (идентификации критически важных) требований заказчика (выходных параметров) является построение модели «удК». В левой и верхней части модели «удК» структурируют полученную информацию о том «Что» (параметры ГП) и «Как» (параметры ГЗ) нужно сделать (включая информацию о ранжировании параметров). Далее, по алгоритму «удК», сначала производится анализ того, как удовлетворение каждого параметра «Что» зависит от реализации параметров «Как», а затем с учетом количественных оценок корреляций выходных параметров (в данном примере это ГИ; высчитываются с помощью метода анализа иерархий), происходит финальный подсчет их весов приоритизация. В конце SysML-диаграммы обновляются автоматизировано.

В ходе реализации проекта или по итогам ВиВ полученных результатов, входные и выходные данные (параметры) могут быть изменены. В этом случае осуществляется управляющее воздействие (на рисунке 4.2 это верхняя стрелка).

Для цифровой обработки требований возможно использовать такое доступное ПО, такое, как MS Excel, Project, Jira и др. (на рисунке 4.2 это нижняя стрелка).

Приоритизированные в модели «уДК» параметры «Как», с точки зрения их способности удовлетворить то «Что» требуется, и структурированные SysML-диаграммы требований, обеспечивают однозначное понимание того «Что» нужно и «Как» это достичь – это требуемый базовый результат на «Выходе» унифицированного алгоритма «уСФК для уДК».

4.2.2 Конкретизация унифицированного алгоритма «уСФК для уДК»

Все последующие алгоритмы «уСФК для уДК № n » генерирования входных и выходных данных этапов конкретизированной модели «СФК» – основаны на конкретизации унифицированного алгоритма, где n меняется в зависимости от номера этапа конкретизированной модели «СФК». Описание каждого алгоритма состоит из трех частей: 1) формулировка физического смысла и формализация ключевых процессов алгоритма с помощью математических терминов и формул; 2) обобщенная структура модели «уДК»; 3) рамочная (обобщенная) концепция алгоритма и порядок действий по ее реализации.

4.3 Разработка алгоритма «уСФК для уДК № 0»: потребности пользователей – требования заказчика

4.3.1 Определение физического смысла и формализация алгоритма

Физический смысл алгоритма «уСФК для уДК № 0» заключается в том, чтобы идентифицировать и проранжировать потребности пользователей, с их учетом сформулировать требования заказчика, проранжировать их с помощью математического аппарата метода анализа иерархий и приоритизировать их в соответствии с алгоритмом «уДК» (с выделением критически важных параметров). Выражается формулами (4.1) и (4.2):

$$\{\overline{UN}_p^*\}[CRA_{pm}] = \overline{HoQCR}_m, \quad (4.1)$$

$$\left\| \frac{(CR_j^* \cdot HoQCR_j)}{\sum_j CR_j^* \cdot HoQCR_j} \right\| = \|\overline{HoQCR}_m^*\| = 1, \quad j = \overline{1, m}, \quad (4.2)$$

где UN – потребности пользователей (от англ. User Needs; параметры ГП);

$\{\overline{UN}_p^*\}$ – вектор размерности p , состоящий из весов важности параметров ГП, подсчитанных с помощью математического аппарата МАИ и нормализованных;

CR – требования заказчика (от англ. Customer Requirements; параметры ГЗ);

$[CRA_{pm}]$ – центральная матрица модели «удК № 0» размерностью pm с результатами анализа (оценки) зависимости удовлетворения каждого параметра ГП от достижения каждого ГЗ;

$\overrightarrow{HoQCR_m}$ – m -вектор ненормализованных весов приоритизации параметров ГЗ (выходных параметров), подсчитанных по классическому алгоритму «ДК»;

j – номер столбца центральной части любой модели «удК»;

CR_j^* – вес j -го параметра ГЗ, сначала подсчитанный с помощью математического аппарата МАИ, а затем нормализованный;

$\overrightarrow{CR_m^*}$ – вектор размерности m , который представляет собой нормализованные веса важности параметров ГЗ, подсчитанные с помощью математического аппарата МАИ;

$\overrightarrow{iHoQCR_m^*}$ – m -вектор нормализованных весов параметров ГЗ, подсчитанных в соответствии с алгоритмом «удК».

Примечание – СЧ формул, помеченные * означают, что значения были нормализованы.

4.3.2 Разработка абстрактной структуры модели «удК № 0»

В подразделе 4.3.2 на рисунке 4.3 представлена рекомендованная структура модели «усовершенствованный ДК № 0». Структурные элементы модели «удК № 0» пронумерованы в соответствии с нумерацией действий, указанных в подразделе 4.3.3 начиная с пункта 3.

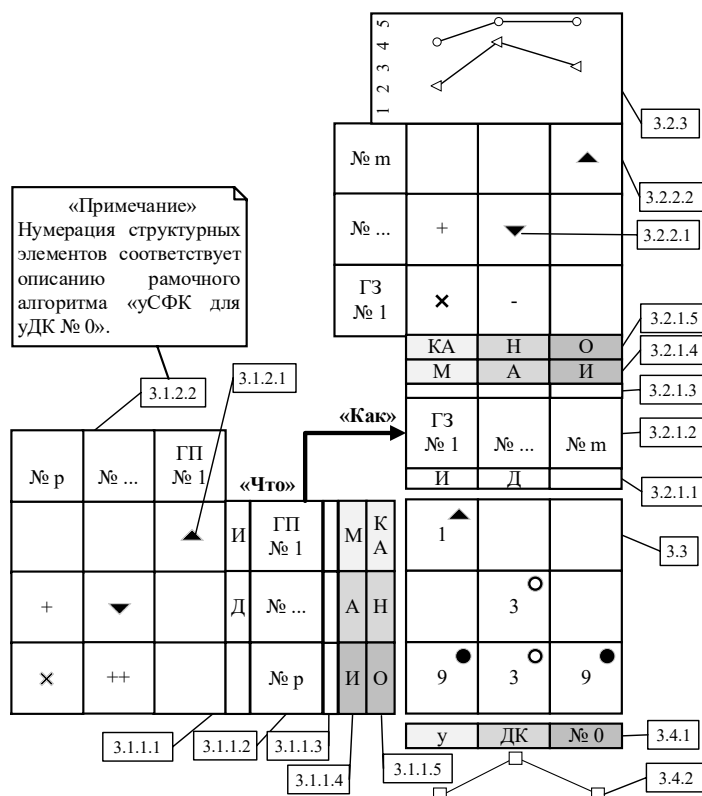


Рисунок 4.3 – Обобщенная структура модели «удК № 0»

4.3.3 Описание рамочного алгоритма «уСФК для уДК № 0»

В подразделе 4.3.3 представляются рамочная (обобщенная) концепция алгоритма «уСФК для уДК № 0» (см. рисунок 4.4) и порядок действий по ее реализации.

Для реализации этого и последующих аналогичных алгоритмов (см. подразделы 4.4.1, 4.5.1, 4.6.1, 4.7.1) рекомендуется выполнить порядок действий, указанных после изображений рамочных алгоритмов. Ограничений на использование дополнительных инструментов и подходов не предъявляется.

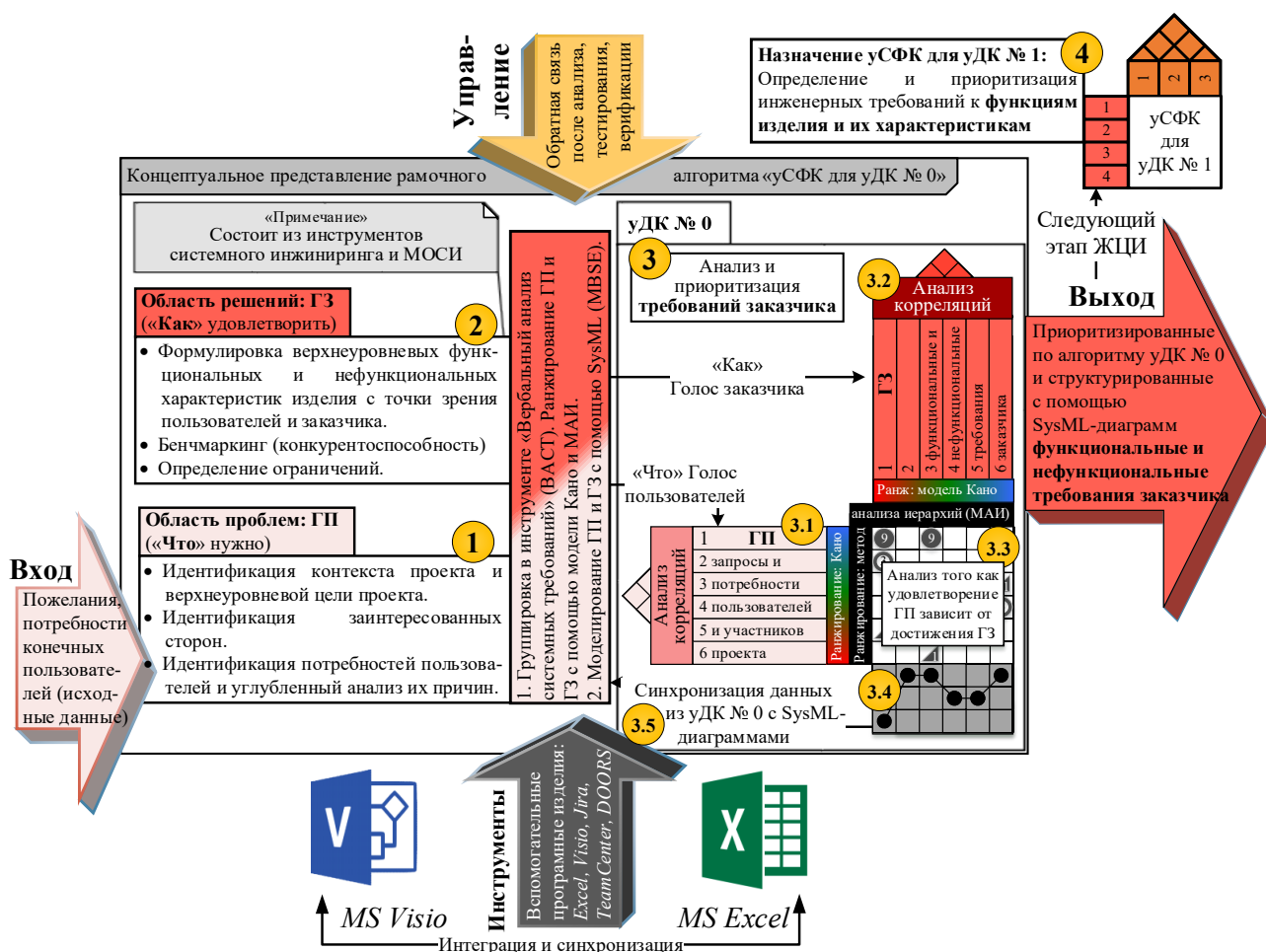


Рисунок 4.4 – Рамочный (обобщенный) алгоритм «уСФК для уДК № 0»: потребности конечных пользователей – требования заказчика

1. Идентифицировать «область проблем»: параметры ГП («Что» – потребности).
 - 1.1. Сформулировать контекст проекта [146].
 - 1.2. Описать верхнеуровневую цель/замысел заказчика.
 - 1.3. Идентифицировать заинтересованных сторон и целевые аудитории.
 - 1.4. Определить потребности и пожелания заинтересованных сторон и целевой аудитории.

- 1.4.1. Провести опросы, анкетирование, интервью, мозговые штурмы для выявления потребностей и пожеланий пользователей.
- 1.4.2. Провести анализ первопричин потребностей и пожеланий пользователей с помощью инструмента «вербальный анализ системных требований» (ВАСТ).
- 1.4.3. Сгруппировать выявленные первопричины параметров ГП с помощью SysML-диаграмм требований используя способ их автоматизации разработки.
- 1.4.4. Промоделировать параметры ГП с помощью SysML-диаграмм поведения.
- 1.5. Проранжировать потребности и пожелания пользователей:
 - 1.5.1. С помощью модели Кано (качественно) (см. Приложение Б).
 - 1.5.2. С помощью математического аппарата МАИ [54] (количественно).
 - 1.5.3. Полученные результаты заполнить в базе данных.
2. Сформулировать «область решений»: параметры ГЗ («КАКими» функциональными и нефункциональными параметрами изделия и их характеристиками (показателями качества), с точки зрения заказчика, можно удовлетворить параметры ГП).
 - 2.1. Сформулировать требования заказчика (параметры ГЗ) (выходные параметры этапа).
 - 2.1.1. Провести мозговой штурм (опросы) для выявления идей.
 - 2.1.2. Проанализировать причины параметров ГЗ с помощью инструмента «ВАСТ».
 - 2.1.3. Сгруппировать результаты с помощью диаграмм (в том числе SysML).
 - 2.2. Провести бенчмаркинг параметров ГЗ по отношению к параметрам существующих конкурентоспособных продуктов. Оценку можно провести по шкале от 1 до 5.
 - 2.3. Определить ограничения заказчика.
 - 2.4. Проранжировать требования заказчика (параметры ГЗ) с помощью модели Кано и с помощью математического аппарата метода анализа иерархий (нормализовать веса).
 - 2.5. Полученные результаты заполнить в базе данных.
 - 2.6. Автоматизировано промоделировать параметры ГЗ с помощью SysML-диаграмм.
3. Структурировать данные в модели «удК № 0», приоритизировать выходные параметры.
 - 3.1. Структурировать в модели «удК № 0» входные данные (потребности пользователей).
 - 3.1.1. Перенести в «Левую часть» модели «удК № 0» ранее определенные данные:
 - 3.1.1.1. Идентификаторы параметров ГП (см. главу 3 подраздел 3.2.1).
 - 3.1.1.2. Текстовые формулировки параметров ГП.
 - 3.1.1.3. Характеристики параметров ГП (показатели качества).
 - 3.1.1.4. Результаты ранжирования по модели Кано.
 - 3.1.1.5. Результаты ранжирования по МАИ.
 - 3.1.2. Заполнить матрицу «Крыльцо» модели «удК № 0»:
 - 3.1.2.1. Указать направления улучшений показателей параметров ГП.

- 3.1.2.2. Проанализировать корреляции параметров ГП (матрицы «Крыльцо» и «Крыша» строятся в моделях «уДК» размерностью $N \times N$).
- 3.2. Структурировать в модели «уДК № 0» выходные данные (требования заказчика).
 - 3.2.1. Перенести в «Верхнюю часть» модели «уДК № 0» ранее определенные данные:
 - 3.2.1.1. Идентификатор параметров ГЗ (см. главу 3 подраздел 3.2.1).
 - 3.2.1.2. Текстовые формулировки параметров ГЗ.
 - 3.2.1.3. Характеристики параметров ГЗ (показатели качества).
 - 3.2.1.4. Результаты ранжирования параметров ГЗ по МАИ.
 - 3.2.1.5. Результаты ранжирования параметров ГЗ по модели Кано.
 - 3.2.2. Заполнить матрицу «Крыша» модели «уДК № 0»:
 - 3.2.2.1. Указать направления улучшений показателей параметров ГЗ.
 - 3.2.2.2. Проанализировать и отметить корреляции параметров ГЗ.
 - 3.2.3. Указать результаты бенчмаркинга (пункт 2.2. настоящего подраздела) по шкале от 1 до 5 с помощью искусственных нейронных сетей.
- 3.3. Проанализировать и отразить в «Центральной части» модели «уДК № 0» зависимость удовлетворения параметров ГП от реализации ГЗ (см. таблицу 2.1).
- 3.4. Заполнить «Нижнюю часть» модели «уДК № 0».
 - 3.4.1. Провести приоритизацию параметров ГЗ (см. формулы (4.1) и (4.2)).
 - 3.4.2. Визуализировать веса приоритизации на графике (построить два графика, первый – веса алгоритма «ДК», второй – веса алгоритма «уДК»).
- 3.5. Автоматизировано обновить SysML-диаграммы параметров ГП и ГЗ (см. подраздел 3.2.4) и вставить их в MS Excel справа от модели «уДК № 0».
4. Перенести данные связанные с параметрами ГЗ (пункты 3.2.1.1–1.2, 3.2.1.5, 3.2.2.1–2.2, 3.2.3, 3.4.1) в «Левую часть» следующей модели «уДК № 1».

Модели «уДК» должны быть взаимосвязаны таким образом, чтобы изменения в первоисточнике (предшествующей модели) автоматически изменялись и отображались в последующей модели «уДК».

Согласно модели «уСФК», выходные параметры этапа «уДК № 0» являются входными для этапа «уДК № 1». Соответственно порядок определения выходных параметров этапа «уДК № 0» будет одинаковым, что и порядок определения входных параметров этапа «уДК № 1». Это относится ко всем последующим этапам модели «уСФК» и алгоритмам. С учетом этого, в дальнейших описаниях алгоритмов рекомендованных действий по определению входных параметров этапов «уДК № 1–4» будет указано, что необходимо выполнить соответствующие действия этапа, предшествующего рассматриваемому.

4.4 Разработка алгоритма «уСФК для уДК № 1»: требования заказчика – требования к функционалу изделия

4.4.1 Определение физического смысла и формализация алгоритма

Физический смысл алгоритма «уСФК для уДК № 1» заключается в том, чтобы сформулировать требования заказчика (если они не были сформулированы на этапе «уДК № 0»), с их учетом определить инженерные требования к функционалу изделия (параметры ГИ № 1), проранжировать их с помощью математического аппарата метода анализа иерархий и приоритизировать их в соответствии с алгоритмом «уДК» (с выделением среди последних критически важных параметров). Выражается формулами (4.3) и (4.4):

$$\{\overrightarrow{iHoQCR_m^*}\}[FRA_{mn}] = \overrightarrow{HoQFR_n}, \quad (4.3)$$

$$\left\| \frac{\overrightarrow{(FSR_a^* \cdot FR_{j_a}^* \cdot HoQFR_{j_a})}}{\sum_{a=1}^f \sum_{j_a} FSR_a^* \cdot FR_{j_a}^* \cdot HoQFR_{j_a}} \right\| = \|\overrightarrow{iHoQFR_n^*}\| = 1, j_a = \overline{1, n_a} \quad (4.4)$$

где FR – функциональные требования к изделию (от англ. Functional Requirements) или голос инженера (в моделях «уДК № 1» и «уДК № 2» – это ГИ № 1);

$[FRA_{mn}]$ – центральная матрица «уДК № 1» размерностью mn с числовыми оценками зависимости удовлетворения каждого параметра ГЗ от достижения каждого параметра ГИ № 1;

$\overrightarrow{HoQFR_n}$ – n -вектор ненормализованных весов приоритизации параметров ГИ № 1 (выходных параметров), подсчитанных по классическому алгоритму «ДК»;

j_a – номер столбца центральной части любой модели «уДК» из категории a ;

n_a – количество столбцов категории (подсистемы) a , в сумме дают n ;

f – количество категорий (подсистем) функций изделия;

FSR_a^* – нормализованный вес важности a -й категории (подсистемы) параметров ГИ № 1 (от англ. Functional Subsystem Requirements), подсчитанный с помощью математического аппарата МАИ;

$\overrightarrow{FSR_f^*}$ – вектор размерности f , который представляет собой нормализованные веса важности категорий параметров ГИ № 1;

$FR_{j_a}^*$ – вес важности j_a -го параметра ГИ № 1, подсчитанный с помощью математического аппарата МАИ и нормализованный в рамках своей a -й категорий (подсистемы);

$\overrightarrow{FR_{n_a}^*}$ – вектор размерности n_a , состоит из нормализованных весов важности всех параметров ГИ № 1;

$\overrightarrow{iHoQFR_n^*}$ – n -вектор нормализованных весов приоритизации параметров ГИ № 1, подсчитанных в соответствии с алгоритмом «уДК».

4.4.2 Разработка абстрактной структуры модели «удК № 1»

В подразделе 4.4.2 на рисунке 4.5 представлена рекомендованная структура модели «удК № 1».

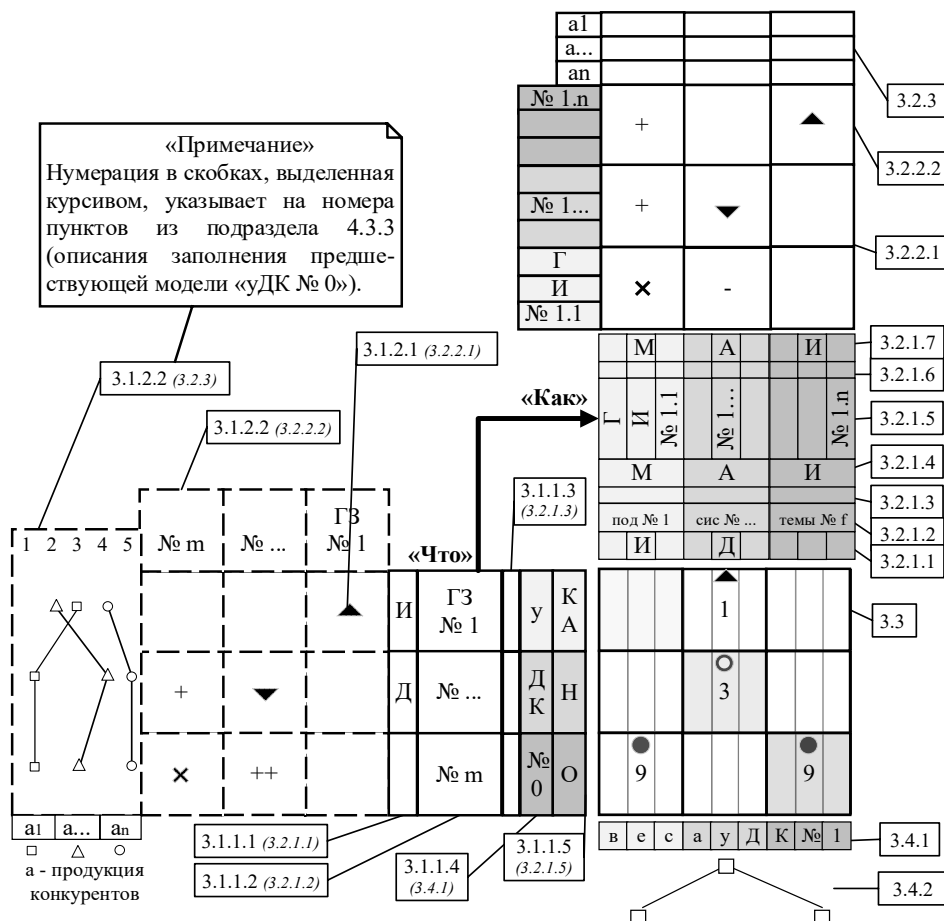


Рисунок 4.5 – Обобщенная структура модели «удК № 1»

Структурные элементы модели «удК № 1» пронумерованы в соответствии с нумерацией действий, указанных в подразделе 4.4.3 начиная с пункта 3. Нумерация структурных элементов «Левой части» модели «удК № 1» основана на описании действий алгоритма «уСФК для удК № 0» (см. на рисунке 4.5 шрифт, выделенный курсивом). Выделение элементов «Левой части» пунктиром означает, что если выполнялась модель «удК № 0», то эти элементы необязательно структурировать в рамках «удК № 1» (аналогично помечены элементы «Левой части» и в следующих моделях «удК № 2, 3»). Важно обратить внимание на то, что из модели «удК № 0» были перенесены только нормализованные веса приоритизации параметров ГИ № 1, полученные по алгоритму «удК № 0». Веса подсистем и параметров, полученных по МАИ не переносились, так как они учтены в весах приоритизации по алгоритму «удК» (аналогичное относится к моделям «удК № 2–4»).

4.4.3 Описание рамочного алгоритма «уСФК для уДК № 1»

В подразделе 4.4.3 представляются рамочная (обобщенная) концепция алгоритма (см. рисунок 4.6) и порядок действий по ее реализации.

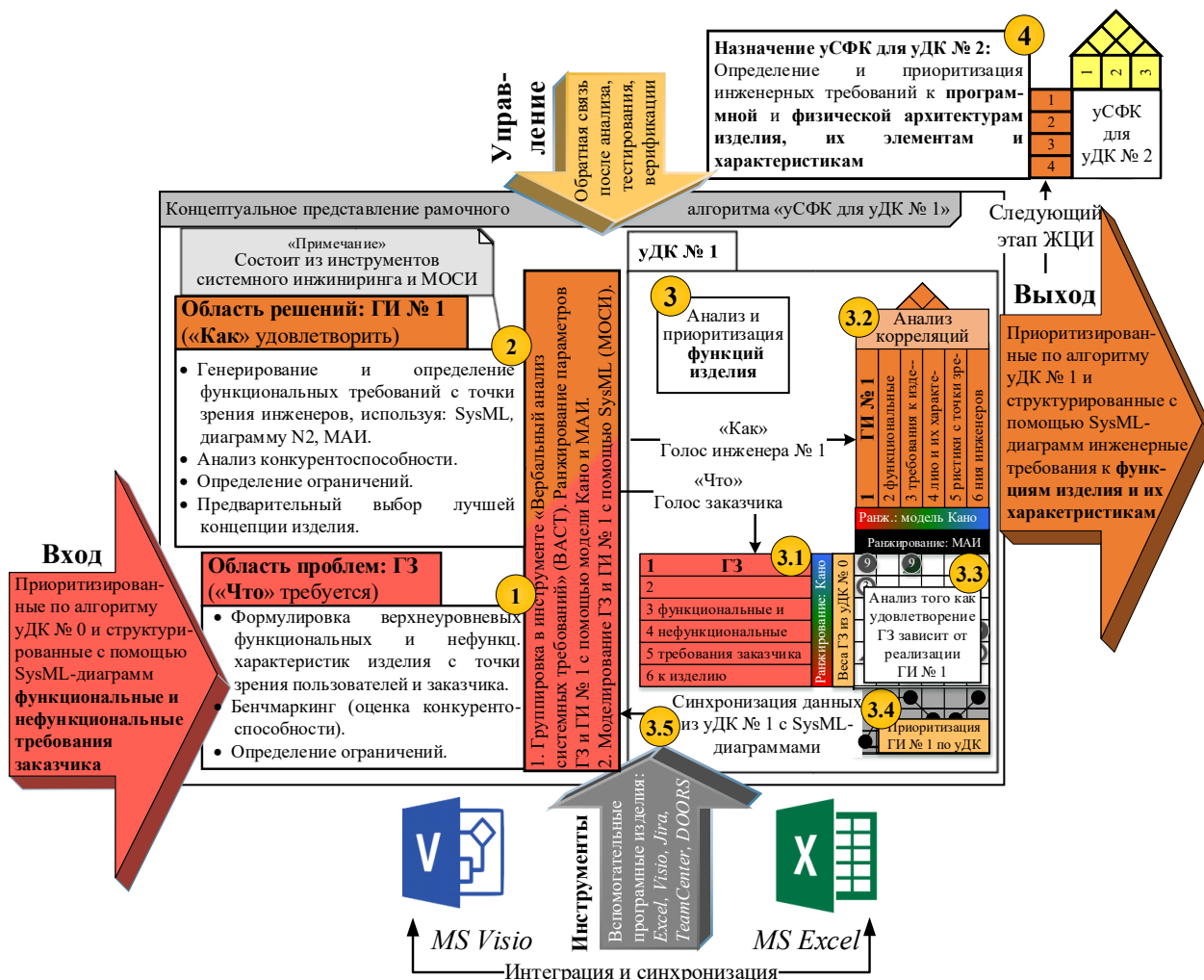


Рисунок 4.6 – Рамочный (обобщенный) алгоритм «уСФК для уДК № 1»: требования заказчика – инженерные требования к функционалу изделия

1. Сформулировать «область проблем»: параметры ГЗ («Что» – функциональные и нефункциональные параметры изделия с точки зрения заказчика, удовлетворяющие потребности).
 - 1.1. Если этап уДК № 0 не выполнялся, то выполнить пункты 2, 3, 4 из подраздела 4.3.3.
2. Сформулировать «область решений»: параметры ГИ № 1 («КАКими» функциями должно обладать изделие, с точки зрения инженера, чтобы они удовлетворили параметры ГЗ).
 - 2.1. Сформулировать функциональные требования к изделию – выходные параметры.
 - 2.1.1. Сгенерировать идеи ГИ № 1 (к примеру, с помощью: инструмента «мозговой штурм»; анализа, используя бенчмаркинг; морфологической матрицы альтернатив (ММА; также известна как метод морфологического ящика [147])).

- 2.1.2. Сгруппировать параметры ГИ № 1 по категориям (подсистемам).
- 2.1.3. Определить итоговый перечень параметров ГИ № 1 и их характеристики.
- 2.2. Промоделировать функции (параметры ГИ № 1) с указанием того, что на входе, а что на выходе каждой функции с помощью инструмента «диаграмма N2» [23].
- 2.3. Промоделировать параметры ГИ № 1 с помощью SysML-диаграмм требований и поведения (автоматизировано, используя способ, предложенный в главе 3)).
- 2.4. Проранжировать с помощью математического аппарата МАИ подсистемы ГИ № 1 и их параметры (по отдельности в рамках каждой подсистемы). Веса нормализовать.
- 2.5. Полученные результаты заполнить в базе данных.
- 2.6. Автоматизировано обновить SysML-диаграммы требований (см. способ в главе 3).
3. Структурировать данные в модели «удК № 1», приоритизировать выходные параметры.
 - 3.1. Структурировать в «Левой части» модели «удК № 1» входные данные (требования заказчика). Если удК № 0 не выполнялся, веса важности параметров ГЗ определяются с помощью математического аппарата МАИ (см. в главе 2 подраздел 2.1.3).
 - 3.2. Структурировать в модели «удК № 1» выходные данные (параметры ГИ № 1).
 - 3.2.1. Перенести в «Верхнюю часть» модели «удК № 1» ранее определенные данные:
 - 3.2.1.1. Идентификаторы параметров ГИ № 1.
 - 3.2.1.2. Подсистемы (категории) параметров ГИ № 1.
 - 3.2.1.3. Рамочные характеристики подсистем (категорий).
 - 3.2.1.4. Результаты ранжирования подсистем по МАИ.
 - 3.2.1.5. Параметры ГИ № 1 по каждой подсистеме.
 - 3.2.1.6. Характеристики параметров ГИ № 1.
 - 3.2.1.7. Результаты ранжирования параметров ГИ № 1 по МАИ.
 - 3.2.2. Заполнить матрицу «Крыша» модели «удК № 1» по аналогии с «удК № 0».
 - 3.2.3. Указать результаты бенчмаркинга и/или морфологического анализа возможных альтернатив параметров. В случае необходимости обновить параметры ГИ № 1.
 - 3.3. Проанализировать и отразить в «Центральной части» модели «удК № 1» зависимость удовлетворения параметров ГЗ от реализации параметров ГИ № 1.
 - 3.4. Заполнить «Нижнюю часть» модели «удК № 1».
 - 3.4.1. Получить веса приоритизации параметров ГИ № 1 (см. формулы (4.3) и (4.4)).
 - 3.4.2. Визуализировать нормализованные веса приоритизации с помощью диаграммы.
 - 3.5. Автоматизировано обновить SysML-диаграммы параметров ГИ № 1 (см. в главе 3 подраздел 3.2.4), скопировать и вставить их в MS Excel справа от модели «удК № 1».
4. Перенести данные связанные с параметрами ГИ № 1 (пункты 3.2.1.1, 3.2.1.2, 3.2.1.5, 3.2.1.6, 3.2.2.1, 3.2.2.2, 3.2.3, 3.4.1) в «Левую часть» следующей модели «удК № 2».

4.5 Разработка алгоритма «уСФК для уДК № 2»: требования к функционалу изделия – требования к АЧ/ПЧ изделия

4.5.1 Определение физического смысла и формализация алгоритма

Физический смысл алгоритма «уСФК для уДК № 2» заключается в том, чтобы определить требования к функционалу изделия (параметры ГИ № 1; если они не были определены на предыдущем этапе «уДК № 1»), с их учетом сформулировать требования к архитектуре аппаратной/программной частей (параметры ГИ № 2), проранжировать их с помощью математического аппарата МАИ и приоритизировать их в соответствии с алгоритмом «уДК» (с идентификацией критически важных параметров, см. формулы (4.5) и (4.6)):

$$\{\overrightarrow{iHoQFR_n^*}\}[DRA_{nk}] = \overrightarrow{HoQDR_k}, \quad (4.5)$$

$$\left\| \frac{\overrightarrow{(DSR_a^* \cdot DR_{j_a}^* \cdot HoQDR_{j_a})}}{\sum_{a=1}^g \sum_{j_a} DSR_a^* \cdot DR_{j_a}^* \cdot HoQDR_{j_a}} \right\| = \|\overrightarrow{iHoQDR_k^*}\| = 1, j_a = \overline{1, k_a} \quad (4.6)$$

где DR – требования к аппаратно-программной части изделия (от англ. Design Requirements) или ГИ № 2 (в «уДК № 2 и № 3»);

$[DRA_{nk}]$ – центральная матрица «уДК № 2» размерностью nk с числовыми оценками зависимости удовлетворения каждого параметра ГИ № 1 (функций) от достижения каждого ГИ № 2;

$\overrightarrow{HoQDR_k}$ – k -вектор ненормализованных весов приоритизации параметров ГИ № 2 (выходных параметров), подсчитанных по классическому алгоритму «ДК»;

j_a – номер столбца центральной части любой модели «уДК» из категории a ;

k_a – количество столбцов категории (подсистемы) a , в сумме дают k ;

g – количество категорий (подсистем);

DSR_a^* – нормализованный вес важности a -й категории параметров ГИ № 2 (от англ. Design Subsystem Requirements), подсчитанный с помощью математического аппарата МАИ;

$\overrightarrow{DSR_f^*}$ – вектор размерности f , который представляет собой нормализованные веса важности категорий параметров ГИ № 2;

$DR_{j_a}^*$ – вес важности j_a -го параметра ГИ № 2, подсчитанный сначала с помощью математического аппарата МАИ, а затем нормализованный в рамках своей a -й категории;

$\overrightarrow{DR_{k_a}^*}$ – вектор размерности k_a , состоит из нормализованных весов важности всех параметров ГИ № 1;

$\overrightarrow{iHoQDR_k^*}$ – k -вектор нормализованных весов приоритизации параметров ГИ № 2, подсчитанных в соответствии с алгоритмом «уДК».

4.5.2 Разработка абстрактной структуры модели «уДК № 2»

В подразделе 4.5.2 на рисунке 4.7 представлена обобщенная структура модели «уДК № 2». Структурные элементы модели «уДК № 2» пронумерованы в соответствии с нумерацией действий, указанных далее в подразделе 4.5.3 начиная с пункта 3. Нумерация структурных элементов «Левой части» модели «уДК № 2» основана на описании действий алгоритма «уСФК для уДК № 1» в части пунктов 3.2 и 3.4.1 (подробнее см. на рисунке 4.7 шрифт, выделенный курсивом).

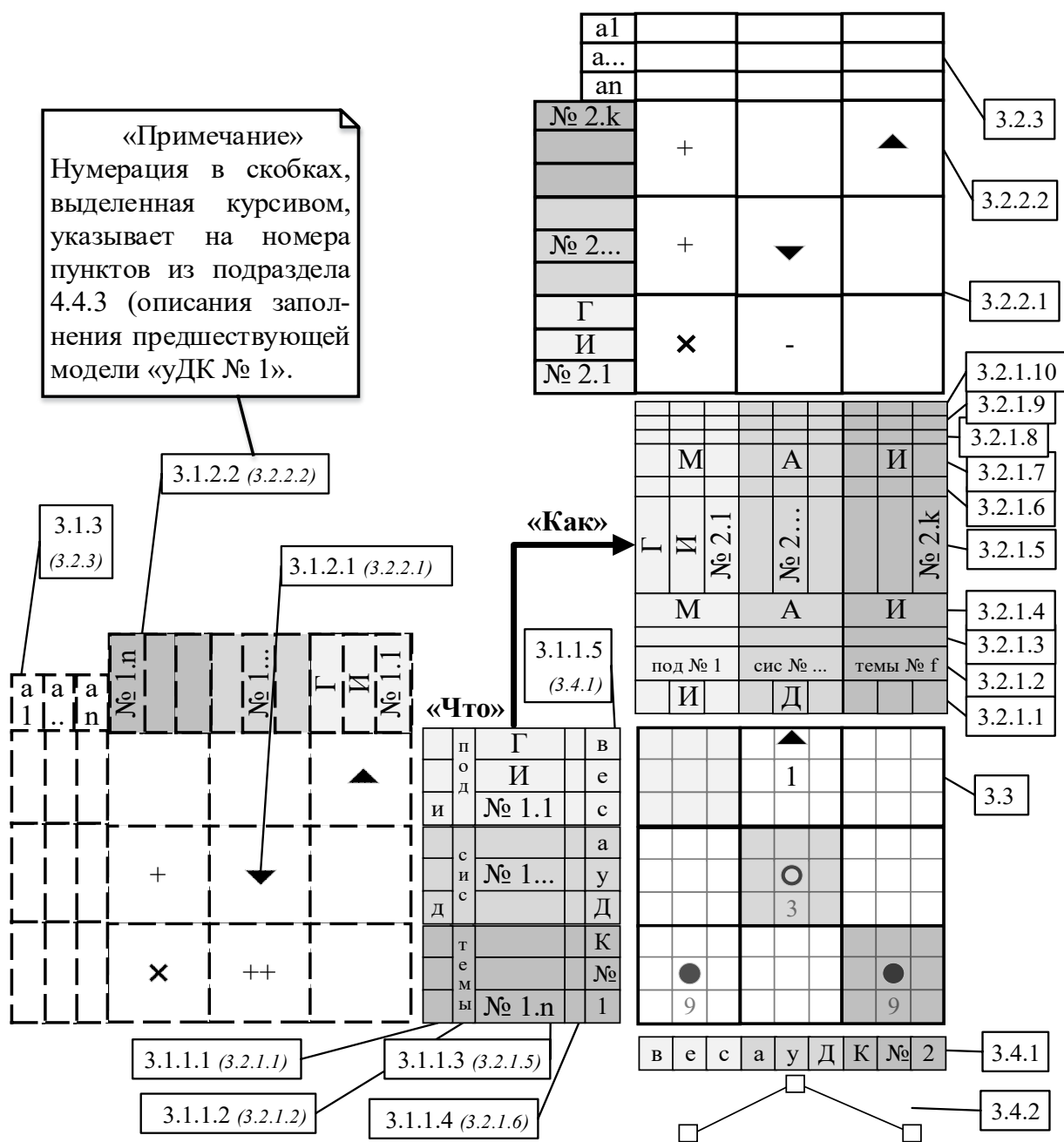


Рисунок 4.7 – Обобщенная структура модели «уДК № 2»

4.5.3 Описание рамочного алгоритма «уСФК для уДК № 2»

В подразделе 4.5.3 представляются рамочная (обобщенная) концепция алгоритма (см. рисунок 4.8) и порядок действий по ее реализации.

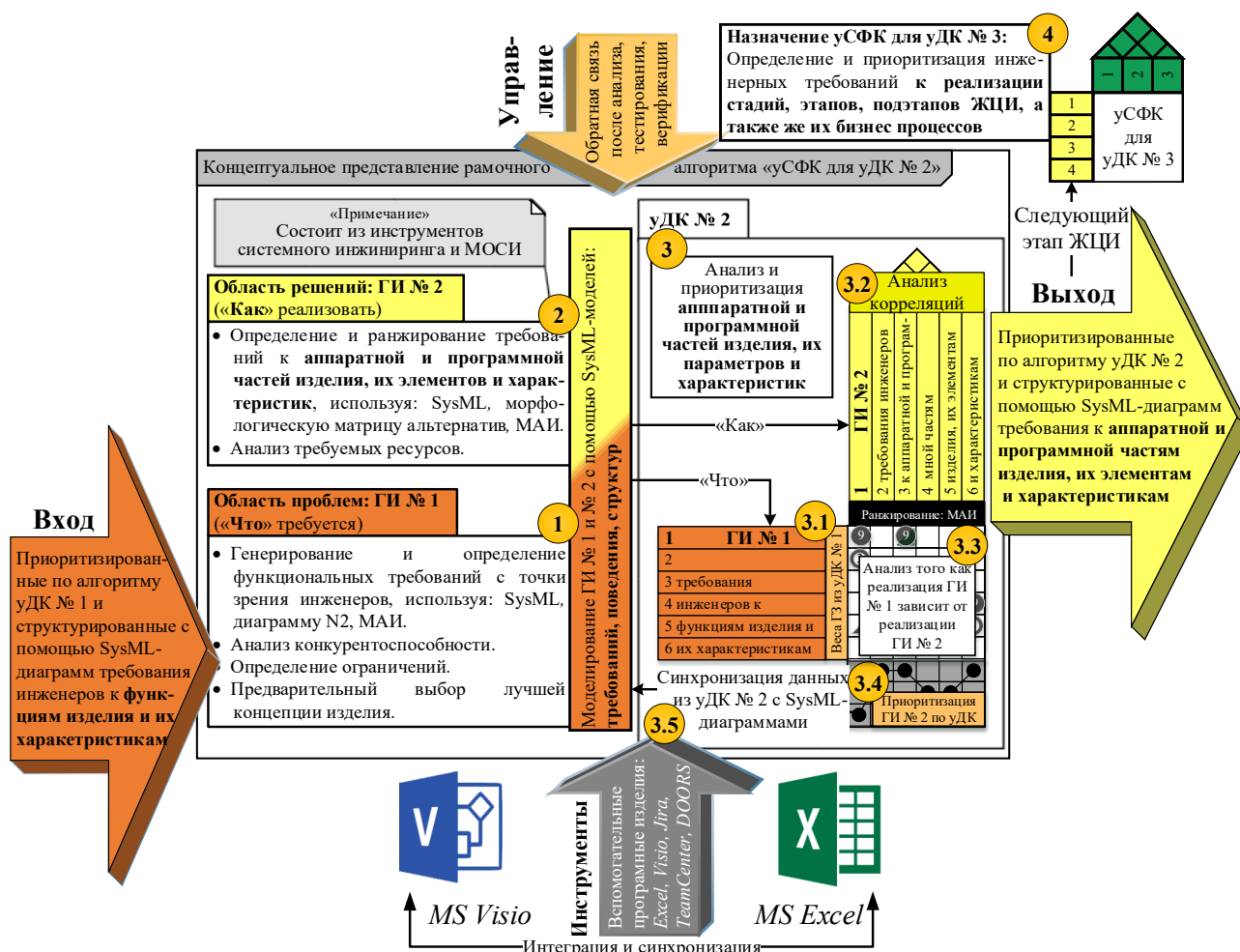


Рисунок 4.8 – Рамочный (обобщенный) алгоритм «уСФК для уДК № 2»: требования к функционалу изделия – требования к аппаратной/программной частям изделия

1. Сформулировать «область проблем»: параметры ГИ № 1 («Что» – функциональные требования к изделию, с точки зрения инженеров, которые удовлетворят требования заказчика).
 - 1.1. Если этап «уДК № 1» не выполнялся, то выполнить пункты 2, 3, 4 из подраздела 4.4.3.
2. Сформулировать «область решений»: параметры ГИ № 2 («КАКими» должны быть требования к АЧ/ПЧ структурам изделия, с точки зрения инженеров, чтобы изделие реализовывало предъявленные к нему функциональные требования).
 - 2.1. Сформулировать параметры ГИ № 2.
 - 2.1.1. Определить ограничения итогового изделия.
 - 2.1.2. Сгенерировать инженерные идеи с помощью мозгового штурма и ММА.

- 2.1.2.1. Возможные виды (альтернативы) изделия (технического объекта).
- 2.1.2.2. Возможные альтернативы подсистем выбранного вида изделия.
- 2.1.2.3. Возможные составные части (параметры) подсистем.
- 2.1.3. Сгенерировать инженерные идеи с помощью анализа (бенчмаркинга) изделий конкурентов, способных удовлетворить требуемые функции.
- 2.1.4. Определить финальный вид физического изделия:
 - 2.1.4.1. Определить критерии ранжирования альтернатив (к примеру, стоимость).
 - 2.1.4.2. Проранжировать критерии и альтернативы с помощью метода анализа иерархий и выбрать лучшую альтернативу.
- 2.1.5. Определить финальный перечень подсистем изделия.
 - 2.1.5.1. Определить критерии ранжирования альтернатив. К примеру: уровень технологической готовности (УТГ), отечественное или импортное производство).
 - 2.1.5.2. Проранжировать критерии и альтернативы с помощью математического аппарата метода анализа иерархий и выбрать лучшую подсистему.
 - 2.1.5.3. Определить рамочные характеристики подсистемы.
 - 2.1.5.4. Провести итерации пунктов 2.1.5.1–2.1.5.4 до тех пор, пока не будут определены все подсистемы изделия и составлен их перечень.
- 2.1.6. Определить финальный перечень составных частей (параметров) подсистем.
 - 2.1.6.1. Используя матрицу морфологического анализа, по каждой подсистеме составить перечень альтернативных параметров и их характеристик.
 - 2.1.6.2. Определить критерии ранжирования альтернатив.
 - 2.1.6.3. Проранжировать критерии и альтернативы с помощью математического аппарата метода анализа иерархий и выбрать лучшую компоновку подсистемы.
 - 2.1.6.4. Определить рамочные характеристики параметров.
 - 2.1.6.5. Составить финальный перечень параметров подсистемы.
 - 2.1.6.6. Определить ответственных за реализацию параметров.
 - 2.1.6.7. Уточнить каким образом будет достигнут параметр: разрабатывается (Р), производится (ПР), покупается (ПКП).
 - 2.1.6.8. Определить рамки бюджета на реализацию каждого параметра.
 - 2.1.6.9. Провести итерации пунктов 2.1.6.1–2.1.6.8 до тех пор, пока не будут определены параметры всех подсистем изделия.
- 2.1.7. Проранжировать с помощью математического аппарата МАИ:
 - 2.1.7.1. Подсистемы параметров ГИ № 2 (все между собой). Нормализовать веса.
 - 2.1.7.2. Параметры ГИ № 2 (в рамках каждой подсистемы). Нормализовать веса.

- 2.1.8. Промоделировать параметры ГИ № 2 с помощью SysML-диаграмм требований и диаграмм структур, для укрупненного и детального отражения архитектуры изделия.
3. Структурировать данные в модели «уДК № 2», приоритизировать выходные параметры.
 - 3.1. Структурировать в «Левой части» модели «уДК № 2» входные данные (функциональные требования к изделию). Если «уДК № 1» не выполнялся, веса важности параметров ГИ № 1 определяются с помощью математического аппарата метода анализа иерархий (см. в главе 2 подраздел 2.1.3).
 - 3.2. Структурировать в модели «уДК № 2» выходные данные (параметры ГИ № 2).
 - 3.2.1. Перенести в «Верхнюю часть» ранее определенные данные:
 - 3.2.1.1. Идентификаторы параметров ГИ № 2.
 - 3.2.1.2. Подсистемы параметров ГИ № 2.
 - 3.2.1.3. Рамочные характеристики подсистем.
 - 3.2.1.4. Результаты ранжирования подсистем по МАИ.
 - 3.2.1.5. Параметры ГИ № 2 по каждой подсистеме.
 - 3.2.1.6. Характеристики параметров ГИ № 2 (показатели их качества).
 - 3.2.1.7. Результаты ранжирования параметров ГИ № 2 по МАИ.
 - 3.2.1.8. Указать проводился ли морфологический анализ: да или нет.
 - 3.2.1.8.1. Если да, сделать ячейку гиперссылкой, ведущей к ММА.
 - 3.2.1.9. Указать способ достижения параметра: «Р» (самостоятельная разработка), «ПР» (производство), «ПКИ» (покупное комплектующее изделие).
 - 3.2.1.10. Указать ответственных за реализацию параметра/подсистемы.
 - 3.2.2. Заполнить матрицу «Крыша» модели «уДК № 2» по аналогии с «уДК № 0».
 - 3.2.3. Указать результаты бенчмаркинга/морфологической матрицы альтернатив.
 - 3.3. Проанализировать и отразить в «Центральной части» модели «уДК № 2» зависимость удовлетворения параметров ГИ № 1 от реализации ГИ № 2.
 - 3.4. Заполнить «Нижнюю часть» модели «уДК № 2».
 - 3.4.1. Получить веса приоритизации параметров ГИ № 2 (см. формулы (4.5) и (4.6)).
 - 3.4.2. Визуализировать нормализованные веса приоритизации с помощью диаграммы.
 - 3.5. Автоматизировано обновить SysML-диаграммы параметров ГИ № 2 (см. в главе 3 подраздел 3.2.4), скопировать и вставить SysML-диаграммы в MS Excel справа от модели «уДК № 2».
4. Перенести данные связанные с параметрами ГИ № 2 (пункты 3.2.1.1–2, 3.2.1.5–6, 3.2.1.8–10, 3.2.2.1–2, 3.2.3, 3.4.1) в «Левую часть» следующей модели «уДК № 3».

4.6 Разработка алгоритма «уСФК для уДК № 3»: требования к АЧ/ПЧ изделия – требования НТД к порядку реализации ЖЦИ

4.6.1 Определение физического смысла и формализация алгоритма

Физический смысл алгоритма «уСФК для уДК № 3» заключается в том, чтобы определить требования к архитектуре аппаратной/программной частей изделия (параметры ГИ № 2, если они не были определены на предыдущем этапе), для выполнения требований по проектированию АЧ/ПЧ определить требования нормативно-технической документации к порядку реализации ЖЦИ (этапа ЖЦИ) (параметры ГИ № 3), проранжировать параметры ГИ № 3 с помощью математического аппарата МАИ и приоритизировать их в соответствии с алгоритмом «уДК» (с выделением критически важных параметров; см. формулы (4.7) и (4.8)):

$$\{\overrightarrow{iHoQDR_k^*}\}[LPA_{kl}] = \overrightarrow{HoQLP_l}, \quad (4.7)$$

$$\left\| \frac{(\overrightarrow{LP_j^*} \cdot \overrightarrow{HoQLP_j})}{\sum_j LP_j^* \cdot \overrightarrow{HoQLP_j}} \right\| = \|\overrightarrow{iHoQLP_j^*}\| = 1, \quad j = \overline{1, l}, \quad (4.8)$$

где LP – требования нормативно-технической документации к этапам ЖЦИ (от англ. Lifesycle Planning) или ГИ № 3 (используется в уДК № 3 и 4);

$[LPA_{kl}]$ – центральная матрица уДК № 3 размерностью kl с числовой оценкой зависимости каждого параметра ГИ № 2 от достижения каждого ГИ № 3;

$\overrightarrow{HoQLP_l}$ – l -вектор ненормализованных весов приоритизации параметров ГИ № 3 (выходных параметров), подсчитанных по классическому алгоритму «ДК»;

j – номер столбца центральной части любой модели «уДК»;

LP_j^* – вес важности j -го параметра ГИ № 3, подсчитанный сначала с помощью математического аппарата МАИ, а затем нормализованный;

$\overrightarrow{LP_l^*}$ – вектор размерности l , который представляет собой нормализованные веса важности параметров ГИ № 3;

$\overrightarrow{iHoQLP_j^*}$ – l -вектор нормализованных весов приоритизации параметров ГИ № 3, подсчитанных в соответствии с алгоритмом «уДК».

4.6.2 Разработка абстрактной структуры модели «уДК № 3»

В подразделе 4.6.2 на рисунке 4.9 представлена обобщенная структура модели «уДК № 3». Структурные элементы модели «уДК № 3» пронумерованы в соответствии с

нумерацией действий, указанных в подразделе 4.6.3 начиная с пункта 3. Нумерация структурных элементов «Левой части» модели «уДК № 3» основана на описании действий алгоритма «уСФК для уДК № 2» в части пунктов 3.2 и 3.4.1 (подробнее см. на рисунке 4.9 шрифт, выделенный курсивом).

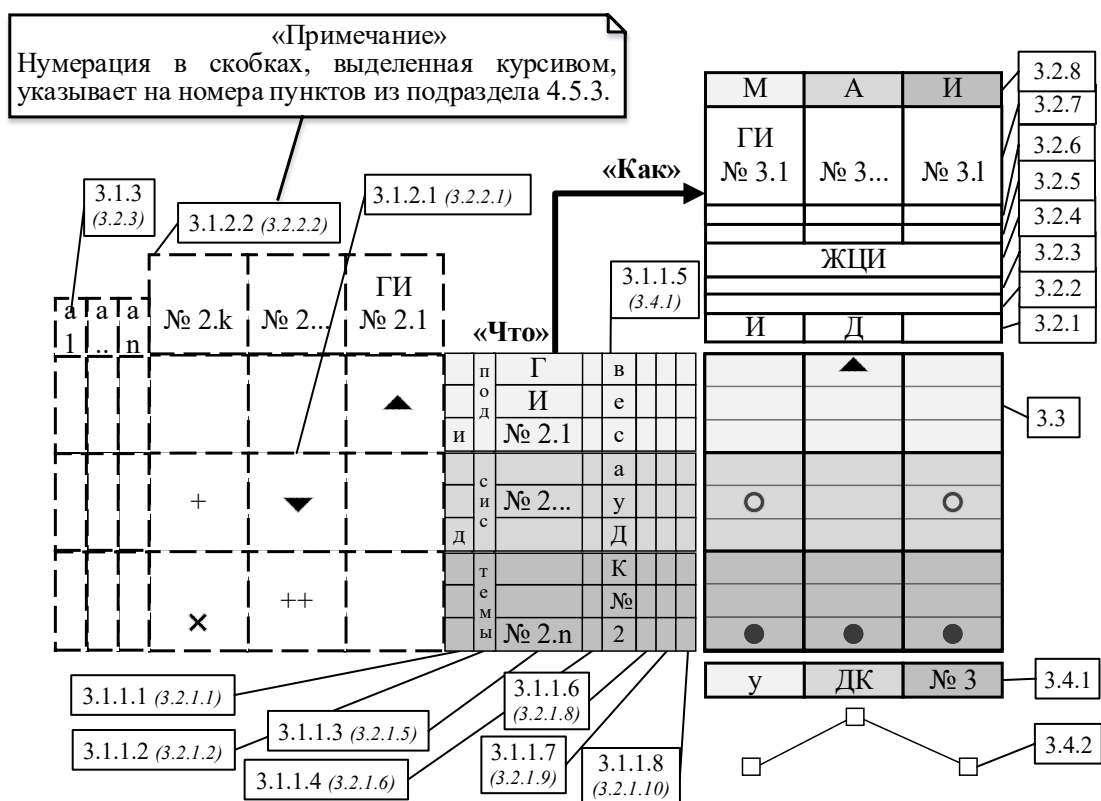


Рисунок 4.9 – Обобщенная структура модели «уДК № 3»

4.6.3 Описание рамочного алгоритма «уСФК для уДК № 3»

В подразделе 4.6.3 представляются рамочная (обобщенная) концепция алгоритма (см. рисунок 4.10) и порядок действий по ее реализации.

1. Сформулировать «область проблем»: параметры ГИ № 2 («Что» – требования к АЧ/ПЧ структурам изделия, которые реализуют предъявленные к нему функциональные требования).

1.1. Если этап уДК № 2 не выполнялся, то выполнить пункты 2 и 3 из подраздела 4.5.3.

2. Определить «область решений»: параметры ГИ № 3 (на «КАкие» этапы декомпозируется жизненный цикл проекта или на какие подэтапы декомпозируется этап жизненного цикла изделия (с точки зрения используемой нормативно-технической документации)).

2.1. Определить стадии, этапы, подэтапы ЖЦ изделия или проекта.

2.2. Составить список НТД, которые должны быть использованы при реализации заданного жизненного цикла изделия или проекта.

- 2.3. Проанализировать НТД, которые регламентируют порядок реализации заданного жизненного цикла изделия или проекта.
- 2.4. Создать SysML-диаграмму, отражающую верхнеуровневую логику реализации рассматриваемого ЖЦ используя определенные параметры ГИ № 3.
- 2.5. Составить сетевой план график этапа ЖЦИ или проекта с указанием ответственных.

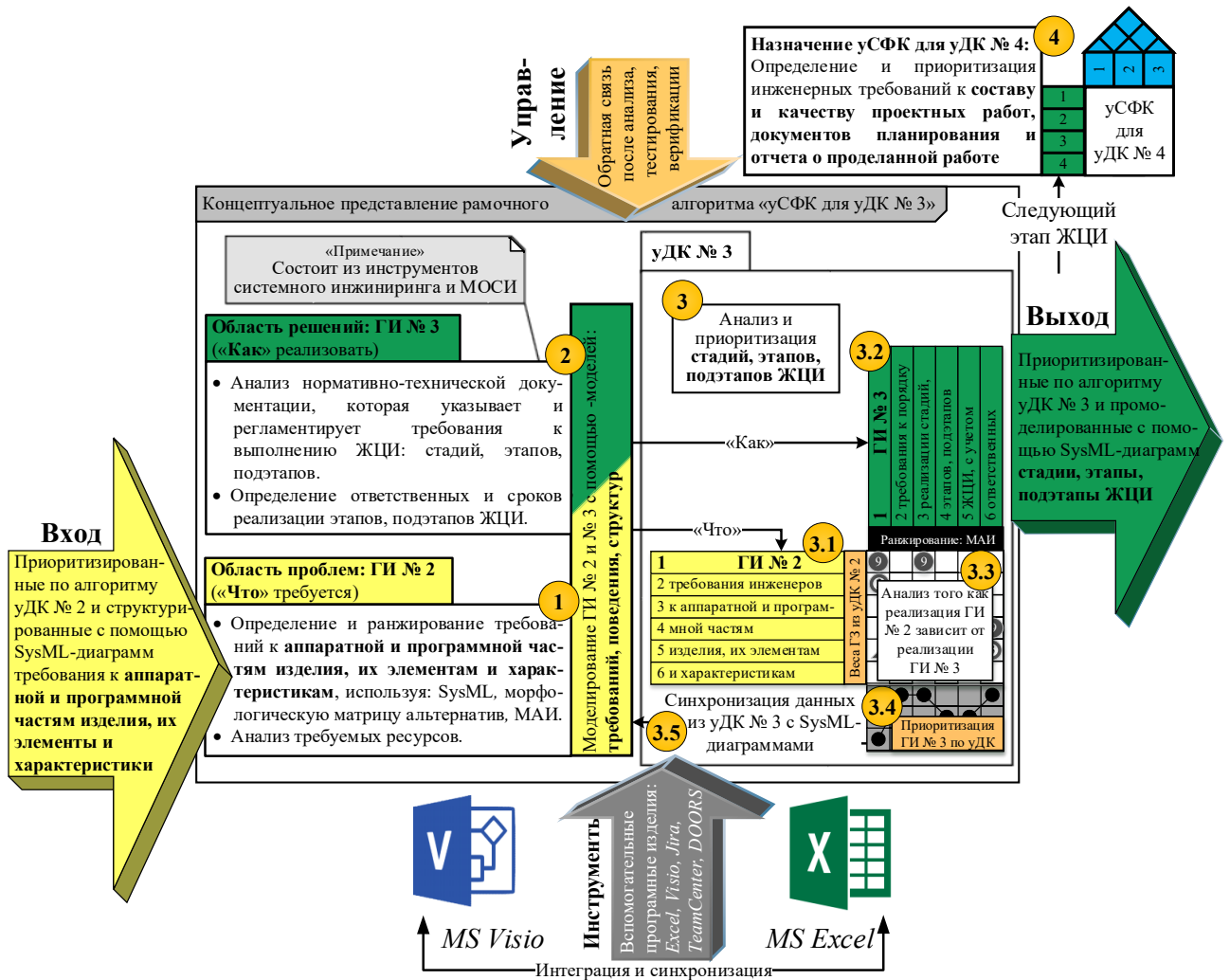


Рисунок 4.10 – Рамочный (обобщенный) алгоритм «уСФК для уДК № 3»: требования к АЧ/ПЧ структурам изделия – требования НТД к порядку реализации ЖЦИ

3. Структурировать данные в модели «уДК № 3», приоритизировать выходные параметры.
 - 3.1. Структурировать в «Левой части» модели «уДК № 3» входные данные (требования к АЧ/ПЧ структурам изделия). Если уДК № 2 не выполнялся, веса важности параметров ГИ № 2 определяются с помощью математического аппарата метода анализа иерархий (см. в главе 2 подраздел 2.1.3).
 - 3.2. Структурировать в модели «уДК № 3» выходные данные (параметры ГИ № 3).
 - 3.2.1. Идентификаторы параметров ГИ № 3.

- 3.2.2. Срок начала стадии/этапа.
 - 3.2.3. Срок окончания стадии/этапа.
 - 3.2.4. Формулировка стадии/этапа.
 - 3.2.5. Срок начала выполнения параметра ГИ № 3.
 - 3.2.6. Срок окончания выполнения параметра ГИ № 3.
 - 3.2.7. Параметры ГИ № 3 – декомпозированный на составные части жизненный цикл проекта, к примеру, на подэтапы (детальность зависит от постановки задачи).
 - 3.2.8. Результаты ранжирования параметров ГИ № 3 с помощью математического аппарата МАИ.
- 3.3. Проанализировать и отразить в «Центральной части» модели «уДК № 3» зависимость удовлетворения параметров ГИ № 2 от реализации параметров ГИ № 3.
- 3.4. Заполнить «Нижнюю часть» модели «уДК № 3».
- 3.4.1. Получить веса приоритизации параметров ГИ № 3 (см. формулы (4.7) и (4.8)).
 - 3.4.2. Визуализировать нормализованные веса приоритизации с помощью диаграммы.
- 3.5. Автоматизировано обновить SysML-диаграммы параметров ГИ № 3 (см. в главе 3 подраздел 3.2.4), скопировать и вставить их в MS Excel справа от модели «уДК № 3».
4. Перенести данные связанные с параметрами ГИ № 3 (пункты 3.2.1–3.2.7, 3.4.1) в «Левую часть» следующей модели «уДК № 4».

4.7 Разработка алгоритма «уСФК для уДК № 4»: требования НТД к порядку реализации ЖЦИ – требования НТД к документации ЖЦИ

4.7.1 Определение физического смысла и формализация алгоритма

Физический смысл алгоритма «уСФК для уДК № 4» заключается в том, чтобы определить требования к порядку реализации жизненного цикла изделия (этапа ЖЦИ) (параметры ГИ № 3, если не были определены на предыдущем этапе), с их учетом определить требования нормативно-технической документации к отчетной документации жизненного цикла изделия (этапа ЖЦИ; параметры ГИ № 4), проранжировать их с помощью математического аппарата метода анализа иерархий и приоритизировать их в соответствии с алгоритмом «уДК» (с выделением критически важных параметров; см формулы (4.9) и (4.10)):

$$\{\overrightarrow{iHoQLP_j^*}\}[LCA_{it}] = \overrightarrow{HoQLC_t}, \quad (4.9)$$

$$\left\| \frac{\overrightarrow{(LC_j^* \cdot HoQLC_j)}}{\sum_j LC_j^* \cdot HoQLC_j} \right\| = \|\overrightarrow{iHoQLC_t^*}\| = 1, \quad j = \overline{1, t}, \quad (4.10)$$

LC – (от англ. Lifecycle Control) требования НТД, регламентирующие состав отчетных документов, которые должны быть выполнены на этапе жизненного цикла изделия;

$[LCA_{lt}]$ – центральная матрица уДК № 4 размерностью lt с числовой оценкой зависимости каждого параметра ГИ № 3 от достижения каждого параметра ГИ № 4;

$\overrightarrow{HoQLC_t}$ – t -вектор ненормализованных весов приоритизации параметров ГИ № 4 (выходных параметров), подсчитанных по классическому алгоритму «ДК»;

j – номер столбца центральной части любой модели «уДК»;

LC_j^* – вес важности j -го параметра ГИ № 4, подсчитанный сначала с помощью аппарата МАИ, а затем нормализованный;

$\overrightarrow{LC_t^*}$ – вектор размерности t , который представляет собой нормализованные веса важности параметров ГИ № 4;

$\overrightarrow{iHoQLC_t^*}$ – t -вектор нормализованных весов приоритизации параметров ГИ № 4, подсчитанных в соответствии с алгоритмом «уДК».

4.7.2 Разработка абстрактной структуры модели «уДК № 4»

В подразделе 4.7.2 на рисунке 4.11 представлена обобщенная структура модели «уДК № 4».



Рисунок 4.11 – Обобщенная структура модели «уДК № 4»

Структурные элементы модели «уДК № 4» пронумерованы в соответствии с нумерацией действий, указанных далее в подразделе 4.7.3 начиная с пункта 3. Нумерация структурных элементов «Левой части» модели «уДК № 4» основана на описании действий алгоритма «уСФК для уДК № 3» в части пунктов 3.2 и 3.4.1 (подробнее см. на рисунке 4.11 шрифт, выделенный курсивом).

4.7.3 Описание рамочного алгоритма «уСФК для уДК № 4»

В подразделе 4.7.3 представляются рамочная (обобщенная) концепция алгоритма (см. рисунок 4.12) и порядок действий по ее реализации.

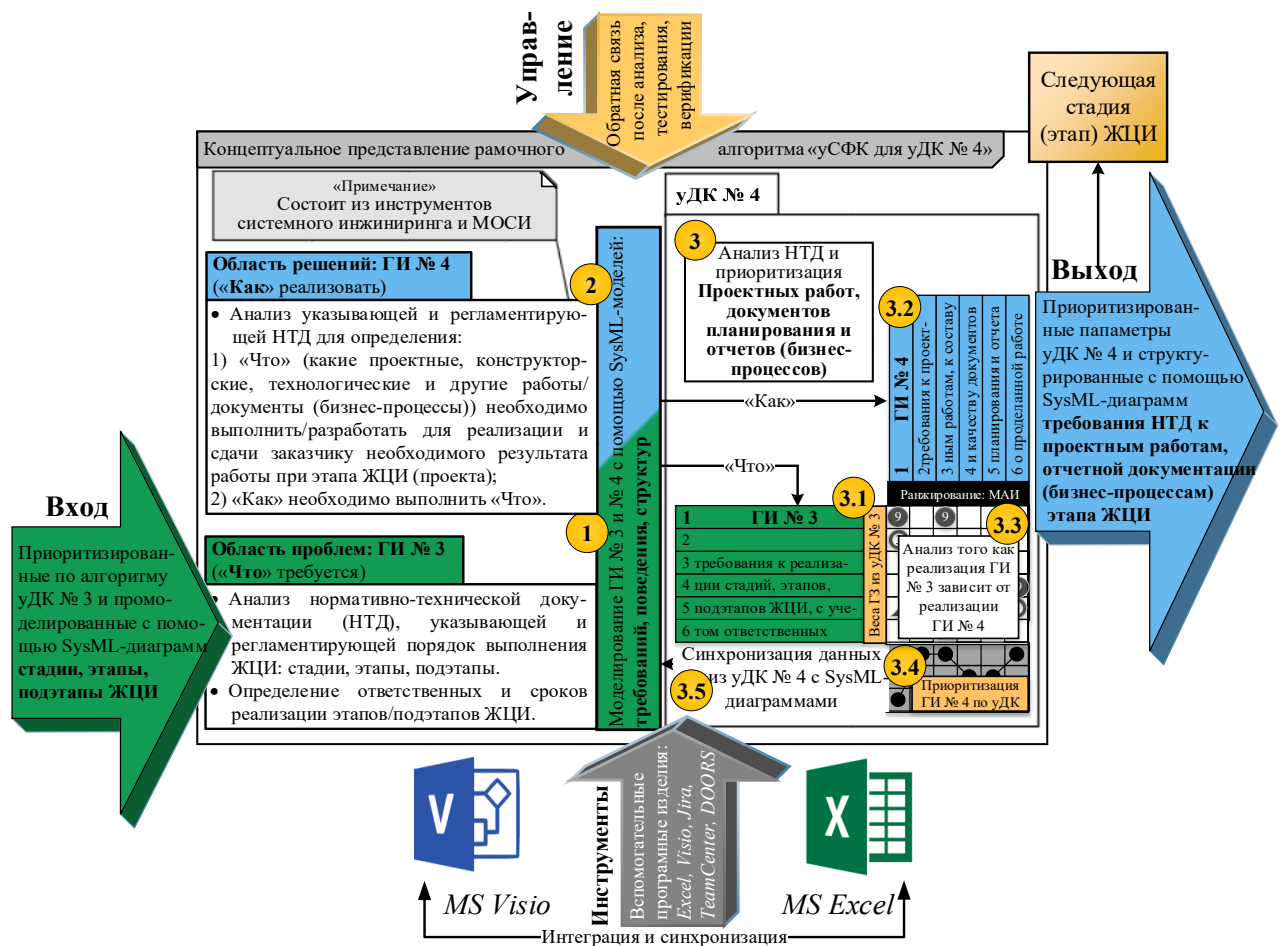


Рисунок 4.12 – Рамочный (обобщенный) алгоритм «уСФК для уДК № 4»: требования НТД к порядку реализации ЖЦИ – требования НТД к отчетной документации ЖЦИ

1. Определить «область проблем»: ГИ № 3 («Что» – этапы ЖЦ изделия/проекта или под-этапы этапа ЖЦИ, а также ответственные за разработку элементов АЧ/ПЧ изделия).

- 1.1. Если этап уДК № 3 не выполнялся, то необходимо выполнить действия, указанные в подразделе 4.6.3 в пунктах 2, 3, 4.
2. Определить «область решений»: ГИ № 4 («КАКие» отчетные документы, регламентированные отраслевой НТД, должны быть выполнены на протяжении жизненного цикла проекта или на заданном этапе ЖЦИ).
 - 2.1. Проанализировать требования НТД к отчетной документации:
 - 2.1.1. Проанализировать НТД, которые указывают «Что» из отчетных документов должно быть выполнено для того, чтобы заказ сдать заказчику, выполнить этап ЖЦИ.
 - 2.1.1.1. Составить перечень верхнеуровневых отчетных документов (ВОД);
 - 2.1.1.1.1. Декомпозировать (максимально точно детализировать) ВОД на документы (составные части), входящие в их состав.
 - 2.1.2. Проанализировать НТД, которые указывают «Как», определенные отчетные документы (ВОД и их составные части) должны быть выполнены для того, чтобы их приняли проверяющие службы и заказчик.
 - 2.2. Промоделировать параметры ГИ № 4 с помощью способа автоматизации разработки SysML-диаграмм требований (см. главу 3).
 - 2.2.1. Декомпозировать SysML-диаграмму, созданную в подразделе 4.6.3 в пункте 2.4. На новых SysML-диаграммах отразить ВОД с учетом порядка их реализации.
 - 2.2.2. Декомпозировать верхнеуровневую модель на детальные SysML-диаграммы требований НТД под каждый подэтап этапа ЖЦ (подробнее см. главу 5 раздел 5.7).
3. Провести анализ и приоритизацию параметров ГИ № 4 в модели «уДК № 4».
 - 3.1. Убедиться, что левая часть модели «уДК № 4» заполнена входными данными в соответствии с подразделом 4.6.1 пунктом 4 данной главы.
 - 3.2. Заполнить верхнюю часть модели «уДК № 4» выходными данными.
 - 3.2.1. Идентификаторы параметров ГИ № 4.
 - 3.2.2. Веса важности ВОД (в случае если проводилось их ранжирование).
 - 3.2.3. Формулировки параметров ГИ № 4 (верхнеуровневые отчетные документы).
 - 3.2.3.1. Формулировки составных частей верхнеуровневых отчетных документов.
 - 3.3. Проанализировать и отразить в «Центральной части» модели «уДК № 4» зависимость удовлетворения параметров ГИ № 3 от реализации ГИ № 4.

Примечание – В случае необходимости проанализировать зависимость удовлетворения ГИ № 3 не только от ВОД, но и от СЧ ВОД, приоритизация проводится по аналогии с формулами (4.5) и (4.6) из «уСФК для уДК № 2».
 - 3.4. Заполнить «Нижнюю часть» модели «уДК № 4».
 - 3.4.1. Приоритизировать параметры ГИ № 4 (см. формулы (4.9) и (4.10)).

- 3.4.2. Визуализировать веса приоритизации с помощью диаграммы.
- 3.5. Автоматизировано обновить SysML-диаграммы параметров ГИ № 4 (см. в главе 3 подраздел 3.3.4) и вставить их в Excel справа от модели «удК № 4».

4.8 Разработка электронных шаблонов моделей «удК»

В разделе 4.8 рассматривается характеристика шаблонов моделей «удК».

В соответствии с моделью «уСФК», алгоритмами «уСФК для удК № 0–4» (разделы 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7) и рекомендованными обобщенными структурами моделей «удК № 0–4» (рисунки 4.3, 4.5, 4.7, 4.9, 4.11) были разработаны электронные шаблоны моделей «удК».

Для повышения эргономики взаимодействия пользователя с данными, а также для сокращения трудозатрат на анализ данных, хранящихся в матрицах моделей «удК», электронные шаблоны моделей «удК» были автоматизированы с помощью макросов, основанных на языке VBA. Суть макросов заключается в том, чтобы пользователи шаблонов могли как поэтапно анализировать параметры, так и моментально посмотреть всю модель. Макросы были выражены в виде кнопок интегрированных в электронные шаблоны моделей «удК» (примеры кнопок см. в приложении Г на рисунках Г.2 и Г.3).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что MS Excel обладает достаточным базовым функционалом для использования моделей «удК» и их персональной настройке широкой аудиторией пользователей. Также полученные результаты позволили, с одной стороны сократить трудозатраты на разработку новых моделей «удК» до 20% (экспертная оценка), а с другой стороны, сократить трудозатраты на анализ данных в моделях «удК» за счет использования разработанных макросов.

4.9 Выводы

В главе 4 описаны разработанные научные основы (методический инструментарий – алгоритмы, модели) реализации этапов ЖЦ проектирования технических объектов широкого класса в парадигме модельно-ориентированного системного инжиниринга.

1. Классическая четырехфазная (четырёхэтапная) модель жизненного цикла «Структурирование функции качества» была конкретизирована в части своих этапов (их количества и назначения). Полученная новая модель «усовершенствованное СФК» обеспечивает проектирование аппаратно-программных объектов в соответствии с потребностями пользователей, языком SysML (требованиями к функционалу и к аппаратной и программной

частям изделия), а также с учетом требований НТД к порядку реализации ЖЦ изделия/проекта и к составу отчетной документации для разработки и сдачи результатов этапа ЖЦ заказчику.

2. Разработан унифицированный алгоритм «уСФК для уДК» для генерирования входных и выходных данных этапов конкретизированной модели «СФК». Он основан на синтезе инструментов системного инжиниринга с конкретизированными и модернизированными автором инструментами модельно-ориентированного системного инжиниринга (ДК, SysML).

3. Для каждого этапа конкретизированной модели «СФК» разработаны соответствующие алгоритмы генерирования данных (параметров ГП, ГЗ, ГИ № 1–4), основанные на унифицированном алгоритме «уСФК для уДК». В рамках каждого алгоритма: 1) определен и формализован физический смысл алгоритма; 2) разработана обобщенная структура шаблона модели «уДК»; 3) разработана рамочная (обобщенная) концепция алгоритма и текстовое описание его реализации, включающее генерирование данных, структурирование и анализ данных в модели «уДК», финальную приоритизацию выходных параметров в модели «уДК», автоматизированную конвертацию данных из модели «уДК» в фигуры SysML-диаграммам требований.

4. Согласно разработанным структурам моделей «уДК № 0–4» (см. рисунки 4.3, 4.5, 4.7, 4.9, 4.11), под каждый этап конкретизированной модели «СФК» были разработаны соответствующие электронные шаблоны моделей «уДК». Для минимизации трудозатрат на анализ информации шаблоны были автоматизированы с помощью разработанных автором макросов (программ), написанных на языке VBA. Электронные шаблоны позволяют сократить трудозатраты на разработку новых моделей «уДК» до 20% (экспертная оценка).

Представленные результаты данной главы развивают методику «СФК» (в том числе ее метод и язык «ДК»), являющейся лучшим инструментом в области тотального управления качеством. Так как эта область используется в достижении стратегии CALS, следовательно, полученные результаты развивают методическое и лингвистическое обеспечение CALS.

Также полученные результаты являются научной основой, которую целесообразно учитывать при построении интегрированных средств управления различными аспектами проектирования ТО в ходе ЖЦ изделий. Результаты призваны обеспечить проектирование изделий с помощью доступного широкой аудитории пользователей методического инструментария МОСИ. Это должно повлиять на ускорение перехода от документно-ориентированной парадигмы управления проектом (ЖЦИ) и локально используемых для этого САЕ/CAD/CAM ИТ систем, к перспективной парадигме, основанной на программно-методическом обеспечении модельно-ориентированного СИ и CALS-технологиях.

Верификация и валидация полученных результатов и генерируемых ими преимуществ рассматриваются в главе 5.

Глава 5

Верификация и валидация решений и разработок диссертационного исследования

В главе 5 рассматриваются верификация и валидация полученных в результате диссертационного исследования решений и разработок. В разделе 5.1 рассматриваются термины и определения ВиВ. Формулируются задачи и план верификации и валидации (ПВВ). В дальнейших разделах рассматриваются ВиВ: унифицированного алгоритма генерирования входных и выходных данных для этапов конкретизированной модели «СФК» (раздел 5.2); конкретизированной модели «СФК» и разработанных шаблонов модели «ДК» (раздел 5.3); алгоритма «удК» (раздел 5.4); способа автоматизации разработки SysML-диаграмм требований (раздел 5.5); решений и разработок диссертационного исследования – как единого методического инструментария (раздел 5.6). В разделе 5.7 рассматриваются дополнительные ВиВ решений и разработок для демонстрации их практической значимости.

5.1 Термины, задачи, план верификации и валидации

В стандарте IEEE 1012-2016 указаны следующие определения терминов верификации и валидации. **Верификация** – (А) это процесс оценки системы или компонента для определения того, удовлетворяют ли продукты на заданной фазе разработки условиям, которые были предъявлены к ним в начале этой фазы. (Б) Процесс предоставления объективных доказательств того, что система, программная или аппаратная части и связанные с ними продукты: соответствуют требованиям (с точки зрения правильности, полноты, соответствия и точности) на протяжении всех действий всех процессов жизненного цикла (закупки, поставок, разработки, производства и поддержки); удовлетворяют стандарты, практики и соглашения в течении процессов жизненного цикла; и успешно выполняют все действия на протяжении жизненного цикла, а также удовлетворяют все критерии для инициации (запуска) последующих действий ЖЦ.

Валидация – (А) это процесс оценки системы или компонента в течение или в конце процесса разработки для определения того, удовлетворяют ли они конкретным требованиям.

(Б) Это процесс предоставления подтверждения того, что система, программная или аппаратная части и связанные с ними продукты: удовлетворяют требованиям, предъявляемые к ним в конце каждого действия жизненного цикла; решают заданную проблему (к примеру, правильно моделируют физические законы, реализуют бизнес правила, и надлежаще реализуют логику системы); удовлетворяют потребности и ожидания пользователей [148].

В работе использовались следующие определения. **Верификация** – это процесс демонстрации того, что изделие удовлетворяет письменным спецификациям и требованиям. **Валидация** – это процесс демонстрации того, что изделие удовлетворяет требования заказчика (потребности пользователей) [149].

Задачи ВиВ заключаются в демонстрации того, что полученные решения и разработки:

- 1) удовлетворяют предъявляемые к ним требования, указанные в ПВВ;
- 2) совершенствуют процессы проектирования новых объектов с помощью современных инструментов модельно-ориентированного системного инжиниринга («ДК», SysML) и информационных технологий, сокращают сроки создания новой техники;
- 3) повышают эффективность и реализуются с помощью программных средств вычислительной техники, доступных широкой аудитории пользователей;
- 4) являются методической основой, которую целесообразно учитывать при проектировании новых средств взаимодействия проектировщика с системой – комплексов интегрирования программных средств и САПР (CALS-технологий) для анализа и синтеза проектных решений, и управления проектными работами;
- 5) способствуют к переходу на безбумажные сетевые формы документооборота, унифицируют и повышают качество проектных работ.

Верификация и валидация в основном проводились на примере реализации различных аспектов проектирования МКА «Маяк» в соответствии с планом (см. таблицу 5.1), а в качестве методов использовались: анализ (А), инспекция (И), демонстрация (Д) и тест (Т) [148, 149].

Таблица 5.1 – ПВВ полученных решений и разработок исследования

Номер главы/раздела, результат исследования	Требование (ожидаемый результат верификации, валидации или ВиВ)	Метод			
		А	И	Д	Т
Раздел 4.2, унифицированный алгоритм генерирования входных и выходных данных для этапов конкретизированной модели «СФК».	ВиВ. Основанные на унифицированном алгоритме алгоритмы «уСФК для уДК № 0–4» должны обеспечить получение, качественный и количественный анализ данных для идентификации потребностей пользователей, определения требований заказчика и формулировки инженерных требований.	А	—	Д	—

Продолжение таблицы 5.1

Номер главы/раздела, результат исследования	Требование (ожидаемый результат верификации, валидации или ВиВ)	Метод			
		А	И	Д	Т
Раздел 4.1, конкретизированная каскадная модель «СФК» (модель «уСФК»).	Верификация. Модель должна быть реализована с помощью взаимосвязанных электронных шаблонов моделей «удК».	—	—	Д	—
Раздел 4.8, электронные шаблоны модели «ДК» («удК»).	Верификация. Шаблоны должны быть реализованы с учетом унифицированного алгоритма генерирования данных «уСФК для удК».	—	—	Д	—
	Валидация. Шаблоны должны обеспечить сокращение трудозатрат на построение новых моделей «ДК»/«удК» на 10–20%.	—	—	—	Т
Раздел 2.3, алгоритм приоритизации выходных параметров в модели «ДК», «удК» для идентификации критически важных.	ВиВ. Алгоритм «удК» должен обеспечить повышение: 1) контрастности весов выходных параметров (требований) в два и более раз (по сравнению с алгоритмом «ДК») и 2) идентификацию критически важных требований.	А	И	—	—
Глава 3, способ автоматизации разработки и обновления SysML-диаграмм требований.	ВиВ. Способ должен обеспечить построение 300 SysML-фигур требований, заполненных информацией, менее чем за 60 мин.	—	—	Д	Т
Глава 5, решения и разработки, основанные на модернизации, конкретизации и синтезе инструментов МОСИ: «СФК», «ДК» и SysML и реализованные в ПО, доступном широкой аудитории пользователей.	Верификация. Решения и разработки данного исследования должны быть синтезированы и реализованы как единый методический инструментарий на основе единого рабочего пространства.	—	—	Д	—
	Валидация. Методический инструментарий должен подтвердить, что: 1) модель «удК» позволяет эффективнее чем SysML-диаграмма требований системно отслеживать взаимосвязи требований «в» и «между» разными аспектами проектирования; 2) SysML-модели позволяют эффективнее чем модель «ДК»/«удК» структурировать и в дальнейшем воспринимать более 20–25 параметров.	—	—	Д	—

5.2 Верификация и валидация унифицированного алгоритма генерирования входных и выходных данных для этапов конкретизированной модели «СФК»

В соответствии с требованиями, указанными в плане верификации и валидации (таблице 5.1), для ВиВ унифицированного алгоритма были использованы основанные на нем алгоритмы «уСФК для уДК № 0–4». В данном разделе рассматриваются результаты использования алгоритмов «уСФК для уДК № 0 и 1», которые были применены для подтверждения их способности генерировать параметры ГП, ГЗ и ГИ.

Согласно конкретизированной каскадной модели «СФК» (раздел 4.1) и алгоритма «уСФК для уДК № 0» для генерирования входных и выходных данных предпроектного этапа ЖЦ (раздел 4.3), была получена первичная информация о том «Что нужно?» заказчику и пользователям малоразмерного космического аппарата. В рамках этого составлено описание проекта и проведены: этнография, опросы, интервью, мозговые штурмы с участниками проекта для генерирования проблем, пожеланий и идей по их удовлетворению. С помощью инструмента «ВАСТ», выявленная информация была отсортирована по группам «Что делать» и «Как делать», а затем был проведен углубленный анализ причин ее появления (см. рисунок 5.1) [121]. Использование инструментов системного инжиниринга «схема деления работ» и «схема деления продукта» [23] позволило иерархически сгруппировать полученные данные.

№ п/п	Пожелания к МКА от заинтересованных сторон и заказчика	ЧТО	КАК	Причина пожелания - выделения «корня» причины (конкретного требования).
1	Бюджет программы космического эксперимента менее 15 млн. рублей.			Летный образец должен стоить меньше 700 тыс. руб
2	Отражатель спутника должен быть довольно большим, чтобы отражения Солнца на Земле тоже были большими.			Должен давать как можно более полное облучение видимой стороны Земли.

Рисунок 5.1 – Пример использования инструмента «ВАСТ» в ходе анализа потребностей пользователей и требований заказчика МКА «Маяк»

Из «Что делать» (рисунок 5.1) идентифицировано 2 потребности пользователей малоразмерного космического аппарата и определено 6 требований заказчика МКА. Далее, данные из колонки «Как делать», в сочетании с результатами применения алгоритмов «уСФК для уДК № 1 и № 2» позволили сформулировать 7 подсистем (ПдС) МКА, 22 функциональных требования, 27 требований к аппаратной и программной частям МКА.

После получения потребностей пользователей и требований заказчика, они были проранжированы по модели Кано (см. приложение Б) и по методу анализа иерархий (см. приложение В). Некоторые результаты ранжирования отражены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Сравнение результатов ранжирования: модель Кано и МАИ

Инструмент ранжирования:	Модель Кано	Метод анализа иерархий	
		Ранг*	Количественная оценка
Формулировка требования заказчика	Качественная оценка		
МКА должен быть выполнен из отечественных компонентов	Впечатляющее требование	3	12,83
Спутник должен быть виден с Земли как самая яркая звезда на ночном небе (с звездной величиной в вспышке – 8 m)	Требуемое	1	44,61
Изготовление летного экземпляра КА, не должно превышать 700 тыс. руб.	Требуемое	2	28,17
МКА должен быть формата CubeSat 3u	Базовое	6	2,18
Срок орбитального существования должен быть более 1 месяца	Базовое	4	6,58
Должно быть обеспечено стабильная мощность и безопасное энергопитание...	Базовое	5	5,62
* Чем меньше число, тем важнее требование относительно других			

Анализ таблицы 5.2 показал, что эти инструменты ранжирования позволяют одинаково выделять самые необходимые требования (согласно модели Кано это параметры с оценкой «требуемые»). При этом, если необходимо их численное обоснование, то необходимо использовать МАИ, а если требуется найти впечатляющую «изюминку», то модель Кано [121].

Таким образом, на примере процессов проектирования МКА продемонстрировано, что унифицированный алгоритм (основанные на нем алгоритмы) удовлетворяет предъявляемое к нему в ПВВ требование – унифицирует и обеспечивает получение, качественный и количественный анализ параметров ГП, ГЗ и ГИ разных аспектов проектирования и разработки.

5.3 Верификация и валидация конкретизированной модели «СФК» и электронных шаблонов модели «ДК»/«удК»

В разделе 5.3 рассматриваются ВиВ конкретизированной каскадной модели «СФК» и новых электронных шаблонов модели «ДК»/«удК». Для ВиВ, полученные с помощью

алгоритмов «уСФК для уДК № 0–4» входные и выходные данные разных аспектов проектирования МКА были структурированы в разработанных с помощью ПО MS Excel электронных шаблонах моделей «уДК» (см. приложение Г).

Модели «уДК» в соответствии с их назначением обеспечили приоритизацию параметров по алгоритмам «ДК» и «уДК», и визуализацию весов. Таким образом, было продемонстрировано, что требования из ПВВ по верификации модели «уСФК» и электронных шаблонов модели «уДК» выполняются – новые электронные шаблоны соответствуют унифицированному алгоритму «уСФК» и последовательно взаимосвязаны между собой.

Разработанные электронные шаблоны моделей «уДК», позволили (если сравнивать с подходом, когда они не используются) сократить трудозатраты на разработку моделей «ДК»/«уДК», «уДК» на каждом этапе модели «уСФК» минимум на 20% (экспертная оценка). Это повышает мотивацию использовать «уСФК» («СФК») и «уДК» («ДК»), эффективность ПО MS Excel, а значит влияет на повышение как самого качества проектирования систем, так и эффективности его управления с помощью ПС и информационных технологий, доступных широкой аудитории пользователей. Таким образом, подтверждено требование из ПВВ по валидации разработанных электронных шаблонов моделей «ДК»/«уДК».

5.4 Верификация и валидация алгоритма приоритизации «уДК»

В разделе 5.4 представлены ВиВ алгоритма «уДК» для приоритизации выходных параметров. Для их осуществления были выполнены следующие действия.

5.4.1 Анализ весов приоритизации функциональных требований к МКА, полученных по алгоритмам «ДК» и «уДК»

Сначала согласно алгоритму «уСФК для уДК № 0» были приоритизированы параметры ГЗ (требования заказчика) и перенесены в модель «уДК № 1». Затем к ГИ № 1 (функциональным подсистемам малоразмерного космического аппарата и их параметрам) применены попарные сравнения и ранжирование с помощью математического аппарата метода анализа иерархий. В результате были получены количественные экспертные оценки корреляций 7 подсистем и их 22 параметров (см. приложение Д). Затем, были подсчитаны веса приоритизации выходных параметров ГИ № 1 по классическому («ДК», формула 2.1) и новому («уДК», формула 2.5) алгоритмам. Результаты приоритизации представлены в таблице 5.3, а также в модели «уДК № 1» (см. рисунок Г.2).

Таблица 5.3 – Веса приоритизации параметров ГИ № 1 по алгоритмам «ДК» и «уДК»

Параметры ГИ № 1 – функциональные подсистемы малоразмерного космического аппарата и их параметры	Вес	Ранг		Вес
Алгоритм приоритизации:	«ДК»		«уДК»	
Подсистема № 1: Развертывание крупногабаритной светоотражающей конструкции (КСК)	18,25	II	I	29,27
Развернуть и сформировать каркас и солнечный отражатель в космосе в виде тетраэдра правильной формы без каких-либо деформаций частей малоразмерного космического аппарата	6,77	2	1	12,18
Крупногабаритная светоотражающая конструкция должна держать форму в условиях невесомости, закрутки и вращения	6,80	1	2	11,06
Должно происходить с минимальными энергозатратами	0,75	4	4	0,66
Использовать прочный, гибкий, легкий материал (чтобы каркас не порвался)	3,93	3	3	5,38
Подсистема № 2: Управление электронными подсистемами МКА	17,81	III	II	23,52
Гарантировать отсутствие ложных срабатываний подсистем МКА	7,13	2	1	10,81
Электроника должна выполнять свои функции после всех перегрузок, вибраций из-за вывода на орбиту и выпуска малоразмерного космического аппарата из транспортно-пускового контейнера	7,14	1	2	9,79
В случае критического воздействия гамма и рентгеновского излучения, тяжелых заряженных частиц – выполнить свои функции	2,79	3	3	2,05
Минимальное потребление электроэнергии	0,75	4	4	0,86
Подсистема № 3: Закручивание МКА	13,54	V	III	21,07
Малоразмерный космический аппарат должен закрутиться после того, как раскроется отражатель путем выпуска газа через сопла	6,77	1	1	15,80
Закрутить малоразмерный космический аппарат так плавно, чтобы солнечный отражатель не потерял форму	6,77	1	2	5,27
Подсистема № 4: Энергопитание подсистем МКА	15,71	IV	IV	15,61
Энергоносители должны обеспечить требуемую емкость аккумулятора	7,19	2	2	1,49
Такие энергоносители должны были летать в космос или прошли все необходимые тесты	8,51	1	1	14,12
ПдС № 5: Создание яркой видимой вспышки в ночном небе	22,49	I	V	7,18
КСК должна создавать яркую видимую вспышку (должен давать как можно более полное облучение видимой стороны Земли)	6,61	2	2	2,29
Крупногабаритная светоотражающая конструкция должна давать как можно полное облучение видимой стороны Земли	2,74	4	5	0,32

Продолжение таблицы 5.3

Параметры ГИ № 1 – функциональные подсистемы малоразмерного космического аппарата и их параметры	Вес	Ранг		Вес
Алгоритм приоритизации:	«ДК»		«удК»	
Крупногабаритная светоотражающая конструкция должна быть выполнена из дешевых и доступных материалов, проста в эксплуатации	3,66	3	3	1,27
Толщина светоотражающего материала КСК должна быть минимальная, чтобы упаковать в МКА	2,19	5	4	0,76
Светоотражающий материал КСК должен быть протестирован в космических условиях	7,30	1	1	2,53
Подсистема № 6: Обеспечение физической целостности изделия	7,57	VI	VI	2,29
Масса МКА не должна превышать заданное ограничение	0,38	3	2	0,12
Габариты, покрытие и прочие характеристики МКА должны соответствовать CubeSat Design Specification Rev 13	6,68	1	1	2,10
Материал и конструкция корпуса должен сохранить целостность всех подсистем МКА при действии статических и динамических нагрузок при выведении на околоземную орбиту	0,51	2	3	0,08
Подсистема № 7: Общие требования	4,62	VII	VII	1,06
МКА должен быть выведен на низкую околоземную орбиту	3,61	1	1	0,68
Должен быть обеспечен требуемый тепловой режим бортовой аппаратуры на всех этапах жизненного цикла МКА	1,02	2	2	0,38

Анализ указанных в таблице 5.3 весов приоритизации параметров показал, что:

1) в случае 5 из 7 подсистем новый алгоритм «удК» позволил получить порядок ранжирования выходных параметров, отличающийся от результатов, полученных по классическому алгоритму «ДК» (а также поменялся ранг важности 4 из 7 подсистем);

2) значения весов 11 из 22 параметров, полученных по классическому алгоритму «ДК», находятся в близком друг к другу диапазоне значений, которые варьируются от 6,61 до 8,51. Такое количество параметров, чьи результаты лежат в диапазоне равном 1,9 не позволяет с уверенностью выделить среди них критически важные параметры (требования);

3) веса, полученные по «удК», в пределах такого же диапазона значений (1,9), относятся только к 2 параметрам (если анализировать от параметра с максимальным весом).

Эти результаты означают, что предложенный в данном исследовании алгоритм «удК» позволяет обеспечить порядок (ранг) приоритизации выходных параметров, отличающийся от классического алгоритма «ДК», а также с большей точностью и согласованностью выделять на уровне всей системы как самый важный параметр, так и критически важные параметры.

5.4.2 Анализ весов приоритизации параметров подсистем МКА

Сделанный в пункте 5.4.1 вывод также распространяется и на параметры в рамках подсистем космического аппарата. В таблице 5.4, на примере двух функциональных подсистем «Энергопитание подсистем МКА» и «Создание яркой видимой вспышки в ночном небе» проанализированы результаты приоритизации параметров ГИ № 1 по алгоритмам «ДК» и «уДК». Анализ проводился с точки зрения того как в рамках каждой подсистемы ее параметр с наибольшим значением веса приоритизации соотносится с весами других параметров.

Таблица 5.4 – Результаты приоритизации параметров ГИ № 1 по алгоритмам «ДК» и «уДК»

Алгоритм приоритизации:	«ДК»		«уДК»	
	Весы*	Соотношения весов**	Весы*	Соотношения весов**
Параметры ГИ № 1				
Подсистема № 4: Энергопитание подсистем МКА				
Энергоносители должны обеспечить требуемую емкость аккумулятора	7,19	1,18	1,49	9,47
Такие энергоносители должны были летать в космос или прошли все необходимые тесты	8,51	1	14,12	1
Подсистема № 5: Создание яркой видимой вспышки в ночном небе				
КСК должна создавать яркую видимую вспышку (должен давать как можно более полное облучение видимой стороны Земли)	6,61	1,10	2,29	1,10
КСК должна давать как можно более полное облучение видимой стороны Земли	2,74	2,66	0,32	7,18
КСК должна быть выполнена из дешевых и доступных материалов, проста в эксплуатации	3,66	1,99	1,27	1,99
Толщина светоотражающего материала КСК должна быть минимальная	2,19	3,33	0,76	3,32
Светоотражающий материал КСК должен быть протестирован в космических условиях	7,30	1	2,53	1
<p>* Чем меньше вес выбранного параметра, тем он менее значим.</p> <p>** Находится путем деления значения параметра в рамках подсистемы с наибольшей оценкой на все остальные веса в рамках той же самой подсистемы.</p>				

Анализ показал, что в рамках подсистемы «Энергопитание подсистем МКА» соотношение весов приоритизации ее параметров, полученных по классическому алгоритму «ДК» составляет 1,18. В отношении алгоритма «уДК», соотношение составляет 9,47. В рамках подсистемы

«Создание яркой видимой вспышки в ночном небе» наибольшее значение соотношения весов полученных по алгоритму «ДК» составляет 3,33, а по алгоритму «уДК» составляет 7,18. Это показывает, что новый алгоритм «уДК» повышает контрастность весов приоритизации выходных параметров в два и более раз [121], что позволяет однозначно, в отличие от классического алгоритма «ДК» идентифицировать критически важные параметры.

Эти выводы были также подтверждены результатами использования алгоритма «уДК» в проектировании информационной системы для поддержки реализации этапов ЖЦ разработки СА [54]. Таким образом, предъявляемое к алгоритму «уДК» требование – выполнено.

5.4.3 Дополнительная валидация алгоритма «уДК»

Также был проведен сравнительный анализ полученных результатов приоритизации подсистем малоразмерного космического аппарата с реальным ходом их разработки и синтеза. В таблице 5.5 представлены веса приоритизации подсистем по алгоритмам «ДК» и «уДК» с указанием их ранга: чем меньше значение ранга, тем подсистема более значима.

Таблица 5.5 – Сравнение приоритизации ПдС по алгоритму «ДК» и «уДК»

Алгоритм приоритизации:	«ДК»		«уДК»	
	Ранг	Вес	Ранг	Вес
Развертывание КСК	2	18,25	1	29,27
Управление	3	17,81	2	23,52
Закручивание	5	13,54	3	21,07
Энергопитание	4	15,71	4	15,61
Создание вспышки в ночном небе	1	22,49	5	7,18
Обеспечение целостности	6	7,57	6	2,29
Общие требования	7	4,62	7	1,06

Из таблицы 5.5 видно, что по алгоритму «ДК» самой важной функциональной подсистемой является та, которая отвечает за «Создание яркой видимой вспышки в ночном небе». Инспекция показала, что ресурсы разработчиков были максимально сосредоточены на реализации этого направления с помощью физической подсистемы «Солнечный отражатель». Предполагалось, что «Солнечный отражатель» надуется, тем самым, потребность в отдельной физической подсистеме для развертывания крупногабаритной светоотражающей конструкции отпадала. В результате более года работы над проектом инженеры пришли к тому, что созданный солнечный отражатель по разным причинам не держал требуемую форму и приоритет усилий был изначально расставлен неверно.

В отличие от алгоритма «ДК», алгоритм «уДК» показал, что МКА принципиально зависит от реализации самостоятельной физической подсистемы отвечающей за реализацию функции «развертывания КСК». Дальнейшая физическая разработка МКА подтвердила, что классический алгоритм «ДК» приоритизировал неправильно, а новый алгоритм «уДК» приоритизировал правильно важнейшие параметры ГИ № 1 [121]. Таким образом, была продемонстрирована целесообразность использования алгоритма «уДК» при проектировании технических объектов и для управления качеством проектных работ (требований).

5.5 Верификация и валидация способа автоматизации разработки SysML-диаграмм требований и обновления в них информации

В разделе 5.5 рассматриваются верификация и валидация способа автоматизации разработки SysML-диаграмм требований и обновления в них информации. Для этого структурированные параметры ГП, ГЗ и ГИ в моделях «уДК» были промоделированы с помощью способа автоматизации разработки SysML-диаграмм требований (результат главы 3). Для этого были разработаны структуры баз данных потребностей пользователей (см. рисунок 5.2), требований заказчика, инженерных требований (см. рисунок 5.3), требований нормативно-технической документации к этапу ЖЦИ «Эскизный проект».

ид	Потребности	Кано	МАИ	Текст=	уДК
Т.зак.1	Видимость с Земли	T	44,61	Спутник должен быть виден с Земли как самая яркая звезда на ночном небе (с звездной величиной в вспышке - 8 m)	75,4
Т.зак.2	Стоимость летного образца	T	28,17	Изготовление летного экземпляра КА, не должно превышать 700 тыс. руб.	13,8

Рисунок 5.2 – Сокращенный пример структуры БД с качественно и количественно проранжированными и приоритизированными параметрами ГЗ к МКА

В соответствии со структурами БД были созданы шаблоны SysML-фигур, отражающие потребности (см. рисунок 5.4), требования заказчика (см. рисунок 5.5), функциональные требования (см. рисунки 5.6, 5.7) и требования к АЧ/ПЧ (см. рисунки 5.8, 5.9), требования нормативно-технической документации к отчетной документации (см. рисунок 5.10).

П р и м е ч а н и е – Рисунки с примерами БД представлены именно в том виде, как они есть. Дефисы в словах (используемые в данном случае для переноса частей слов) там, где их по правилам русского языка не должно быть – не являются ошибками. Эти слова автоматически перенесены из модели «уДК», в которой ширина ячеек меньше, чем в ячейках БД.

Ид	Наименование	Вес МАИ	Вес уДК	Характеристики
ГИ 1 пс.1 (функц)	Развертывание крупногабаритной светоотражающей конструкции (КСК)	31,01	29,27	
ГИ ф.п.1.1	Развернуть и сформировать каркас и солнечный отражатель в космосе в виде тетраэдра правильной формы без каких-либо деформаций частей МКА	0,32	12,18	Каждая грань по 3 м.
ГИ 1 пс.2	Управление электронными подсистемами МКА	26,13	23,52	
ГИ ф.п.2.1	Гарантировать отсутствие ложных срабатываний функциональных подсистем МКА	0,32	10,81	Дублирование подсистемы
ГИ 1 пс.3	Закручивание МКА	17,03	21,07	
ГИ ф.п.3.1	МКА должен закрутиться после того как раскроется отражатель путем выпуска газа через сопла	0,75	15,80	Реактивная закрутка
ГИ 1 пс.4	Энергопитание подсистем МКА	10,21	15,61	

Рисунок 5.3 – Сокращенный пример структуры базы данных с количественно проранжированными и приоритизированными функциями МКА

ид	<<Потребность>>	П.1.1
Доступность МКА		
МАИ: 0,20	Кано: Т	
Доказать что спутники могут создавать и запускать не только крупные компании, но и небольшие группы энтузиастов.		

Рисунок 5.4 – Пример SysML-фигуры, отражающая потребность пользователя

ид	<<Требование>>	Т.зак.1
Видимость с Земли		
МАИ: 44,61	уДК 75,40	Кано: Т
Спутник должен быть виден с Земли как самая яркая звезда на ночном небе (с звездной величиной в вспышке - 8 m)		

Рисунок 5.5 – Пример SysML-фигуры, отражающая требование заказчика

Ид	ГИ 1 пс.4 (функц)	<<блок>>
Энергопитание подсистем МКА		
Вес уДК	15,61	Вес МАИ 10,21

Рисунок 5.6 – Пример SysML-фигуры, отражающая одну из групп функциональных требований проектируемого технического объекта

Ид	<<блок>>	ГИ ф.п.4.2
Такие энергоносители должны были летать в космос или прошли все необходимые тесты		
Вес уДК	14,12	Вес МАИ 0,89
Характеристики: УТГ 7-9, химические источники тока		

Рисунок 5.7 – Пример SysML-фигуры, отражающая отдельную функцию и требования к ней (в рамках заданной группы функциональных требований)

Ид ГИ 2 пс.4 (физ) <<блок>>	
Подсистема электропитания x 2 (два дублирующих комплекта)	
Вес удК	21,96
Характеристики: Напряжение 22В, рабочий ток 20А, пиковый ток 40А, Емкость 216 Вт*ч	

Рисунок 5.8 – Пример SysML-фигуры, отражающая отдельную группу требований аппаратной части изделия

Ид ГИ 2 4.2 <<блок>>			
Химические источ-ники тока. Акку-муляторы x 24			
Вес МАИ	0,59	Вес удК	8,78
Характеристики: NCR18650 В, < 28В x 10А			
Ответственный:		Panasonic	
Поставщик:		ООО "Суперфонарик"	

Рисунок 5.9 – Пример SysML-фигуры, отражающая отдельное требование в рамках, группы требований к АЧ изделия

Ид	<<Требование>>	Тр.д.1
ТЗ на СЧ ОКР (ЭП)		
-СрИсп:	08.08.2020	
-указНТД1:	ГОСТ 2.119 п 4.1 стр. 2	
-реглНТД1:	ГОСТ Р 15.301-2016	
-реглНТД2:	ГОСТ 15.016-2016	
-Ш:	ТЗ_на_СЧ_ЭП	
-У:	Заказчик, ГИ ЭП - 1, 2 и 3	
-Р:	ТЗ_на_СЧ_ЭП	

Рисунок 5.10 – Пример SysML-фигуры, отражающая требование НТД

Примеры SysML-диаграмм требований, представлены в приложении Е.

В рамках разработки SysML-диаграмм требований НТД к отчетной документации этапов ЖЦ проектирования и разработки спутниковой аппаратуры, был проведен тестовый анализ затрат времени на выполнение некоторых часто встречающихся операций при разработке SysML-диаграмм требований классическим и автоматизированным способами (см. таблицу 5.6). Таблица 5.6 – Сравнение затрат времени на операции по разработке SysML-диаграмм требований с помощью традиционного и созданного автоматизированного способов

Операции по разработке SysML-диаграмм требований	Способ	
	Традиционный	Автоматизированный
Создание и заполнение данными 300* новых SysML-фигур требований	От нескольких дней до нескольких недель	От нескольких минут до нескольких часов
Массовое и точное обновление информации в 300 SysML-фигурах требований (изменение формулировок)	От нескольких часов и более, в связи с возможными ошибками и как следствие итерациями	От секунд до нескольких минут, как правило, без ошибок и итераций

* Возможное количество требований НТД для реализации проектирования спутниковой аппаратуры (СА) на этапе ЖЦ «Эскизный проект».

Таким образом, на примере проектирования технического объекта (космического аппарата), было продемонстрировано, что пользователи могут, на основе источников содержащих текст, формировать за короткий промежуток времени SysML-диаграммы требований. Тем самым было показано, что предложенный способ (его алгоритмы) работоспособен, позволяет совершенствовать процессы проектирования изделий с помощью современных инструментов моделирования МОСИ (SysML), и удовлетворяет предъявляемое к нему требование из плана верификации и валидации – позволяет кардинально снизить затраты времени на разработку SysML-диаграмм требований.

Если сравнивать предлагаемый способ, конкретизированный под реализацию в доступных широкой аудитории пользователей MS Visio и Excel с предложениями от Siemens PLM, Dassault Systems, IBM, то он позволяет сокращать в два, три раза финансовые затраты на внедрение программных средств для использования и обучения SysML (МОСИ) [54].

Таким образом, полученная разработка способствует переходу на безбумажные сетевые формы документооборота, к созданию интегрированных (общих) моделей систем, сокращению трудозатрат и затрат финансовых ресурсов на проектирование технических объектов с помощью методического инструментария модельного-ориентированного системного инжиниринга [54]. Созданный способ повышает как эффективность функционирования, так и целесообразность использования программных средств MS Visio и Excel.

На основе этих результатов разработаны учебно-методические материалы, которые были использованы в учебном процессе двух кафедр МФТИ (НИУ) для обучения проектированию в парадигме модельно-ориентированного системного инжиниринга спутниковой аппаратуры [55] и иных технических объектов.

5.5.1 Валидация разработанных SysML-моделей требований

Была проведена валидация разработанных SysML-моделей требований нормативно-технической документации к отчетной документации. Валидация проводилась при проведении экспертизы документации нескольких ОКР на этапе ЖЦ «Эскизный проект», связанных с разработкой спутниковой аппаратуры (в рамках одной из них была составная часть ОКР «ВРЛ-РБ»), на соответствие полученных и оформленных результатов этапа ЖЦ требованиям нормативно-технической документации (пример на рисунке Е.4). В результате экспертиза, благодаря использованию разработанной SysML-модели требований НТД к этапу «Эскизный проект», была выполнена неавтоматизировано за 2 часа вместо нескольких дней, а также было идентифицировано от 5 до более 10 несоответствий результатов ОКР требованиям НТД. Разработка таких моделей соответствует развитию информационного обеспечения CALS.

Если учесть, что срыв срока сдачи проекта заказчику, из-за несоответствия проекта требованиям, как правило стоит разработчику больших штрафных санкций, которые могут исчисляться миллионами рублей, то использование разработанного способа автоматизации разработки SysML-диаграмм требований становится еще в большей степени актуальным и целесообразным. Полученные результаты также, позволяют сокращать трудозатраты на планирование этапов жизненного цикла новых изделий-аналогов примерно на 60% и на реализацию этапов ЖЦ (проектов) на 5–10%. Следовательно, предложенный способ (ИТ) разработки SysML-моделей и обновления в них информации, в случае реализации, совершенствует процессы проектирования технических объектов, влияет на унификацию проектных работ (повышает их качество), а также на сокращение сроков создания новой техники.

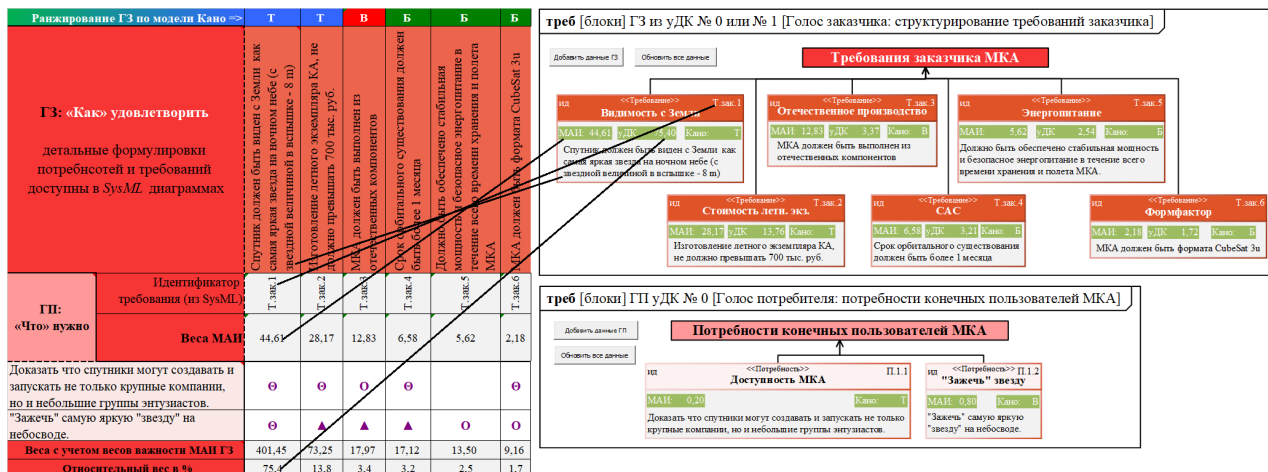
Таким образом, были продемонстрированы и выявлены дополнительные мотивационные факторы разработки и использования SysML-диаграмм.

5.6 Верификация и валидация основных решений и разработок диссертационной работы как единый методический инструментарий

В разделе 5.6 рассматриваются ВиВ объединения всех основных решений и разработок диссертационного исследования в единый методический инструментарий и его способности преодолевать недостатки SysML и «ДК», указанные в плане верификации и валидации. Для этого, с учетом того, что инструменты SysML и «СФК» («ДК») принадлежат к модельно-ориентированному системному инжинирингу, первая задача ВиВ была направлена на подтверждение того, что решения и разработки могут быть объединены в единый методический инструментарий. Вторая задача была основана на выводе Дж. Коски, сделанный им после анализа множества модификаций «СФК» и «ДК». В выводе утверждается, что матрицы и таблицы «ДК» передают информацию менее эффективно чем диаграммы языка UML [122]. С учетом этого было предположено, что совместное использование SysML-диаграмм требований компенсирует указанный ниже недостаток модели «ДК», и наоборот, модели «ДК» компенсируют указанный ниже недостаток, связанный с SysML-диаграммами.

1. SysML-диаграммы требований не позволяют системно отследить все взаимосвязи требований «в» и «между» разными аспектами проектирования.
2. Человек может эффективно воспринимать, анализировать и управлять в модели «ДК» не более 20–25 параметрами.

Для этого, проведен эксперимент по объединению моделей «уДК» с соответствующими им SysML-диаграммами требований в единый методический инструментарий и единое рабочее пространство на базе ПО MS Excel (см. рисунок 5.11).



Часть модели «УДК № 0»

SysML-диаграммы

Рисунок 5.11 – Пример синтеза модели «УДК № 0» с SysML-диаграммами требований (потребности пользователей и требования заказчика МКА) в единый инструмент модельно-ориентированного системного инжиниринга и единое рабочее пространство на базе MS Excel

Такое опытное объединение позволило преодолеть указанные выше недостатки и продемонстрировало эффективность:

- коммуникации данных модели «ДК»/«УДК» с помощью SysML-диаграмм;
- отслеживания всех взаимосвязей требований с помощью моделей «ДК».

Демонстрация синтеза всех разработок и решений диссертационного исследования в единый методический инструмент модельно-ориентированного системного инжиниринга, реализованного с помощью программных средств вычислительной техники MS Excel и Visio (Professional), доступных широкой аудитории пользователей, подтвердила выполнение предъявляемых к методическому инструментарию требований, указанных в плане верификации и валидации. Также синтез продемонстрировал целесообразность использования предложенного методического инструментария МОСИ, в том числе при проектировании интегрированных интерактивных комплексов анализа и синтеза проектных решений, а также систем создания проектной, конструкторской, технологической и иной документации на изготовление, испытание и эксплуатацию сложных технических объектов широкого класса для реализации совершенно новых средств взаимодействия проектировщик – система.

5.7 Дополнительные верификация и валидация результатов исследования на примере реализации концепции интегрированной модели системы

В разделе 5.7 рассматривается верификация и валидация разработанного методического инструментария модельно-ориентированного системного инжиниринга для демонстрации его

применимости в рамках частичной реализации концепции интегрированной модели системы [65]. Для этого была поставлена задача по разработке информационно-справочной системы – «единого источника правды» о всех требованиях нормативно-технической документации к этапам жизненного цикла проектирования и разработки спутниковой аппаратуры [150], который сокращает трудозатраты и повышает точность:

- определения «Что» и «Как» должно быть выполнено на каждом этапе;
- верификации результатов проектных работ требованиям НТД.

Демонстрация решения данной задачи с помощью разработанного методического инструментария МОСИ представлена ниже в виде алгоритма действий.

5.7.1 Алгоритм разработки информационно-справочной системы в парадигме МОСИ

1. Составить перечень всех используемых НТД, в которых *указано какие* требуется выполнить документы на этапе ЖЦИ и *регламентировано как* они должны быть выполнены.

2. Создать в книге MS Excel структуру базы данных и заполнить ее сведениями о всех требованиях к отчетным документам (пример представлен на рисунке 5.12).

ИД	Наименование	-СрИсп:	-указНТД1:	-реглНТД2:	-Ш:	-У:	-Р:
Тр.д_1	ТЗ на СЧ ОКР (ЭП)	08.08.2020	ГОСТ 2.119 п 4.1 стр. 2	ГОСТ 15.016-2016	ТЗ_на_СЧ_Э	Заказчик, ГИ	ТЗ_на_СЧ_Э
Тр.д_2	Сетевой план график реализации ЭП	08.08.2021			СПГ-на-ЭП	ГИ - 1, 2 и 3	СПГ-на-СЧ

Рисунок 5.12 – Пример структуры БД требований в MS Excel, для последующей автоматизации заполнения и обновления данных в SysML-фигурах требований

- Где ИД – идентификатор – уникальный порядковый номер требования;
- Наименование – название отчетного документа (требования);
- СрИсп – срок исполнения – может быть заменен на дату начала и окончания;
- указНТД1 – указывающая НТД, в которой содержатся требования о том «Что» (какой проектный, конструкторский, технологический или иной тип документа (часть документа));
- реглНТД1 – регламентирующая НТД, в которой содержатся требования о том «Как» должно быть разработано «Что» (документы);
- Ш – шаблоны для быстрого и правильного оформления документов (титульные листы, формы, таблицы и т.д.);
- У – участники и их роли в разработке документа (требования);
- Р – результаты разработки – итоговые документы.

3. Определить порядок реализации этапа жизненного цикла изделия в соответствии с требованиями нормативно-технической документации и промоделировать его с помощью SysML. Для этого необходимо создать SysML-диаграмму, а затем указать на ней подэтапы и выполняемые на них верхне-уровневые требования (документы) (пример на рисунке 5.13).



Рисунок 5.13 – Пример оформления первой SysML-диаграммы SysML-модели требований, отражающая жизненный цикл этапа проектирования спутниковой аппаратуры «Эскизный Проект»: состав подэтапов и верхнеуровневые требования (документы)

4. Создать в MS Visio типовой шаблон SysML-фигуры требования, соответствующий структуре базы данных из п. 2 (пример такого шаблона показан ранее на рисунке 5.10).

5. Создать в MS Visio библиотеку с SysML-фигурами требований, соответствующими содержанию базы данных из п. 2 (см. рисунок 5.14).

6. Автоматизировано разместить и вручную распределить по холсту все требования из подключенной базы данных с помощью SysML-фигур из созданной библиотеки в соответствии с требованиями нормативно-технической документации (см. рисунок 5.15 и рисунок Е.5, на рисунках также демонстрируется ранжирование требований по МАИ).

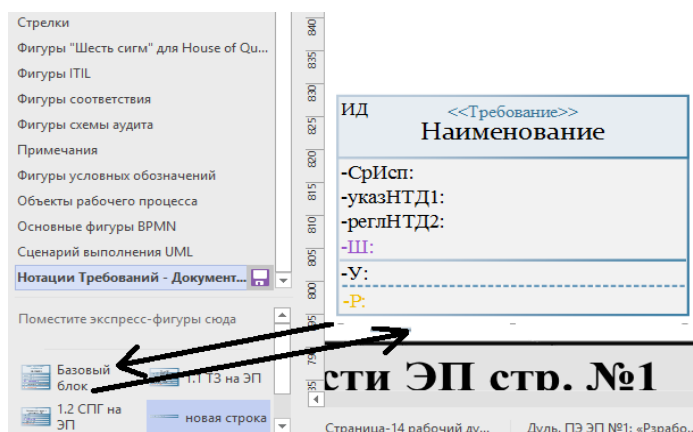


Рисунок 5.14 – Пример управления библиотекой SysML-фигур в MS Visio

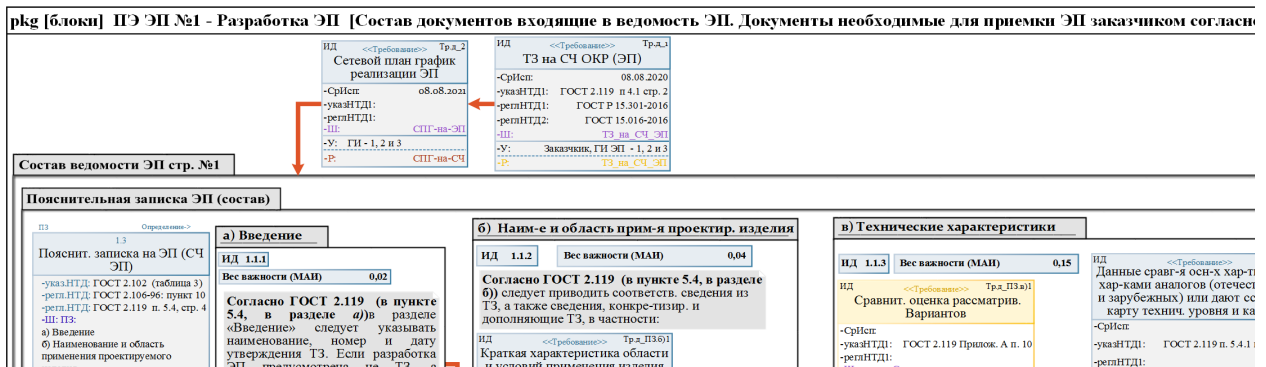


Рисунок 5.15 – Пример части SysML-диаграммы, отражающей требования к составу и качеству документации, которая должна быть отражена в документе «Ведомость» этапа «Эскизный проект» согласно ГОСТ 2.119-2013

7. Присвоить атрибутам «указНТД1» и «реглНТД1» гиперссылки на указанные в документах требования (пример представлен на рисунке 5.16).

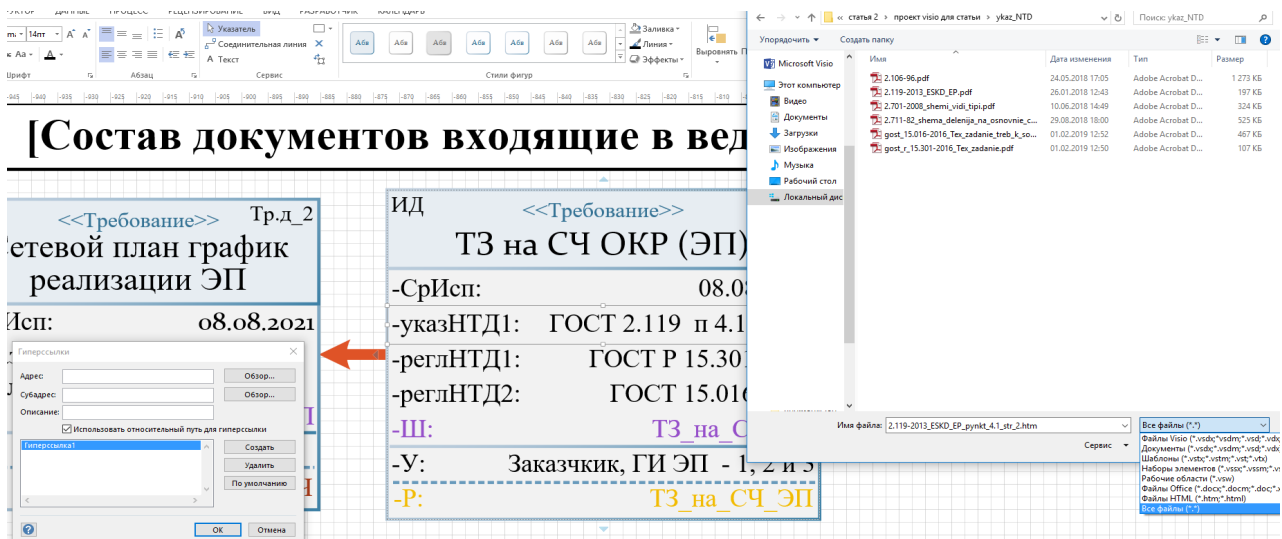


Рисунок 5.16 – Присвоение гиперссылок атрибутам SysML-фигуры требований

Примечание – Большинство документов, используемых в работе, после их официального выпуска, находятся в PDF формате. Простое присвоение гиперссылки на указанный документ не позволяет открыть его на определенной странице где указано необходимое требование. Для того, чтобы пользователь мог открыть pdf-документ на заданной странице, был разработан и запрограммирован способ автоматизированного создания файлов-ярлыков формата html. После того как в качестве адреса гиперссылки выбирается такой файл, пользователь, нажав на атрибут, откроет в web-браузере pdf-документ на заданной странице. Программа зарегистрирована в Роспатенте – получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020666348 (см. Приложение Ж).

5.7.2 Преимущества разработанной информационной системы

Настроив в каждой SysML-фигуре гиперссылки даже только на эти два атрибута («указНТД1» и «реглНТД1»), уже становится возможным создать полезную и актуальную информационную систему, основанную на полученном современном методическом инструментарии модельно-ориентированного системного инжиниринга («уДК», SysML). Основная ее польза заключается в том, что сокращаются сроки создания новых аппаратно-программных объектов, за счет детального моделирования (проектирования) требований и минимизации рисков несоответствия результатов проектных работ этим требованиям. Это достигается благодаря тому, что такая информационная система обеспечивает:

- 1) повышение скорости и качества выполнения проектных работ и разработки проектной, конструкторской, технологической или иной документации на изготовление, испытания и эксплуатацию сложных технических объектов;
- 2) унификацию понимания: «Что», «Как», «Кто» и «Когда» делает;
- 3) моментальный доступ к необходимой информации: нормативно-техническим документам, шаблонам отчетных документов, результатам работ и иным данным;
- 4) уменьшение трудозатрат на планирование проектных работ этапов жизненного цикла изделия, а также на верификацию и валидацию отчетных документов;
- 5) повышение эффективности информационного мониторинга состояния выполнения работ и документов;
- 6) улучшение информационного взаимодействия между сотрудниками.

Преимущества использования представленного алгоритма для разработки информационного и программного видов обеспечения CALS, для построения средств автоматизации документирования, безбумажного документооборота, процессов работы электронных архивов технической документации на этапах ЖЦ технических объектов (к примеру, спутниковой аппаратуры) заключаются в том, что он: 1) основан на языке SysML (МОСИ); 2) легко воспроизводим с помощью минимальных или вовсе без финансовых затрат на программные средства для использования языка SysML; 3) результаты его применения актуальны для широкой аудитории потенциальных пользователей.

5.8 Перспективы развития результатов диссертационного исследования

Продемонстрированная в разделе 5.7.1 (включая результаты разделов 5.3, 5.5, 5.6) информационная технология, быстро реализуется с помощью программных средств вычислительной техники, доступных широкой аудитории пользователей. Ее воспроизводство и

практическое использование способствует формированию положительного общественного мнения о значимости перехода на безбумажные сетевые формы документооборота. Реализация с помощью предложенной ИТ концепции ИМС в части моделирования требований демонстрирует целесообразность применения современных инструментов (методов и языков моделирования) модельно-ориентированного системного инжиниринга в системах управления качеством проектных работ (документации) для повышения эффективности таких систем. Также она является простым демонстратором целесообразности и основой для изучения и разработки программно-методического обеспечения для интеграции на основе инструментария МОСИ и видов обеспечения CALS целевых САПР и иных программных средств, изначально используемых локально для реализации разных аспектов проектирования, в единую автоматизированную проектно-производственную среду. Такая интегрированная многопользовательская интерактивная среда, путем внесения изменений в SysML-модели (выполненных, к примеру, на языке SysML) должна обеспечивать автоматизированное внесение изменений в созданные в целевых САПР объекты (функциональные, конструкторские проработки); анализ и учет изменений как в САПР, так и в синхронизированных с ними SysML-моделях; удаленный запуск, к примеру, имитационного моделирования в САПР; генерирование договорной, проектной, конструкторской, технологической и иной документации. Создание таких новых средств взаимодействия проектировщика с системой (по сути, с ее цифровым двойником) будет способствовать выполнению всех предъявляемых к ней (к проекту) требований; сдачи проекта заказчику точно в срок без выявления ошибок; производства системы и ее СЧ с первого раза. Такие преимущества обеспечат сокращение сроков создания образцов новой техники и минимизацию финансовых затрат из-за минимума или вовсе отсутствия итераций на исправление ошибок.

Предложенный в разделе 5.7.1 алгоритм частичной реализации концепции интегрированной (общей) модели системы демонстрирует ее реализацию с точки зрения моделирования требований.

Успешная верификация и валидация разработанного методического инструментария МОСИ (см. подраздел 5.5.1) показали актуальность его использования при проектировании систем и при реализации ИМС даже в частичном виде. Это обуславливает проведение дальнейшей разработки научных основ (в том числе в области унификации протоколов передачи данных) построения ПМО для реализации автоматизированной проектно-производственной среды (указанной в предыдущем абзаце) на основе полнофункциональной ИМС (описывающей систему с разных на нее воззрений: требований, поведения, АЧ/ПЧ архитектур) и соответствующих видов обеспечения CALS.

5.9 Выводы

В главе 5, в соответствии с планом рассмотрена верификация и валидация решений и разработок диссертационного исследования. В рамках этого были:

1. Проведена верификация и валидация унифицированного алгоритма генерирования входных и выходных данных этапов конкретизированной модели «СФК» («уСФК»). На примере параметров разных аспектов проектирования малоразмерного космического аппарата, продемонстрировано, что основанные на унифицированном алгоритме «уСФК для уДК» алгоритмы позволяют единообразно получать, моделировать, качественно и количественно анализировать потребности пользователей и требования заказчика, инженеров, нормативно-технической документации к этапам жизненного цикла технических объектов.

2. Реализована верификация конкретизированной каскадной модели «СФК», а также верификация и валидация электронных шаблонов моделей «уДК». Разработанные шаблоны моделей «уДК № 0–4» были взаимосвязаны и использованы для структурирования данных этапов модели «уСФК»: параметров ГП, ГЗ, ГИ № 1–4 (требований к МКА).

3. Реализована верификация и валидация нового алгоритма «уДК» для приоритизации выходных параметров в модели «уДК». Для верификации был проведен сравнительный анализ весов требований к малоразмерному космическому аппарату, полученных по алгоритмам «ДК» и «уДК». Новый алгоритм, в отличие от классического, позволяет получить иной ранг весов и более высокий их контраст. Валидация полученных по алгоритму «уДК» весов инженерных требований была выполнена с помощью инспекции разработки космического аппарата. Новый алгоритм «уДК», по сравнению с алгоритмом «ДК», правильно приоритизирует важность требований. Полученные результаты ВиВ были также проверены и подтверждены в ходе проектирования и реализации информационной системы. Таким образом было показано, что алгоритм «уДК» содержит в себе научно-техническую и экономическую целесообразность использования при разработке технических объектов.

4. Реализована верификация и валидация способа автоматизации разработки SysML-диаграмм требований и обновления в них информации. Для верификации способа, используя его алгоритмы (см. подразделы 3.2.1–3.2.4), сначала были разработаны базы данных, содержащие потребности пользователей, требования заказчика и инженерные требования к МКА, а также требования нормативно-технических документов к реализации этапа ЖЦ. Затем, на этой основе были автоматизировано разработаны SysML-фигуры и структурированы SysML-диаграммы требований. Это показало реализуемость способа.

В ходе валидации, способ обеспечил построение в MS Visio 300 SysML-фигур требований, заполненных информацией, менее чем за 60 мин.

Результаты ВиВ способа показывают, что он обеспечивает для широкой аудитории пользователей возможность совершенствования процессов проектирования технических объектов с помощью современных языков и методов моделирования парадигмы МОСИ. Также он повышает эффективность функционирования ПС вычислительной техники MS Visio и Excel, что обеспечивает минимизацию финансовых затрат на внедрение, обучение персонала и эксплуатацию ПО для использования языка SysML.

5. Валидация разработанной SysML-модели требований НТД к отчетной документации этапа ЖЦ «Эскизный проект» в рамках нескольких ОКР, связанных с разработкой спутниковой аппаратуры показала, что их использование: 1) сокращает время экспертизы документации с нескольких дней до нескольких часов; 2) повышает соответствие документации требованиям НТД на 5–10%. Также их использование сокращает: 1) сроки планирования этапов ЖЦ изделий-аналогов примерно на 60%; 2) срок реализации этапов ЖЦ проектирования и разработки образцов новой спутниковой аппаратуры (техники) на 5–10%.

6. Итоговая верификация и валидация всех решений и разработок диссертационной работы реализована в ходе их синтеза в единый методический инструментарий. Для этого на базе MS Excel было осуществлено объединение разработанных моделей «уДК» с соответствующими им SysML-диаграммами требований. Успешный синтез, с одной стороны, подтвердил эффективность коммуникации параметров каждой модели «уДК» (этапа модели «уСФК») с помощью SysML-диаграмм, а с другой, подтвердил эффективность отслеживания всех взаимосвязей входных и выходных параметров с помощью моделей «уДК». Это подтвердило целесообразность использования, нового методического инструментария МОСИ при проектировании и разработке сложных технических объектов (спутниковой аппаратуры).

7. Проведены действия по ВиВ результатов диссертационного исследования в рамках их использования для реализации концепции интегрированной модели системы. В результате был разработан и реализован алгоритм, обеспечивший создание информационной системы автоматизации процессов проектирования, связанных с созданием и управлением проектной, конструкторской, технологической и иной документацией. Разработанная ИС демонстрируют целесообразность использования результатов, как для доступного и быстрого внедрения современного методического инструментария МОСИ в проектную деятельность различных отраслей, так и для изучения и построения принципиально новых ПС взаимодействия проектировщик – система (цифровой двойник), интегрирования программ и САПР в единую систему автоматизации различных аспектов проектирования, управления и документирования.

Вышеперечисленное показывает, что полученные результаты развивают теорию САПР в области лингвистическое и методическое обеспечения CALS, и являются научными основами для развития и разработки информационного и программного обеспечения CALS.

Заключение

Основные результаты диссертационного исследования

1. Разработан методический инструментарий проектирования технических объектов широкого класса в новой парадигме модельно-ориентированного системного инжиниринга с помощью таких его модернизированных и конкретизированных инструментов, как объектно-ориентированный язык моделирования SysML, методика «Структурирование функции качества» – для согласованного перехода между этапами жизненного цикла изделия (асpekтами проектирования), метод «Дом качества» – для приоритизации выходных параметров этапов ЖЦ изделия (асpekтов проектирования и разработки). Методический инструментарий позволяет сокращать сроки реализации этапов ЖЦ проектирования на 5–10% и реализован с помощью программных средств, доступных широкой аудитории пользователей.

2. Выполнены верификация и валидация результатов диссертационного исследования на примерах проектирования малоразмерного космического аппарата, информационной системы, в ОКР и в рамках учебного процесса МФТИ. Продемонстрирована целесообразность их использования при проектировании широкого класса технических объектов в парадигме модельно-ориентированного СИ, как в космической, так и в других отраслях народного хозяйства.

3. Синтезирован алгоритм согласованной приоритизации выходных параметров этапов ЖЦ изделия в модели «Дом качества» за счет учета количественных экспертных оценок корреляций параметров, получаемых с помощью математического аппарата метода анализа иерархий. Разработанный алгоритм «усовершенствованный Дом качества», по сравнению с классическим алгоритмом «Дом качества», обеспечивает иной ранг весов приоритизации и более высокий их контраст между собой (в два и более раз).

4. Создан способ автоматизации разработки SysML-диаграмм требований и обновления в них информации. Способ снижает трудозатраты на указанные процессы проектирования с нескольких дней до нескольких часов/минут. Способ позволяет сокращать затраты ресурсов на ПО для использования современного языка SysML для представления и обмена информацией об изделиях и процессах на этапах ЖЦ изделия более чем в 5 раз (если сравнивать с программами от IBM, Siemens PLM, Dassault Systems). Способ обеспечивает массовое использование языка

SysML для создания и развития методического, информационного и программного обеспечения CALS: методик, баз данных, интегрированных комплексов управления ЖЦ изделия.

5. Разработан и реализован алгоритм создания информационной системы по управлению проектными работами/требованиями с использованием предложенных в работе инструментов модельно-ориентированного системного инжиниринга (SysML). Система обеспечивает сокращение трудозатрат на определение «Что» и «Как» должно быть выполнено на этапах ЖЦ с нескольких дней до нескольких часов и повышение точности экспертизы итоговых результатов этапов ЖЦ на 5–10%. Система является основой для разработки интегрированного комплекса по управлению ЖЦ проектов.

6. Конкретизирована модель под названием «Структурирование функции качества», отражающая этапы ЖЦ технических объектов. Модель позволяет согласованно реализовывать проектирование (к примеру, спутниковой аппаратуры) в соответствии с потребностями пользователей, языком (методом) моделирования SysML (требованиями к функционалу, архитектурам программной и аппаратной частей изделия) и требованиями нормативно-технической документации к порядку реализации и составу отчетной документации.

7. Разработан комплекс алгоритмов, которые позволяют единообразно получать, обрабатывать, качественно и количественно анализировать (ранжировать, приоритизировать), моделировать с помощью методов, языков моделирования «усовершенствованный Дом качества» и SysML потребности пользователей, требования заказчика, требования к функционалу, к программной и аппаратной частям технического объекта, требования нормативно-технической документации к реализации заданного этапа ЖЦ. Алгоритмы основаны на синтезе инструментов системного инжиниринга и модельно-ориентированного системного инжиниринга.

8. Разработаны шаблоны моделей «усовершенствованный Дом качества», сокращающие трудозатраты на их построение на 20% (экспертная оценка).

Перспективы дальнейших исследований тематики диссертации

Продемонстрирована целесообразность использования разработанного методического инструментария МОСИ при проектировании широкого класса ТО в парадигме модельно-ориентированного системного инжиниринга, как в космической, так и в других отраслях народного хозяйства. Показано, что он также развивает теорию САПР в области лингвистического и методического обеспечения CALS-технологий (технологий информационной поддержки изделий на этапах жизненного цикла) и создает основу для разработки и развития информационного и программного обеспечения CALS-технологий.

А именно, он предоставляет для широкой аудитории пользователей научно-методическую и практическую основы для изучения, проектирования и разработки принципиально новых программных средств взаимодействия проектировщик – система (цифровой двойник), основанных на интеграции используемых программ и САПР в единый комплекс автоматизации различных аспектов и процессов проектирования (в том числе, учета изменений, анализа и синтеза), управления проектными работами и документирования.

Вышесказанное обуславливает актуальность и перспективность дальнейшего развития полученных результатов. Новые исследования автора будут сосредоточены на разработке научных основ проектирования, создания и функционирования полнофункциональной концепции «интегрированной модели системы», обеспечивающей комплексное сетевое проектирование и разработку технических объектов (космического назначения) в парадигме модельно-ориентированного системного инжиниринга. Это в свою очередь будет развивать различные виды обеспечения CALS-технологий.

Список сокращений

АЧ – аппаратная часть

БД – база данных

ВАСТ – вербальный анализ системных требований

ВиВ – верификация и валидация

ВОД – верхнеуровневый отчетный документ

ГЗ – голос заказчика (требования заказчика)

ГИ – голос инженера (требования инженеров)

ГИ № 1 – требования инженеров к функционалу изделия

ГИ № 2 – требования инженеров к аппаратной и/или программной частям изделия

ГИ № 3 – требования нормативно-технической документации к последовательности реализации рассматриваемого жизненного цикла изделия (всего цикла, стадии, этапа)

ГИ № 4 – требования нормативно-технической документации к организационно-договорной, проектной, конструкторской, технологической и/или иной документации необходимой для выполнения и успешной сдачи результатов проектных работ заказчику по итогам выполнения заданного ЖЦ проекта (стадии, этапа)

ГП – голос пользователей (потребности конечных пользователей)

ДК – дом качества

ЖЦ – жизненный цикл

ЖЦИ – жизненный цикл изделия

ИД – исходные данные

ИМС – интегрированная (общая) модель системы

ИПИ – информационная поддержка изделий

ИС – информационная система

ИТ – информационные технологии

КСК – крупногабаритная светоотражающая конструкция

МАИ – метод анализа иерархий

МИ – методический инструментарий

МКА – малоразмерный космический аппарат

ММА – морфологическая матрица альтернатив

МОСИ – модельно-ориентированный системный инжиниринг
МФТИ (НИУ) – Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
НИР – научно-исследовательская работа
НТД – нормативно-техническая документация
ПВВ – план верификации и валидации
ПдС – подсистема
ПО – программное обеспечение
ПС – программное средство
ПЧ – программная часть
СА – спутниковая аппаратура
САПР – системы автоматизированного проектирования
СИ – системный инжиниринг
СТО – сложный технический объект
СЧ – составная часть
СФК – структурирование функции качества
удК – усовершенствованный дом качества
уСФК – усовершенствованное структурирование функции качества
УТГ – уровень технологической готовности
ЦД – цифровой двойник
CAE – Computer-Aided Engineering
CAD – Computer-Aided Design
CALS – Continuous Acquisition and Lifecycle Support
CAM – Computer-Aided Manufacturing
CRM – Customer Relationships Management
ERP – Enterprise Resource Planning
MRP – Material Requirements Planning
MRP II – Manufacturing Resource Planning
PDM – Product Data Management
PLM – Product Lifecycle Management
SCM – Supply Chain Management
SysML – Systems Modeling Language
UML – Unified Modeling Language

Публикации автора по теме диссертации

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных Перечнем ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ по специальности 05.13.12

1. Романов А.А., Шпотя Д.А. Преодоление недостатков программно-методического инструментария, модельно-ориентированного системного инжиниринга, используемого при проектировании систем // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2020. Т. 22. № 6. С. 92–103.

2. Романов А.А., Шпотя Д.А. Методика определения важнейших инженерных характеристик изделия как основа идентификации критических технологий // ТРУДЫ МФТИ. 2016. Том 8, № 4. С. 155–168.

Публикации в других рецензируемых изданиях, рекомендованных Перечнем ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ

3. Романов А.А., Шпотя Д.А. Инженерная методика идентификации потребностей пользователей и определения требований заказчика как основа разработки изделий космической техники // ТРУДЫ МФТИ. 2020. Том 12, № 1. С. 154–167.

Публикации, в других рецензируемых изданиях

4. Романов А.А., Завьялова Н.А., Шпотя Д.А. Интегрированная модель сложной технической системы // Цифровая трансформация космического приборостроения / Под редакцией А.А. Романова, А.А. Романова, Ю.М. Урличича. Королёв: АО «ЦНИИмаш», 2020. С. 104–133.

5. Романов А.А., Шпотя Д.А. Программные инструменты имитационного моделирования космических систем и комплексов // Цифровая трансформация космического приборостроения / Под редакцией А.А. Романова, А.А. Романова, Ю.М. Урличича. Королёв: АО «ЦНИИмаш», 2020. С. 134–159.

Доклад в сборнике конференции, индексируемый Scopus

6. Shpotya D., Romanov A. Software and Methodological Toolkit for the Design and Development of Technical Devices in the Model-Based Systems Engineering Paradigm // Proceedings of the VIII International Conference Engineering and Telecommunication (En&T). 2021. Pp. 1–5. doi: 10.1109/EnT50460.2021.9681800. Scopus ID 176621.

Доклады в сборниках конференций

7. Романов А.А., Шпотя Д.А. Систематизация и применение инструментов системной инженерии для идентификации элементов критических технологий // Тез. докладов 58-й научной конференции МФТИ с международным участием (Долгопрудный, 2015). Москва–Долгопрудный–Жуковский: МФТИ, 2015. С. 131–133.

8. Романов А.А., Шпотя Д.А. Методический подход логистической поддержки проекта на основе языка «SysML» // Тез. докладов 60-й научной конференции МФТИ с международным участием (Долгопрудный, 2017). Москва–Долгопрудный–Жуковский: МФТИ, 2017. С. 235–237.

9. Романов А.А., Шпотя Д.А. Методический подход к разработке предпроектного этапа жизненного цикла изделия // Тез. докладов 61-й научной конференции МФТИ с международным участием (Долгопрудный, 2018). Москва–Долгопрудный–Жуковский: МФТИ, 2018. С. 113–115.

10. Шпотя Д.А., Романов А.А. Сквозной жизненный цикл проектирования и разработки МКА класса CubeSat в парадигме модельно-ориентированного системного инжиниринга // Тез. докладов Первой всероссийской конференции по космическому образованию «Дорога в космос», ИКИ (РАН), 2019. С. 414–417.

11. Шпотя Д.А., Романов А.А. Общедоступный методологический инструментарий проектирования систем в парадигме модельно-ориентированного системного инжиниринга: опыт реализации // Сборник докладов IX Форума по цифровизации оборонно-промышленного комплекса России ИТОПК-2020, август 2020. С. 139–140.

12. Shpotya D., Romanov A. Combining model-based systems engineering tools into a methodological approach for the development of space instruments: theory and application experience in industry and education // Proceedings of the 64th EOQ International Scientific&Business Quality Congress – Effective Education&Quality management, SRMEK. 2021. P. 210–219.

13. Shpotya D., Romanov A. Systems engineering approaches and tools as the basis for redesigning the higher technical education system // Сборник материалов 18 Конгресса WOSC2021 «Системный подход и кибернетика, устремленные в будущее человечества» / Под редакцией: Перко И., Эспехо Р., Лепского В.. Москва: ИПУ (РАН), онлайн. 2021. С. 150–151.

Научно-практические труды, запатентованные на территории РФ

Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2020666348 «Программа для создания файлов-ярлыков формата «.html» с заданным названием и HTML кодом внутри» / Д.А. Шпотя. 08.12.2020 г. М.: Роспатент, 2020.

Список литературы

1. О Гос. корпорации по космической деятельности "Роскосмос", Федеральный закон РФ от 13.07.2015 № 215-ФЗ.
2. Романов А.А. Смена парадигмы разработки инновационной продукции: от разрозненных НИОКР к цифровым проектам полного жизненного цикла // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. Москва, 2017. Т. 4. Вып. 2. С. 68–84.
3. Романов А.А., Романов А.А., Урличич Ю.М. Цифровая трансформация космического приборостроения. Королёв: АО «ЦНИИмаш», 2020. 397 с.
4. Суханов В.О., Кукарцев В.В. Актуальность применения CALS-технологий на машиностроительных предприятиях России // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2011. Т. 1 Вып. 7. С. 466–467.
5. Юрчик П.Ф., Голубкова В.Б. Проектирование и эксплуатация ИАСУ: учебное пособие. М.: МАДИ, 2018. 172 с.
6. Норенков И.П., Трудоношин В.А., Уваров М.Ю., Федорук Е.В. Электронный учебник «Основы САПР» [Электронный ресурс] // МГТУ им. Н.Э. Баумана URL: http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=140_CADedu/CAD.cou (дата обращения: 15.08.2021).
7. Jenney J. et al. Modern Methods of SE: With an Introduction to Pattern and Model Based Methods. CreateSpace Independent Publishing Platform. 2010. 235 p.
8. Olivier L. de Weck Fundamentals of Systems Engineering. Session 1 Systems Engineering Overview Stakeholder Analysis [Electronic resource] // MIT. 2015. URL: https://ocw.mit.edu/courses/aeronautics-and-astronautics/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/lecture-notes/MIT16_842F15_Ses1SE_Ovr_vw.pdf (дата обращения: 18.03.2019).
9. Bajaj M. et al. MBSE++ – Foundations for Extended Model-Based Systems Engineering Across System Lifecycle // INCOSE International Symposium. 2016. V. 26. №. 1. P. 2429–2445.
10. Bajaj M. et al. 4.3.1 Satellites to Supply Chains, Energy to Finance – SLIM for Model-Based Systems Engineering: Part 1: Motivation and Concept of SLIM // INCOSE international Symposium. 2011. V. 21. №. 1. P. 368–394.

11. *Tao F. et al.* Digital twin-driven product design framework // International Journal of Production Research. 2019. V. 57, №.12. P. 3935–3953.
12. *Madni A.M., Madni C.C., Lucero S.D.* Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering // Systems. 2019. V. 7. №. 1. P. 7.
13. *Fisher A. et al.* 3.1.1 model lifecycle management for MBSE // INCOSE International Symposium. 2014. V. 24. №. 1. P. 207–229.
14. *Brusa E.* Synopsis of the MBSE, Lean and Smart Manufacturing in the Product and Process Design for an Assessment of the Strategy «Industry 4.0» // Proceeding of the 4th INCOSE Italia Conference on Systems Engineering. 2018. V. 2248. P. 21–30.
15. *Hallqvist J., Larsson J.* Introducing MBSE by using systems engineering principles // INCOSE International Symposium. 2016. V. 26, №. 1. P. 512–525.
16. *Боровков А.И.* Компьютерный инжиниринг. / А.И. Боровков, С.Ф. Бурдаков, О.И. Клявин и [др.]. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2012. 93 с.
17. *Боровков А.И. и др.* Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК // Вестник Восточно-Сибирской открытой академии. 2019. №. 32. С. 2–2.
18. *Ковалёв С.П., Толоч А.В.* Применение модельно-ориентированного подхода в управлении жизненным циклом технических изделий // Информ. технологии в проектировании и производстве. 2015. №. 2. С. 3–9.
19. *Буздалов Д.В. и др.* Инструментальные средства проектирования систем интегрированной модульной авионики // Труды Института системного программирования РАН. 2014. Т. 26. №. 1. С. 201–230.
20. CAD/CAM/CAE Observer: Компания Ansys купила Phoenix Integration, Inc.: электрон. журн. 2021. № 4 (144). URL: <https://online.flippingbook.com/view/839681373/18/> (дата обращения: 10.10.2021).
21. *Griffin A., Hauser J.R.* The Voice of Customer // Marketing Science. 1993. V. 12. №. 1. P. 1–27.
22. *Wang H., Xie M., Goh T.N.* A comparative study of the prioritization matrix method and the analytic hierarchy process technique in quality function deployment // Total Quality Management. 1998. V. 9. №. 6. P. 421–430.
23. *Hirshorn S.R., Voss L.D., Bromley L.K.* NASA Systems Engineering Handbook Rev2 // NASA Office of the Chief Engineer, 2017. 356 p.
24. ECSS-E-10A Space Engineering – Systems Engineering // European Cooperation for Space Standardization (ECSS), Noordwijk, The Netherlands, 1996.

25. ISO/IEC 19514:2017. Information technology – Object management group systems modeling language (OMG SysML) // International Organisation for Standardisation, Geneva, Switzerland, 2020. 327 p.
26. ISO/IEC/IEEE 15288:2015. Systems and Software Engineering – System Life Cycle Processes // International Organisation for Standardisation / International Electrotechnical Commissions / Institute of Electrical and Electronics Engineers, Geneva, Switzerland, 2015. 116 p.
27. *Martin J.N.* Processes for engineering a system: an overview of the ANSI/ EIA 632 standard and its heritage // *Systems Engineering*. 2000. V. 3. №. 1. P. 1–26.
28. Systems Modeling Language Version 1.6 // Object Management Group. URL: <https://www.omg.org/spec/SysML/1.6/PDF> (дата обращения: 20.09.2019).
29. INCOSE Systems Engineering Handbook, A Guide for System Lifecycle Processes and Activities, INCOSE-TP-2003-002-03, version 3, International Council on Systems Engineering (INCOSE), June 2006 – version 4 was just issued in July 2015
30. *Белов М.В., Новиков Д.А.* Методология комплексной деятельности // М.: Ленанд, 2018. 320 с.
31. *Ваушков Ю.А., Дмитриев А.Я., Митрошкина Т.А.* QFD: разработка продукции и технологических процессов на основе требований и ожиданий потребителей. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева: Самара, 2012. 54 с.
32. Романов А.А., Шпотя Д.А. Преодоление недостатков программно-методического инструментария, модельно-ориентированного системного инжиниринга, используемого при проектировании систем // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2020. Т. 22. № 6. С. 92–103.
33. *Akao Y., Mazur G.* The leading edge in QFD: past, present and future // *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2003. Vol. 20. №. 1. P. 20–35.
34. *Zultner R.E.* Software Quality Function Deployment. Applying QFD to software // *Transactions from the Second Symposium on Quality Function Deployment*. Novi, Michigan, 1990. P. 132–149.
35. *Zultner R.E.* Before the House. The Voices of the Customers in QFD, in QFD-Institute (Ed) // *Transactions from the Third Symposium on Quality Function Deployment*, Novi, Michigan, 1991. P. 451–464.
36. *Zultner R.E.* Blitz QFD: Better, faster, and cheaper forms of QFD // *American Programmer*. 1995. V. 8. P. 24–24.

37. *Zultner R.E.* Software quality function deployment – the North American experience, in SAQ, EOQ-SC (Ed). Software Quality Concern for People // Proc. of the Fourth European Conference on Software Quality. Zürich, 1994. P. 143–158.

38. *Herzwurm G., Schockert S., Mellis W.* Higher customer satisfaction with prioritizing and focused software quality function deployment // Proc. of The Sixth European Conference on Software Quality. 1999. P. 1–12.

39. *Shindo H.* Application of QFD to software and QFD software tools // PreConference Workshops of the Fifth International Symposium on Quality Function Deployment and the First Brazilian Conference on Management of Product Development. Belo Horizonte, Brazil. 1999.

40. *Ender T.R., McDermott T., Mavris D.* Development and Application of Systems Engineering Methods for Identification of Critical Technology Elements During System Acquisition // 7th Annual Conference on Systems Engineering Research. Loughborough University, UK, 2009. P. 1–9.

41. *Fung R.Y.K., Popplewell K., Xie J.* Intelligent hybrid system for customer requirements analysis and product attribute targets determination // International Journal of Production Research. 1998. Vol. 36. №. 1. P. 13–34.

42. *Chen Y., Fung R.Y.K., Tang J.* Fuzzy expected value modelling approach for determining target values of engineering characteristics in QFD // International Journal of Production Research. 2005. Vol. 43, №. 17. P. 3583–3604.

43. *Fung R.Y.K., Tang J.F., Tu P.Y., and Chen Y.Z.* Modelling of quality function deployment planning with resource allocation // Research in Engineering Design. 2003. Vol. 14. No. 4. P. 247–255.

44. *Stansfield K., Mazur G.* INCOSE UK Annual Systems Engineering Conference 2016 – Academic Research Showcase [Electronic resource] // INCOSE UK. 2016. URL: https://incoseuk.org/Documents/Events/ASEC2016/Posters/INCOSE_Posters_2016_-_Impact_ISO_16355_on_SE_vs_2.00_Kim_Stansfield_Glenn_Mazur.pdf (дата обращения: 08.010.2020).

45. *Архипова М.А., Кудрявцев Д.В.* Методологические основы программной поддержки технологии QFD для решения задач бизнес-инжиниринга // 18-я Российская научно-практическая конференция «Инжиниринг предприятий и управление знаниями». М.: Моск. гос. ун-т экономики, статистики и информатики, 2015. Т. 1. С. 147–154.

46. *Курунова Р.Р.* Оценка качества спецификаций требований пользователей на стадии формирования концепции программных средств на основе qfd-методологии: дис. канд. техн. наук. ФГБОУВО «Уфимский государственный авиационный технический университет». 2018. 167 с.

47. *Батоврин В.К.* Стандарты системной инженерии: Промышленный и технологический форсайт Российской Федерации на долгосрочную перспективу // Фонд «Центр стратегических разработок (ЦСР) «Северо-Запад»», 2012. 66 с.

48. ГОСТ 28195-89 Оценка качества программных средств. Общие положения [Электронный ресурс] // docs.cntd.ru. 1989. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200009135> (дата обращения: 24.01.2019).

49. *Братухин А.Г.* Конкурентоспособность российской авиационной техники при использовании интегрированных информационных технологий (CALS-технологий) на протяжении всего жизненного цикла изделий (на примере гражданской авиатехники) // Авиационно-космическое машиностроение: Международная энциклопедия CALS-технологий / Гл. ред. А.Г. Братухин. – М.: НИЦ АСК, 2015. С. 15–34.

50. *Шуткин Л.В.* Термины и определения стандарта ISO/IEC 2382-1 [Электронный ресурс] // Информационно-справочный портал MorePC.ru URL: <http://www.morepc.ru/informatisation/iso2381-1.html> (дата обращения: 05.12.2020).

51. ГОСТ 19781-90. Обеспечение систем обработки информации: программное. Термины и определения. Взамен ГОСТ 19781-93, ГОСТ 19.004-80. Введ. с 27.08.1990. М.: Стандартинформ, 2008. 16 с.

52. ГОСТ 28806–90 «Качество программных средств. Термины и определения». М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001. 35 с.

53. *Федотов А.М.* Словарь терминов в коллекции «Современные проблемы информатики». [Электронный ресурс] // Новосибирский гос. ун-т. фак. информ. технологий. URL: http://www.nsc.ru/win/elbib/data/show_page.dhtml?77+345 (дата обращения: 05.12.2020).

54. *Романов А.А., Шпотя Д.А.* Инженерная методика идентификации потребностей пользователей и определения требований заказчика как основа разработки изделий космической техники // ТРУДЫ МФТИ. 2020. Т. 12. №. 1. С. 154–167.

55. *Шпотя Д.А., Романов А.А.* Сквозной жизненный цикл проектирования и разработки МКА класса CubeSat в парадигме модельно-ориентированного системного инжиниринга // Тез. докладов Первой Всероссийской конференции по космическому образованию «Дорога в космос», ИКИ (РАН), 2019. С. 414–417.

56. *Романова И.К.* Лекционный материал дисциплины «САПР». Занятие № 1. Общие сведения о САПР [Электронный ресурс] // Кафедра «Специальная робототехника и мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана URL: http://hoster.bmstu.ru/~sm7/Methodiky/RomanovaSM7Sapt_tema1_2_Teoria/Zaniatie1.htm (дата обращения: 05.12.2020).

57. *Hitchins D.K.* Systems Engineering: a 21st Century Systems Methodology. John Wiley & Sons, 2008. 532 p.

58. Systems Engineering Vision 2025 [Electronic resource] // International Council on Systems Engineering. 2014. URL: <https://www.incose.org/docs/default-source/aboutse/se-vision-2025.pdf> (дата обращения: 05.12.2020).
59. *Gregory J. et al.* The Long and Winding Road: MBSE Adoption for Functional Avionics of Spacecraft // The Journal of Systems & Software. 2019. V. 160. P. 1-14.
60. Smith S., Brown D. SE101: Why do Systems Engineering? [Electronic resource] // INCOSE UK, 2014. URL: <https://www.incose.org/docs/default-source/default-document-library/twg-se101-v11-2014-01-20.pdf> (дата обращения: 10.09.2019).
61. *Sillitto H.* Systems engineering and System Definitions (version 1.0) / H. Sillitto, J. Martin, D. McKinney [et al.] [Electronic resource] // INCOSE, 2019. https://www.incose.org/docs/default-source/default-document-library/final_-se-definition.pdf (дата обращения 15.12.2020).
62. *Richardson D.* Model Based Systems Engineering. Using Maxwell's Demon to Tame the «Devil in the Details» that are Encountered during System Development [Electronic resource] // Systems Engineering Forum. Government Transformation to Digital Engineering. NASA-Goddard Space Flight Center, 2018. P. 1–41. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20180002660> (дата обращения 11.08.2019).
63. *Friedenthal S., Griego R., Sampson M.* INCOSE model based systems engineering (MBSE) initiative // INCOSE 2007 Symposium. 2007. V. 11.
64. *Pasquinelli M. et al.* Extending the System Model // Dynamics of Long-Life Assets. Springer, Cham, 2017. P. 169–189.
65. *Романов А.А., Завьялова Н.А., Шнотя Д.А.* Глава 6. Интегрированная модель сложной технической системы // Цифровая трансформация космического приборостроения / под ред. А.А. Романова, А.А. Романова, Ю.М. Урличича. Королёв: АО «ЦНИИмаш», 2020. С. 104–133.
66. *Duprez J.* Approach to structure, formalize and map MBSE meta-models and semantic rules // INCOSE International Symposium. 2019. V. 29. №. 1. P. 22–36.
67. ED-79A ARP4754A/-Инструкции для разработки гражданской авиации и систем – улучшения, новинки и ключевые темы // SAE/TP 2011-01-2564-2011. SAE international – Technical Papers. 2011.
68. *Dori D.* Methodology O. P. A holistic systems paradigm. NY. Springer, 2002. 445 p.
69. *Delligatti L.* SysML Distilled: A Brief Guide to the Systems Modeling Language. 1st ed. Addison-Wesley Professional, 2013. 304 p.
70. *Towers J.* What is Model Based Systems Engineering [Electronic resource] // Z9. INCOSE UK zGuide. 2015. URL: https://incoseuk.org/Documents/zGuides/Z9_model_based_WEB.pdf. (дата обращения: 10.01.2020).

71. *Estefan J. et al.* Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies, Rev // INCOSE MBSE Focus Group. 2007. Т. 25. №. 8. P. 1–12.
72. *Cloutier R., Bone M.* MBSE survey [Electronic resource] // INCOSE IW. 2015. URL: http://www.omgwiki.org/MBSE/lib/exe/fetch.php?media=mbse:incose_mbse_survey_results_initial_report_2015_01_24.pdf (дата обращения: 08.09.2019).
73. *Friedenthal S., Moore A., Steiner R.* A practical guide to SysML: the systems modeling language. 3rd ed. Morgan Kaufmann, 2014. 630 p.
74. ГОСТ Р 57100-2016/ISO/IEC/IEEE 42010:2011. Системная и программная инженерия. Описание архитектуры. Введ. 2017-09-01. М.: Стандартинформ, 2016. 31 с.
75. *Wolny S. et al.* Thirteen years of SysML: a systematic mapping study // Software and Systems Modeling. 2020. V. 19. №. 1. P. 111–169.
76. *Albers A., Zingel C.* Challenges of model-based systems engineering: A study towards unified term understanding and the state of usage of SysML // Smart Product Engineering. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. P. 83–92.
77. *Kasser J.E.* Seven systems engineering myths and the corresponding realities // Proc. of the Systems Engineering Test and Evaluation Conference. Adelaide, Australia, 2010. P. 1–13.
78. *Tower J.* Model Based Systems Engineering – The State of the Nation [Electronic resource] // ResearchGate.net. INCOSE UK Annual Systems Engineering Conference (ASEC) «Effective Systems Engineering», UK-Oxfordshire. 2013. URL: https://www.researchgate.net/publication/279960037_Model_Based_Systems_Engineering_-_The_State_of_the_Nation (дата обращения: 10.01.2020).
79. *Chami M., Bruel J.M.* A Survey on MBSE Adoption Challenges [Electronic resource] // INCOSE EMEASEC. 2018 URL: https://oatao.univ-toulouse.fr/22637/1/chami_22637.pdf (дата обращения: 08.09.2019).
80. *Sullivan L.P.* Quality Function Deployment: A System to Assure that Customer Needs Drive the Product Design and Production Process // Quality Progress (ASQC). 1986. P. 39-50.
81. *Романов А.А.* Прикладной системный инжиниринг. М.: Физматлит, 2015. 556 с.
82. *Taguchi G. and Clausing D.* Robust Quality // Harvard Business Review, January-February 1990. P. 65–75.
83. House of Quality (QFD) Tutorial [Electronic resource] // Official website of QFD Institute. URL: <http://www.qfdonline.com/qfd-tutorials/house-of-quality-tutorial> (дата обращения: 10.01.2020).
84. *Адлер Ю.П.* Сколько ни развертывай, а структурировать все равно придется // Методы менеджмента качества. 2002. №. 3. С. 16–18.
85. *Moran J., ReVelle J., Cox C.* QFD Handbook. 1st ed. New York: Wiley, 1998. 432 p.

86. *Cristiano J.J., Liker J.K., and White C.C.* Key factors in the successful application of quality function deployment (QFD) // *IEEE Transactions on Engineering Management*. 2001. Vol. 48. №. 1. P. 81–95.
87. *Akko Y.* History of QFD in Japan // *The Best on Quality: targets, improvements, systems*. Munich: Hanser Publishers. 1990. Vol. 3 P. 183–196.
88. *Akao Y.* Quality function deployment: integrating customer requirements into product design. 1st ed. Cambridge, MA: Productivity press, 2004. 392 p.
89. *Akao Y.* QFD: Past, Present, and Future // *International Symposium on QFD*. Linköping, Sweden. 1997. V. 97. №. 2. P. 1–12.
90. *Андон Ф.И.* Основы инженерии программных систем / Ф.И. Андон, Г.И. Коваль, Т.М. Коротун и [др.]. Киев: Академперіодика, 2007. 672 с.
91. *Clausing D.* Total Quality Development: A Step-by-Step Guide to World Class Concurrent Engineering. New York: ASME Press. 1994. 506 p.
92. *Перемитина Т.О.* Управление качеством программных систем: учебное пособие. Томск: Эль Контент, 2011. 228 с.
93. *Abu-Assab S.* Integration of Preference Analysis Methods into QFD for Elderly People: A Focus on Elderly People. Springer Science & Business Media, 2012. 223 p.
94. *Кане М.М.* Системы, методы и инструменты менеджмента качества / М.М. Кане, А.Г. Схиртладзе, В. Корешков и [др.] Питер, 2007. 576 с.
95. *Akao Y.* New Product Development and Quality Assurance – Quality Deployment System // *Standardization and Quality Control*. 1972. V. 25. №. 4. P. 7–14.
96. *Bouchereau V., Rowlands H.* Methods and techniques to help quality function deployment (QFD) // *Benchmarking*. 2000. Vol. 7. №. 1. P. 8–19.
97. *Kathawala Y., Motwani J.* Implementing quality function deployment // *The TQM Magazine*. 1994. Vol. 6. №. 6. P. 31–37.
98. *Ginn D., Zairi M.* Best practice QFD application: an internal/external benchmarking approach based on Ford Motors' experience // *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2005. Vol. 22. №. 1. P. 38–58.
99. *Politis J.D.* QFD, organisational creativity and productivity // *International journal of Quality & Reliability management*. 2005. Vol. 22. №. 1. P. 59–71.
100. *Miguel P.A.* Evidence of QFD best practices for product development: a multiple case study // *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2005. Vol. 22. №. 1. P. 72–82.
101. *Chan L.K., Wu M.L.* Prioritizing the technical measures in quality function deployment // *Quality engineering*. 1998. Vol. 10. №. 3. P. 467–479.

102. *Wolniak R.* The use of QFD method advantages and limitation // *Production Engineering Archives*. 2018. Vol. 18. №. 18. P. 14–17.
103. ISO 16355-1:2015. Applications of statistical and related methods to new technology and product development process – Part 1: General principles and perspectives of Quality Function Deployment (QFD). International Standards Organization, Geneva, Switzerland, 2015.
104. ISO 16355-2:2017. Applications of statistical and related methods to new technology and product development process – Part 2: Acquisition of Non-quantitative Voice of Customer and Voice of Stakeholder. International Standards Organization, Geneva, Switzerland, 2017.
105. ISO 16355–3:2019. Applications of statistical and related methods to new technology and product development process – Part 3: Quantitative approaches for the acquisition of voice of customer and voice of stakeholder" International Standards Organization, Geneva, Switzerland, 2019.
106. ISO 16355–4:2017. Applications of statistical and related methods to new technology and product development process – Part 4: Analysis of Non-Quantitative and Quantitative VOC/VOS. International Standards Organization, Switzerland, 2017.
107. ISO 16355-5:2017. Applications of statistical and related methods to new technology and product development process – Part 5: Solution Strategy. International Standards Organization, Geneva Switzerland, 2017.
108. ISO/TR 16355–8:2017. Applications of statistical and related methods to new technology and product development process – Part 8 Commercialization. International Standards Organization, Geneva, Switzerland, 2017.
109. *Mazur G.H.* Beyond ISO 16355: QFD for a Digital World // 23rd International QFD Symposium, ISQFD, Tokyo. 2017. P. 106–110.
110. *Ohmori A.* Software quality deployment approach: framework design, methodology and example // *Software Quality Journal*. 1994. № 4 (3). P. 209–240.
111. *Herzwurm G., Schockert S., Mellis W.* Joint requirements engineering: QFD for rapid customer-focused software and Internet-development. Springer Science & Business Media, 2000. 296 p.
112. *Herzwurm G., Schockert S.* What are the Best Practices of QFD? // Transactions from the 12th International Symposium on Quality Function Deployment, Tokyo, Japan. 2006. P. 1–8.
113. *Watanabe Y., Kawakami Y., Iizawa N.* Software requirements analysis method using QFD // Proc. of 18th International Symposium on Quality Function Deployment. 2012. P. 1–7.
114. QFD Symposium All abstracts 1989–2019 [Electronic resource] // QFD Institute. URL: http://www.qfdi.org/books/symposium_proceedings_all_abstracts.html (дата обращения: 08.04.2020).

115. *Crow K.* Quality Function Deployment [Electronic resource] // IEEE Long Island Section. 2013. URL: https://www.ieee.li/tmc/quality_function_deployment.pdf (дата обращения: 10.01.2020).
116. *Dean E.B.* Quality function deployment for large systems // Proceeding of the International Engineering Management Conference. 1992. P. 317–322.
117. QFD Black Belt Certificate Course [Electronic resource] // QFD Institute. URL: http://qfdi.org/bb_public.html#content (дата обращения: 08.09.2019).
118. *Herzwurm G. et al.* Customer oriented evaluation of QFD software tools // Proc. Of The Third Annual QFD Symposium. Linloping, 1997. Vol. 1. P. 309–323.
119. *Herzwurm G., Reiß S., Schockert S.* The support of Quality Function Development by the customer orientated evaluation of software tools // Transactions from the 15th Symposium on Quality Function Deployment and the 9th International Symposium on QFD. 2003. P. 12–13.
120. *Sharma A.K., Mehta I.C., Sharma J.R.* Analysing programming tools for the development of quality function deployment software // International Journal of Information and Decision Sciences. 2010. Vol. 2. №. 2. P. 132–146.
121. *Романов А.А., Шпотя Д.А.* Методика определения важнейших инженерных характеристик изделия как основа идентификации критических технологий // Труды МФТИ. Москва, 2016. Т. 8. № 4. С. 155–168.
122. *Koski J.* Quality function deployment in requirements engineering: a review and case studies. [Electronic resource] // Helsinki University of Technology. 2003. URL: <http://www.soberit.tkk.fi/core/reports/mba-jouko-koski.pdf> (дата обращения: 08.09.2019).
123. *Bahill A.T., Chapman W.L.* A tutorial on quality function deployment // Engineering Management Journal. 1993. Vol. 5. №. 3. P. 24–35.
124. ГОСТ Р 56005-2014 Арматура трубопроводная. Методика обеспечения надежности и безопасности при проектировании и изготовлении с использованием метода структурирования функции качества. Введ. 2015-01-01. М.: Стандартинформ, 2014. 77 с.
125. *Hauser J.R., Clausing D.P.* The house of quality // Harvard Business Review, May-June. 1988. P. 63–73.
126. *Zultner R.E.* Priorities: The Analytic Hierarchy Process in QFD // Proc. of The 5th Symposium on QFD. Novi, 1993. P. 459–466.
127. *Armacost R.L. et al.* An AHP framework for prioritizing customer requirements in QFD: an industrialized housing application // IIE transactions. 1994. Vol. 26. №. 4. P. 72–79.
128. *Ho W.* Integrated analytic hierarchy process and its applications—A literature review // European Journal of operational research. 2008. Vol. 186. №. 1. P. 211–228.
129. *Li Y. et al.* An integrated method of rough set, Kano’s model and AHP for rating customer requirements’ final importance // Expert Systems with Applications. 2009. Vol. 36. №. 3. P. 7045–7053.

130. *Wang J.* Fuzzy outranking approach to prioritize design requirements in quality function deployment // *International Journal of Production Research*. 1999. Vol. 37. №. 4. P. 899–916.
131. *Wasserman G.S. et al.* Using fuzzy set theory to derive an overall customer satisfaction index // *Proc. of the 5th Symposium on QFD*. 1993. P. 36–54.
132. *Sharma J.R., Rawani A.M.* Ranking customer requirements in QFD by factoring in their interrelationship values // *Quality Management Journal*. 2007. V. 14. №. 4. P. 53–60.
133. *Franceschini F., Rossetto S.* QFD: the problem of comparing technical/engineering design requirements // *Research in Engineering design*. 1995. V. 7. №. 4. P. 270–278.
134. *Chan L.K., Wu M.L.* A systematic approach to quality function deployment with a full illustrative example // *Omega*. 2005. Vol. 33. №. 2. P. 119–139.
135. *Chen Y., Fung R. Y. K., Tang J.* Rating technical attributes in fuzzy QFD by integrating fuzzy weighted average method and fuzzy expected value operator // *European Journal of Operational Research*. 2006. Vol. 174. №. 3. P. 1553–1566.
136. *Sharma J.R., Rawani A.M.* Ranking engineering characteristics in Quality Function Deployment by factoring-in the roof values // *International Journal of Productivity and Quality Management*. 2008. Vol. 3. №. 2. P. 223–240.
137. *Hsiao S.W.* Concurrent design method for developing a new product // *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2002. Vol. 29. №. 1. P. 41–55.
138. *Bhattacharya A., Sarkar B., Mukherjee S.K.* Integrating AHP with QFD for robot selection under requirement perspective // *International journal of production research*. 2005. Vol. 43. №. 17. P. 3671–3685.
139. *Сааму Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий. Перевод с английского Р. Г. Вачнадзе. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
140. *Ustinovičius L., Łoniewski K.* Вербальный анализ решений // *Ekonomia i Zarządzanie*. 2013. Vol. 5. №. 2. P. 212–229.
141. *Hyun C.T., et al.* Effect of delivery methods on design performance in multifamily housing projects // *Journal of Construction Engineering and Management*. 2008. Vol. 134. №. 7. P. 468–482.
142. *Oquendo F., Leite J., Batista T.* *Software Architecture in Action*. 1st ed. Switzerland: Springer International Publishing, 2016. 253 p.
143. *Friedenthal S., Moore A., Steiner R.* OMG systems modeling language (OMG SysML) tutorial // *INCOSE Intl. Symposium*. 2006. Vol. 9. P. 65–67.
144. *Милошевич Д.* Набор инструментов для управления проектами / Драган З. Милошевич; Пер. с англ. Е.В. Мамонтова; под ред. С.И. Неизвестного. М.: Компания АйТи; ДМК Пресс, 2008. 729 с.: ил.

145. *Sharma J.R., Singh S.* A New Paradigm in Comprehensive Quality Function Deployment Analysis // International Association of Engineers. World Congress on Engineering. 2012. L., July 4–6, 2012. Vol. 2182. P. 1624–1629.
146. *Weilkiens T.* SYSMOD-The Systems Modeling Toolbox-Pragmatic MBSE with SysML. 2nd ed. Tim Weilkiens, 2016. 230 p.
147. *Тумов В.В.* Системно-морфологический подход в технике, науке, социальной сфере. [Электронный ресурс] // Metodolog.ru. URL: <https://www.metodolog.ru/00039/00039.html> (дата обращения: 08.07.2020).
148. IEEE 1012-2016/Cor1-2017 Standard for System, Software, and Hardware Verification and Validation. 2017.
149. *Романов А.А.* Тема 13. Валидация и верификация системного проектирования // МФТИ (НИУ). Курс лекций «Системное проектирование космической техники». М., 2013.
150. *Шпотя Д.А., Романов А.А.* Общедоступный методологический инструментарий проектирования систем в парадигме модельно-ориентированного системного инжиниринга: опыт реализации // Сборник докладов IX Форума по цифровизации оборонно-промышленного комплекса России ИТОПК-2020, август, 2020. С. 139–140.

Приложение А

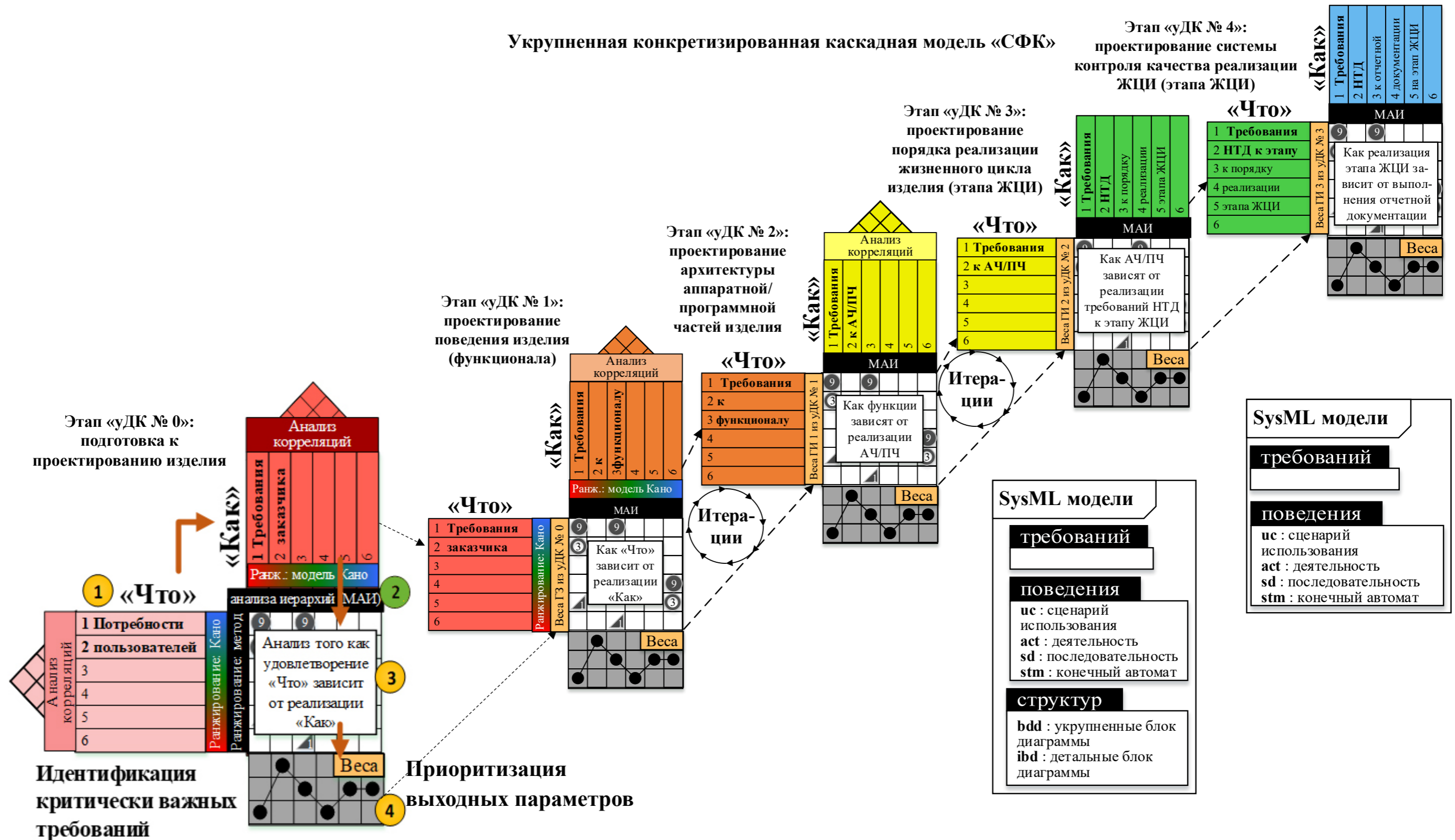


Рисунок А.1 – Укрупненная конкретизированная каскадная модель «СФК» (модель «уСФК») с концептуальным отображением логики реализации ее этапов

Приложение Б

Ранжирование требований заказчика к МКА по модели Кано

Таблица Б.1 – Результаты деления категорий согласно модели Кано после постановки попарных вопросов.

Физическое состояние	Достаточно			
	Восприятие пользователя	Не удовлетворен	Нейтрален	Удовлетворен
Недостаточно	Не удовлетворен	Скептический	Должен быть	Требуемый
	Нейтрален	Реверс	Безразличный	Впечатляющий (BAU)
	Удовлетворен	Реверс	Реверс	Скептический

1) Формат МКА «Маяк» CubeSat 3u.

Первый вопрос, с точки зрения достаточности: Если «Формат МКА «Маяк» CubeSat 3u», что вы ощущаете? **Ответ:** “Нейтрален”.

Второй вопрос, с точки зрения недостаточности: Если «Формат МКА «Маяк» не CubeSat 3u», что вы ощущаете? **Ответ:** “Не удовлетворен”.

Вывод: в соответствии с таблицей Б.1 видно, что при условии, если с точки зрения достаточности потребитель/заказчик “нейтрален”, а в случае недостаточности “не удовлетворен”, то требование «Формат МКА «Маяк» CubeSat 3u» является требованием, которое **Должно быть (базовое по умолчанию)**, в противном случае заказчик будет не удовлетворен исходом задачи/проекта/миссии.

2) Срок орбитального существования МКА «Маяк» 1 месяца.

Первый вопрос, с точки зрения достаточности: Если «Срок орбитального существования МКА «Маяк» один или более месяцев», что вы ощущаете?

Ответ: “*Нейтрален*”.

Второй вопрос, с точки зрения недостаточности: Если «Срок орбитального существования МКА «Маяк» менее одного месяца», что вы ощущаете?

Ответ: “Не удовлетворен”.

Вывод: Так результаты ответов в этом случае аналогичны предыдущему требованию, то такое требование **Должно быть базовым по умолчанию** в противном случае заказчик будет не удовлетворен исходом задачи/проекта/миссии.

3) МКА «Маяк» выполнен из отечественных компонентов.

Первый вопрос, с точки зрения достаточности: Если «МКА «Маяк» полностью выполнен из отечественных компонентов», что вы ощущаете?

Ответ: “*Удовлетворен*”.

Второй вопрос, с точки зрения недостаточности: Если «МКА «Маяк» не полностью “выполнен из отечественных компонентов”, что вы ощущаете?»

Ответ: “Нейтрален”.

Вывод: в соответствии с таблицей Б.1 и видно, что при условии, если с точки зрения достаточности потребитель/заказчик “*удовлетворен*”, а в случае недостаточности “нейтрален”, то требование «МКА «Маяк» полностью выполнен из отечественных компонентов» является требованием, которое сильно **впечатлит**, если будет выполнено в 100% объеме, в противном случае заказчик нейтрально отнесется и на исход задачи/проекта/миссии это в плохом смысле не повлияет.

4) Обеспечить стабильное и безопасное энергопитание.

Первый вопрос, с точки зрения достаточности: Если «Обеспечено стабильное и безопасное энергопитание», что вы ощущаете?

Ответ: “*Нейтрален*”.

Второй вопрос, с точки зрения недостаточности: Если «Не обеспечено стабильное и безопасное энергопитание», что вы ощущаете?

Ответ: “Не удовлетворен”.

Вывод: в соответствии с таблицей Б.1 и видно, что при условии, если с точки зрения достаточности потребитель/заказчик “нейтрален”, а в случае недостаточности “не удовлетворен”, то требование «Обеспечено стабильное и безопасное энергопитание» является требованием, которое **Должно быть базовым по умолчанию**, в противном случае заказчик будет не удовлетворен исходом задачи/проекта/миссии.

5) Спутник должен быть виден с Земли как самая яркая звезда на ночном небе.

Первый вопрос, с точки зрения достаточности: «Если МКА «Маяк» виден с Земли как самая яркая звезда на ночном небе», что вы ощущаете?

Ответ: “Удовлетворен”.

Второй вопрос, с точки зрения недостаточности: «Если МКА «Маяк» не виден с Земли как самая яркая звезда на ночном небе», что вы ощущаете?

Ответ: “Не удовлетворен”.

Вывод: в соответствии с таблицей Б.1 и видно, что при условии, если с точки зрения достаточности потребитель/заказчик “удовлетворен”, а в случае недостаточности “не удовлетворен”, то требование «МКА «Маяк» должен быть виден с Земли как самая яркая звезда на ночном небе» является требованием, которое **просто необходимо достичь**, в противном случае заказчик будет не удовлетворен исходом задачи/проекта/миссии.

б) Изготовление летного экземпляра МКА «Маяк» – 700 тыс. рублей.

Первый вопрос, с точки зрения достаточности: Если «изготовление летного экземпляра МКА «Маяк» стоит не более 700 тыс. рублей», что вы ощущаете?

Ответ: “Удовлетворен”.

Второй вопрос, с точки зрения недостаточности: Если «изготовление летного экземпляра МКА «Маяк» стоит более 700 тыс. рублей», что вы ощущаете?

Ответ: “Не удовлетворен”.

Вывод: Так как результаты ответов в этом случае аналогичны предыдущему требованию, то такое требование **просто необходимо достичь**, в противном случае заказчик будет не удовлетворен исходом задачи/проекта/миссии.

Приложение В

Ранжирование требований заказчика к МКА по методу анализа иерархий

Из-за ограничений формата А4 и для большей простоты восприятия примера, вместо формулировок требований будут использоваться их порядковые номера.

1. Формат МКА «Маяк» CubeSat 3u.
2. Обеспечить стабильное и безопасное энергопитание.
3. Спутник должен быть виден с Земли как самая яркая звезда на ночном небе.
4. Изготовление летного экземпляра МКА «Маяк» – 700 тыс. рублей.
5. Срок орбитального существования МКА «Маяк» более 1 месяца.
6. МКА «Маяк» выполнен из отечественных компонентов.

Рассматриваем как первое в списке требование соотносится со всеми остальными по шкале от 1 до 9 (описание значений указано в главе 2 в таблице 2.2).

№ 1 9_8_7_6_5_4_3_2_1_1/2_1/3_1/4_1/5_1/6_1/7_1/8_1/9 № 1

Данный пример показан лишь для наглядной демонстрации того, что одно и то же требование на пересечении друг с другом обозначается единицей. В случае обратносимметричной матрицы у нас всегда получается вектор из единиц.

№ 1 9_8_7_6_5_4_3_2_1_1/2_1/3_1/4_1/5_1/6_1/7_1/8_1/9 № 2

Сравнив полученный результат с расшифровкой этого значения в таблице 2.2 можно понять, что достижение формата МКА «Маяк» гораздо менее значимо чем достижение требования по обеспечению стабильного и безопасного энергопитания.

№ 1 9_8_7_6_5_4_3_2_1_1/2_1/3_1/4_1/5_1/6_1/7_1/8_1/9 № 3

Цифры 2, 4, 6, 8 в этом случае отражают переходный этап от меньшего к большему. В этом случае результат 1/9 говорит о том, что достижение формата МКА «Маяк» вообще ничего не значит по сравнению с тем, что нужно достичь, чтобы «спутник должен быть виден с Земли как самая яркая звезда на ночном небе».

Описанная в первых двух примерах логика анализа полученных результатов достаточна, чтобы самостоятельно понять следующие данные сравнений.

№ 1 9_8_7_6_5_4_3_2_1_1/2_1/3_1/4_1/5_1/6_1/7_1/8_1/9 № 4

№ 1 9_8_7_6_5_4_3_2_1_1/2_1/3_1/4_1/5_1/6_1/7_1/8_1/9 № 5

№ 1 9_8_7_6_5_4_3_2_1_1/2_1/3_1/4_1/5_1/6_1/7_1/8_1/9 № 6

Далее рассматривается парное сравнение второго требования со всеми остальными кроме первого требования (так как это сравнение уже было выполнено, но было зафиксировано лишь то как №1 по отношению к №2, но в случае если посмотреть, то как №2 соотносится с №1, то это будет обратный результат первого ко второму) и самого себя.

№ 2 9_8_7_6_5_4_3_2_1_1/2_1/3_1/4_1/5_1/6_1/7_1/8_1/9 № 3

№ 2 9_8_7_6_5_4_3_2_1_1/2_1/3_1/4_1/5_1/6_1/7_1/8_1/9 № 4

№ 2 9_8_7_6_5_4_3_2_1_1/2_1/3_1/4_1/5_1/6_1/7_1/8_1/9 № 5

№ 2 9_8_7_6_5_4_3_2_1_1/2_1/3_1/4_1/5_1/6_1/7_1/8_1/9 № 6

Тоже самое и для остальных требований.

№ 3 9_8_7_6_5_4_3_2_1_1/2_1/3_1/4_1/5_1/6_1/7_1/8_1/9 № 4

№ 3 9_8_7_6_5_4_3_2_1_1/2_1/3_1/4_1/5_1/6_1/7_1/8_1/9 № 5

№ 3 9_8_7_6_5_4_3_2_1_1/2_1/3_1/4_1/5_1/6_1/7_1/8_1/9 № 6

№ 4 9_8_7_6_5_4_3_2_1_1/2_1/3_1/4_1/5_1/6_1/7_1/8_1/9 № 5

№ 4 9_8_7_6_5_4_3_2_1_1/2_1/3_1/4_1/5_1/6_1/7_1/8_1/9 № 6

№ 5 9_8_7_6_5_4_3_2_1_1/2_1/3_1/4_1/5_1/6_1/7_1/8_1/9 № 6

По ходу получения результатов, оценки заносят в обратно-симметричную матрицу. Пример такой матрицы представлен в таблице В.1.

Таблица В.1 – Пример заполнения обратно симметричной матрицы результатами попарных сравнений

Требование ГЗ	1	2	3	4	5	6
1	1	0,14	0,11	0,13	0,25	0,17
2	7	1	0,13	0,25	0,33	0,33
3	9	8	1	2	6	7
4	8	4	0,5	1	8	3
5	4	3	0,17	0,13	1	0,25
6	6	3	0,14	0,33	4	1

Итоговое ранжирование, включающее исчисление вектора приоритетов и проверку результатов на согласованность представлено на рисунке В.1.

Косимметричная матрица с результатами попарных сравнений и найденным вектором приоритета.									Поиск оценки согласованности суждений и итоговое ранжирование					
№ п/п до ранжирования	Параметры ГЗ	Формат CubeSat 3u	Обеспечить стабильное и безопасное энергопитание	Спутник должен быть виден с Земли ночью как самая яркая звезда на небе.	Бюджет проекта 15 млн рублей	Срок орбитального существ. Более 1 месяца	Выполнен из отечественных компонентов	Оценки собственного приоритета для уДК №1	Нормализованные оценки собственного приоритета = вектор	Wj*Сумма столбика j	Лямбда=Сумма(Wi*Сумму столбика j)	ИС=(Лямбда-n)/(n-1)	ОС=ИС/СИ	№ п/п после ранжирования для ДК 1
1	Формат CubeSat 3u	1,00	0,14	0,11	0,13	0,25	0,17	0,21	0,02	0,8				6
2	Обеспечить стабильное и безопасное энергопитание	7,00	1,00	0,13	0,25	0,33	0,33	0,54	0,06	1,1				5
3	Спутник должен быть виден с Земли ночью как самая яркая звезда на небе.	9,00	8,00	1,00	2,00	6,00	7,00	4,27	0,45	0,9				1
4	Изготовление летного экземпляра КА, не должно превышать 700 тыс. руб.	8,00	4,00	0,50	1,00	8,00	3,00	2,70	0,28	1,1				2
5	Срок орбитального существ. Более 1 месяца	4,00	3,00	0,17	0,13	1,00	0,25	0,63	0,07	1,3				4
6	Выполнен из отечественных компонентов	6,00	3,00	0,14	0,33	4,00	1,00	1,23	0,13	1,5				3
	Сумма столбца:	35,0	19,1	2,0	3,8	19,6	11,8	9,57			6,6	0,1	10%	

Рисунок В.1 – Ранжирование требований к МКА «Маяк» по МАИ

Приложение Д

Ранжирование инженерных требований к МКА по МАИ

На рисунке Д.1 представлено ранжирование функциональных подсистем малоразмерного космического аппарата с помощью метода анализа иерархий.

№ п/п до ранжирования для ДК 1	Подсистемы параметров ГИ № 1	Общие требования	Энергопитание подсистем МКА	Создание яркой видимой вспышки в ночном небе	Развертывание КСК	Закручивание МКА	Управление электронными подсистемами МКА	Силовая конструкция	Оценки собственного приоритета	Нормализованные оценки собственного приоритета = вектор приоритета (W)	W [*] Сумму столбика j	Лямбда=Сумма(W [*] Сумму столбика j)	ИС=(Лямбда-n)/(n-1) Индекс Согласованности	ОС=ИС/СИ - Отношение Согласованности	Нормализованные оценки собственного приоритета умноженные на 100	№ п/п после ранжирования для ДК 1
1	Общие требования	1,00	0,33	0,17	0,14	0,33	0,20	0,33	0,29	0,03	0,87				3,09	7
2	Энергопитание подсистем МКА	3,00	1,00	3,00	0,25	0,33	0,33	3,00	0,96	0,10	1,22				10,21	4
3	Создание яркой видимой вспышки в ночном небе	6,00	0,33	1,00	0,25	0,33	0,33	3,00	0,77	0,08	1,19				8,23	5
4	Развертывание КСК	7,00	4,00	4,00	1,00	2,00	1,00	8,00	2,92	0,31	1,01				31,01	1
5	Закручивание МКА	3,00	3,00	3,00	0,50	1,00	0,50	4,00	1,60	0,17	1,06				17,03	3
6	Управление электронными подсистемами МКА	5,00	3,00	3,00	1,00	2,00	1,00	6,00	2,46	0,26	0,92				26,13	2
7	Силовая конструкция	3,00	0,33	0,33	0,13	0,25	0,17	1,00	0,40	0,04	1,09				4,29	6
Сумма столбца:		28,00	12,00	14,50	3,27	6,25	3,53	25,33	9,40			7,37	0,06	0,05		

Рисунок Д.1 – Ранжирование подсистем параметров ГИ № 1 малоразмерного космического аппарата по методу анализа иерархий

Результаты ранжирования функциональных подсистем (от важнейшего к наименее важному):

1. Развертывание крупногабаритной светоотражающей конструкции – 0,31
2. Управление электронными подсистемами МКА – 0,26
3. Закручивание МКА – 0,17
4. Энергопитание подсистем МКА – 0,10
5. Создание яркой видимой вспышки в ночном небе – 0,08

6. Общие требования – 0,04

7. Обеспечение физической целостности изделия (силовая конструкция) – 0,03

На рисунках Д.2–Д.8 представлено ранжирование параметров в рамках каждой из семи функциональных подсистем малоразмерного космического аппарата с помощью метода анализа иерархий.

Параметры ГИ № 1 Общие требования	МКА должен быть выведен на НОО	Должен быть обеспечен требуемый тепловой режим бортовой аппаратуры на всех этапах ЖЦИ МКА	Оценки собственного приоритета	Нормализованные оценки собственного приоритета = вектор приоритета (W)	W _i *Сумму столбика j	Лямбда=Сумма(W _i *Сумму столбика j)	ИС=(Лямбда-n)/(n-1)	ОС=ИС/СИ
МКА должен быть выведен на НОО	1,00	0,50	0,71	0,33	1,00			
Должен быть обеспечен требуемый тепловой режим бортовой аппаратуры на всех этапах ЖЦИ МКА	2,00	1,00	1,41	0,67	1,06			
Сумма столбика:	3,00	1,50	2,12			2,06	0,06	#ДЕ.Л/0!

Рисунок Д.2 – Анализ корреляций по МАИ параметров ГИ № 1 на уровне подсистемы «Общие требования»

Стоит отметить, что для матрицы размерности 2, найти соотношение Индекса согласованности к табличному значению Случайного индекса (имеется ввиду ОС – Оценку согласованности) нельзя, так как значение Случайного индекса для 1 и 2 равняется нулю, а на

ноль делить нельзя. Считается, что в случае такой небольшой матрицы суждения выполняются согласованно.

<p align="center">Подсистема параметров ГИ № 1</p> <p align="center">Энергопитание подсистем МКА</p>	<p align="center">Энергоносители должны обеспечить требуемую емкость аккумулятора</p>	<p align="center">Такие энергоносители должны были летать в космос или прошли все необходимые тесты</p>	<p align="center">Оценки собственного приоритета</p>	<p align="center">Нормализованные оценки собственного приоритета = вектор приоритета (W)</p>	<p align="center">W_i*Сумму столбика j</p>	<p align="center">Лямбда=Сумма(W_i*Сумму столбика j)</p>	<p align="center">ИС=(Лямбда-n)/(n-1)</p>	<p align="center">ОС=ИС/СИ</p>
<p>Энергоносители должны обеспечить требуемую емкость аккумулятора</p>	1,00	0,13	0,354	0,11	1,00			
<p>Такие энергоносители должны были летать в космос или прошли все необходимые тесты</p>	8,00	1,00	2,828	0,89	1,06			
<p>Сумма столбика:</p>	9,00	1,13	3,182			2,06	0,06	#ДЕЛ/0!

Рисунок Д.3 – Анализ корреляций по МАИ параметров ГИ № 1 на уровне подсистемы «Энергопитание подсистем МКА»

Параметры ГИ № 1 Создание яркой видимой вспышки в ночном небе	КСК должна создавать яркую видимую вспышку (должна давать как можно более полное облучение видимой стороны Земли)	КСК должна давать как можно более полное облучение видимой стороны Земли	Минимальное потребление электроэнергии	КСК должна быть выполнена из дешёвых и доступных материалов, проста в эксплуатации	Светоотражающий материал КСК должен быть протестирован в космических условиях	Оценки собственного приоритета	Нормализованные оценки собственного приоритета = вектор приоритета (W)	W _i *Сумму столбика j	Лямбда=Сумма(W _i *Сумму столбика j)	ИС=(Лямбда-n)/(n-1)	ОС=ИС/СИ
КСК должна создавать яркую видимую вспышку (должна давать как можно более полное облучение видимой стороны Земли)	1,00	3,00	1,00	1,00	1,00	1,25	0,23	0,99			
КСК должна давать как можно более полное облучение видимой стороны Земли	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	0,42	0,08	1,04			
Минимальное потребление электроэнергии	1,00	3,00	1,00	1,00	1,00	1,25	0,23	0,99			
КСК должна быть выполнена из дешёвых и доступных материалов, проста в эксплуатации	1,00	3,00	1,00	1,00	1,00	1,25	0,23	0,99			
Светоотражающий материал КСК должен быть протестирован в космических условиях	1,00	3,00	1,00	1,00	1,00	1,25	0,23	0,99			
Сумма столбика:	4,33	13,00	4,33	4,33	4,33	5,40			5,00	0,00	0,00%

Рисунок Д.4 – Анализ корреляций по МАИ параметров ГИ № 1 на уровне подсистемы
«Создание яркой видимой вспышки в ночном небе»

Подсистема параметров ГИ № 1 Развертывание КСК	Энергоносители должны обеспечить требуемую емкость аккумулятора	Такие энергоносители должны были летать в космос или прошли все необходимые тесты	КСК должна создавать яркую видимую вспышку (должна давать как можно более полное облучение видимой стороны Земли)	КСК должна давать как можно более полное облучение видимой стороны Земли	Оценки собственного приоритета	Нормализованные оценки собственного приоритета = вектор приоритета (W)	W _i *Сумму столбика j	Лямбда=Сумма(W _i *Сумму столбика j)	ИС=(Лямбда-n)/(n-1)	ОС=ИС/СИ	
	Энергоносители должны обеспечить требуемую емкость аккумулятора	1,00	1,00	3,00	1,00	1,32	0,32	1,06			
	Такие энергоносители должны были летать в космос или прошли все необходимые тесты	1,00	1,00	2,00	1,00	1,19	0,29	1,00			
	КСК должна создавать яркую видимую вспышку (должна давать как можно более полное облучение видимой стороны Земли)	0,33	0,50	1,00	1,00	0,64	0,15	1,08			
	КСК должна давать как можно более полное облучение видимой стороны Земли	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,24	0,97			
Сумма столбика:	3,33	3,50	7,00	4,00	4,14			4,11	0,04	3,98%	

Рисунок Д.5 – Анализ корреляций по МАИ параметров ГИ № 1 на уровне подсистемы «Развертывание КСК»

ОС равняется 4%, значение входит в допустимый диапазон 10–15%, а значит суждение в данной матрице согласованы и полученный результат пересматривать не нужно.

Параметры ГИ № 1 Закручивание МКА	МКА должен закрутиться после того как раскроется отражатель путем выпуска газа через сопла	Закрутить МКА так плавно, чтобы солнечный отражатель не потерял своей формы	Оценки собственного приоритета	Нормализованные оценки собственного приоритета = вектор приоритета (W)	Wi*Сумму столбика j	Лямбда=Сумма(Wi*Сумму столбика j)	ИС=(Лямбда-n)/(n-1)	ОС=ИС/СИ
МКА должен закрутиться после того как раскроется отражатель путем выпуска газа через сопла	1,00	3,00	1,73	0,75	1,00			
Закрутить МКА так плавно, чтобы солнечный отражатель не потерял своей формы	0,33	1,00	0,58	0,25	1,06			
Сумма столбика:	1,33	4,00	2,31			2,06	0,06	#ДЕЛ/0!

Рисунок Д.6 – Анализ корреляций по МАИ параметров ГИ № 1 на уровне подсистемы «Закручивание МКА»

Параметры ГИ № 1 Управление электронными подсистемами МКА	Гарантировать отсутствие ложных срабатываний функциональных подсистем МКА	Электроника должна выполнять свои функции после всех перегрузок, вибраций из-за вывода на орбиту МКА и выхода МКА из ТПК	В случае критического воздействия гамма и рентгеновского излучения, тяжелых заряженных частиц - выполнить свои функциональные задачи	Минимальное потребление электроэнергии	Оценки собственного приоритета	Нормализованные оценки собственного приоритета = вектор приоритета (W)	W _i *Сумму столбика j	Лямбда=Сумма(W _i *Сумму столбика j)	ИС=(Лямбда-п)/(п-1)	ОС=ИС/СИ
Гарантировать отсутствие ложных срабатываний функциональных подсистем МКА	1,00	1,00	3,00	1,00	1,32	0,32	1,06			
Электроника должна выполнять свои функции после всех перегрузок, вибраций из-за вывода на орбиту МКА и выхода МКА из ТПК	1,00	1,00	2,00	1,00	1,19	0,29	1,00			
В случае критического воздействия гамма и рентгеновского излучения, тяжелых заряженных частиц - выполнить свои функциональные задачи	0,33	0,50	1,00	1,00	0,64	0,15	1,08			
Минимальное потребление электроэнергии	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,24	0,97			
Сумма столбика:	3,33	3,50	7,00	4,00	4,14			4,11	0,04	3,98%

Рисунок Д.7 – Анализ корреляций по МАИ параметров ГИ № 1 на уровне подсистемы «Управление электронными подсистемами МКА»

Подсистема параметров ГИ № 1 Обеспечение физической целостности изделия	Масса МКА не должна превышать заданное ограничение	Габариты, покрытие и прочие характеристики МКА должны соответствовать Cubesat Design Specification Rev 13	Материал и конструкция корпуса должен сохранить целостность всех подсистем МКА при действии статических и динамических нагрузок при выведении на околоземную орбиту	Оценки собственного приоритета	Нормализованные оценки собственного приоритета = вектор приоритета (W)	Wi*Сумму столбика j	Лямбда=Сумма(Wi*Сумму столбика j)	ИС=(Лямбда-n)/(n-1)	ОС=ИС/СИ
Масса МКА не должна превышать заданное ограничение	1,00	1,00	2,00	1,26	0,40	1,00			
Габариты, покрытие и прочие характеристики МКА должны соответствовать Cubesat Design Specification Rev 13	1,00	1,00	2,00	1,26	0,40	1,00			
Материал и конструкция корпуса должен сохранить целостность всех подсистем МКА при действии статических и динамических нагрузок при выведении на околоземную орбиту	0,50	0,50	1,00	0,63	0,20	1,00			
Сумма столбика:	2,50	2,50	5,00	3,15			3,00	0,00	0,00%

Рисунок Д.8 – Анализ корреляций по МАИ параметров ГИ № 1 на уровне подсистемы «Обеспечение физической целостности изделия»

В случае с «Обеспечение физической целостности изделия», значение лямбда равняется размерности матрицы, то есть 3. Теория метода анализа иерархий говорит, что чем ближе значение лямбды к размерности матрицы, то тем более согласованы суждения и соответственно полученный результат ранжирования. Поэтому в данном случае не демонстрируется нахождение Индекса согласованности.

Приложение Е

Примеры SysML-диаграмм требований



Рисунок Е.1 – SysML-диаграммы, отражающие параметры ГП, ГЗ

Добавить данные ГИ

Обновить все данные

ГИ 1: Функциональные требования и некоторые инженерные характеристики МКА

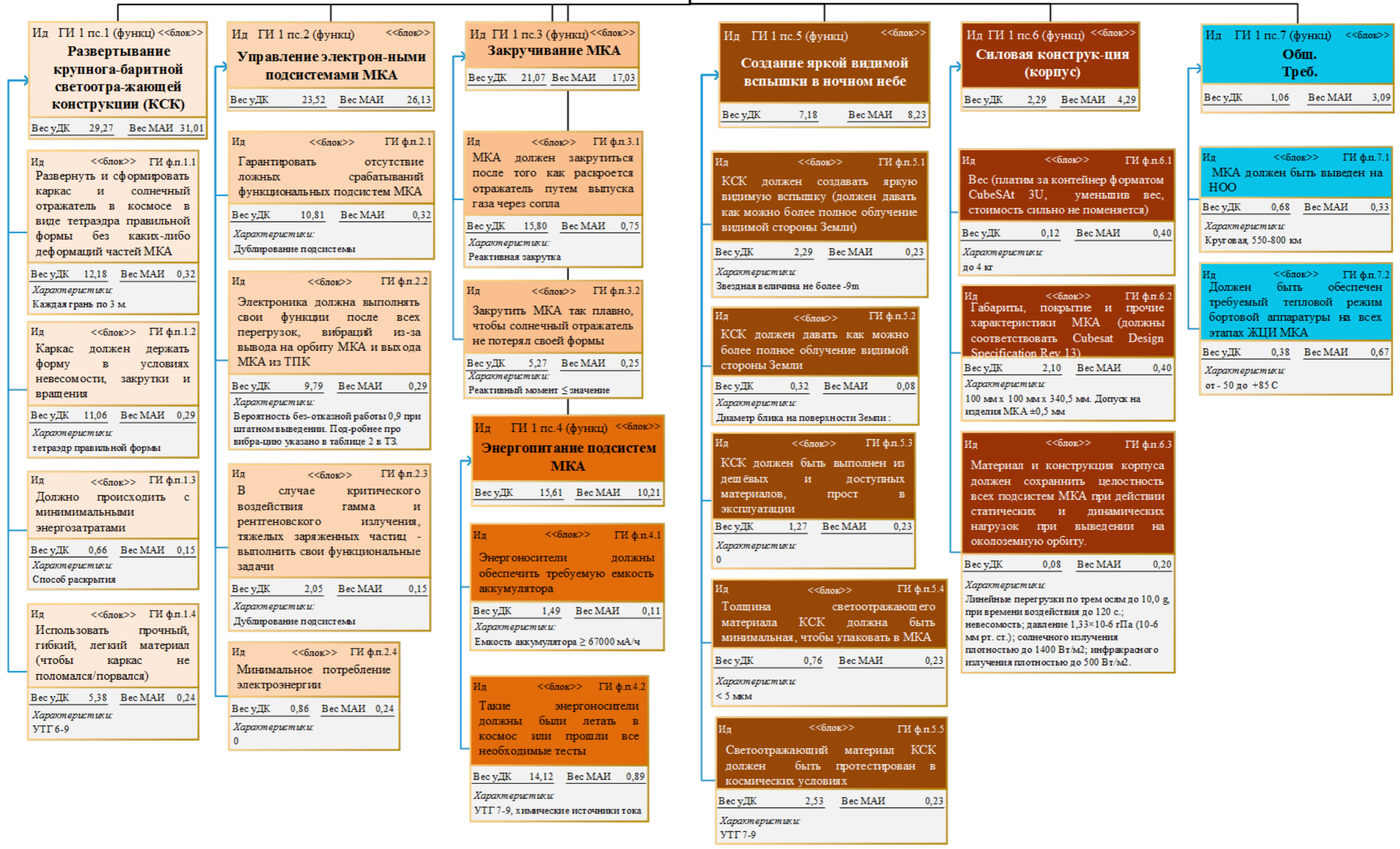


Рисунок Е.2 – SysML-диаграмма, отражающая параметры ГИ № 1

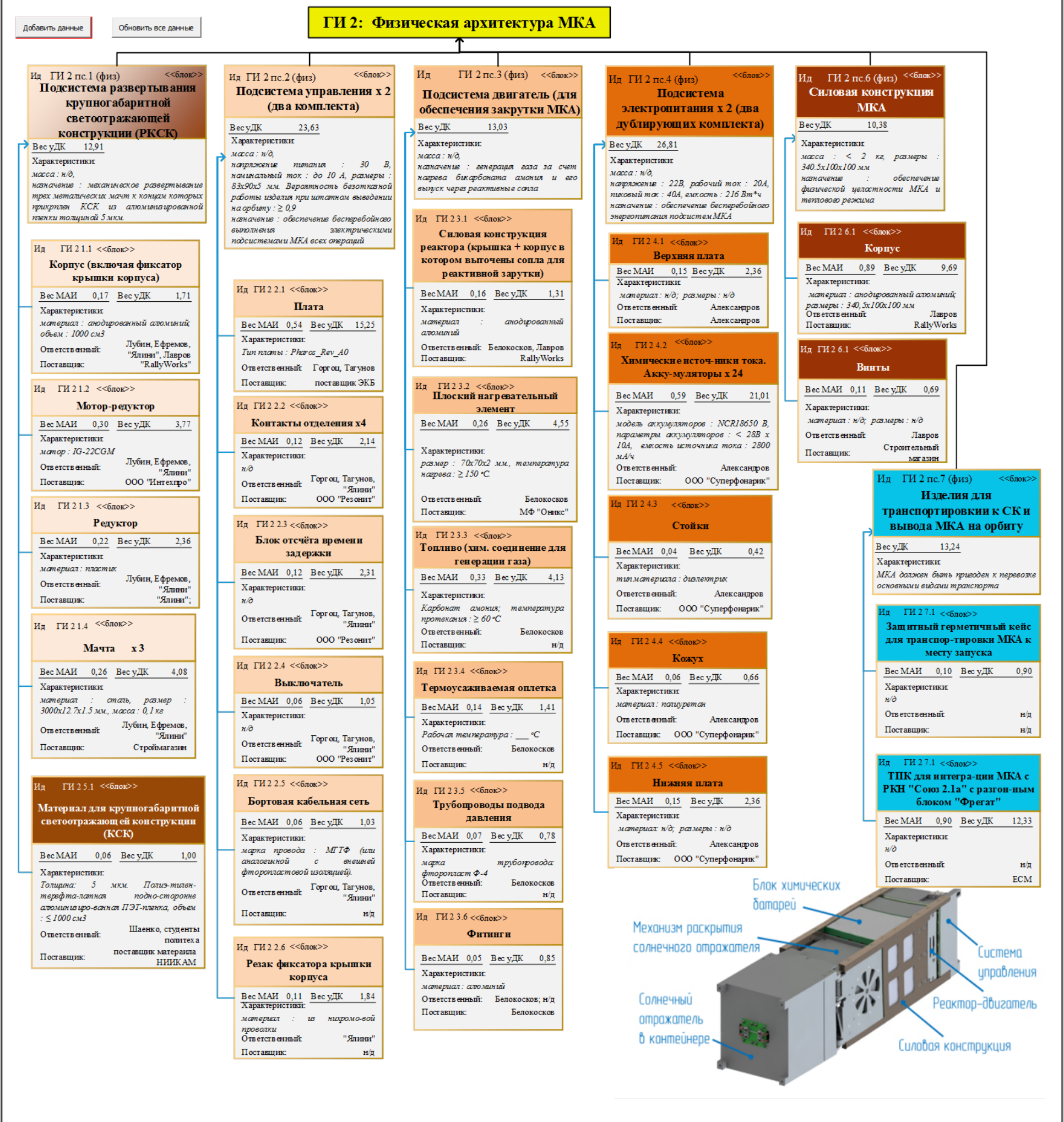


Рисунок Е.3 – SysML-диаграмма, отражающая параметры ГИ № 2

pkg [блоки] ПЭ ЭП № 1 - Разработка ЭП [Состав документов, входящих в ведомость ЭП. Документы необходимые для приемки ЭП заказчиком согласно ГОСТ 2.119 и прочих открытых ГОСТ]

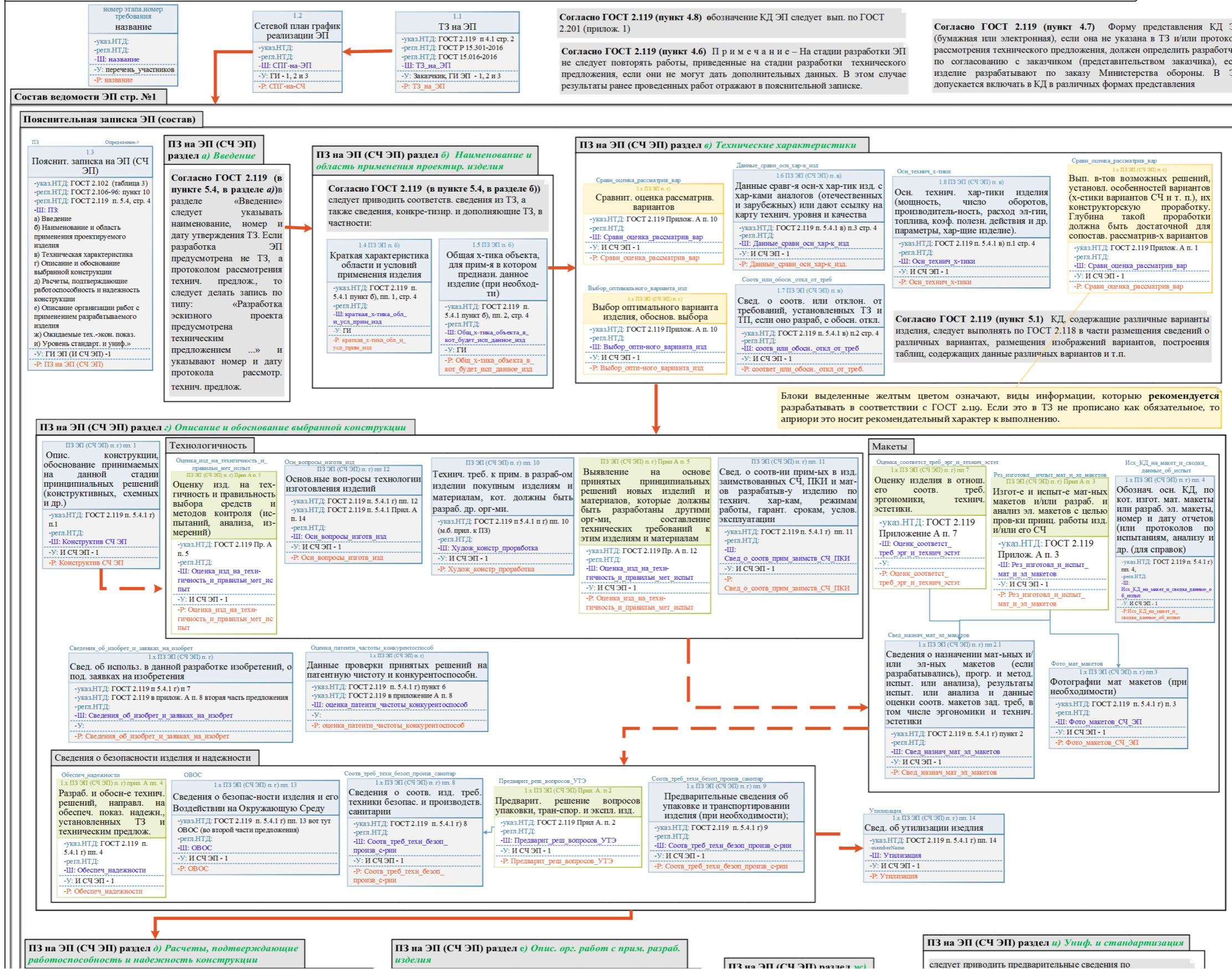


Рисунок Е.4 – Часть SysML-диаграммы, отражающая требования НТД (параметры ГИ № 4)

Приложение Ж

Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2020666348

«Программа для создания файлов-ярлыков формата «.html»
с заданным названием и HTML кодом внутри»

Правообладатель: *Шпотя Денис Александрович (RU)*

Автор: *Шпотя Денис Александрович (RU)*

Заявка № **2020665044**
Дата поступления **23 ноября 2020 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **08 декабря 2020 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности




Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

Приложение И

Акты о внедрении результатов диссертационной работы

Утверждаю
Заместитель генерального директора-
генеральный конструктор
по бортовой аппаратуре, к.т.н.
_____ Г.А. Ерохин
«15» июля 2020 г.



АКТ № 7801/48
о реализации научных положений и выводов диссертации
Шпотя Дениса Александровича

Комиссия в составе:
председателя – начальника отдела 7801 Петрова С.В., членов: заместителя начальника
отдела 7801 Биркина П.А., начальника отделения 71 Мордвинова А.Е. составила настоящий
акт о том, что полученные в кандидатской диссертации Шпотя Д.А. результаты,
включающие:

- 1) Способ автоматизированной разработки SysML-диаграмм требований и обновления
в них информации,
- 2) Унифицированный алгоритм генерирования входных и выходных данных этапов
модернизированной каскадной модели «СФК»,

реализованы в Акционерном обществе «Российская корпорация ракетно-космического
приборостроения и информационных систем» при выполнении составной части опытно-
конструкторской работы «Разработка и изготовление высокоскоростной радиолинии для
российско-белорусского космического аппарата», шифр СЧ ОКР «ВРЛ-РБ».

Использование способа и унифицированного алгоритма при проведении экспертизы
готовности отчетной документации составной части опытно-конструкторской работы на
этапе жизненного цикла проектирования спутниковой аппаратуры «Эскизный проект»
позволило сократить на 10% риски несоответствия отчетной документации требованиям
отраслевой нормативно-технической документации по сравнению с выполнением
аналогичных этапов жизненного цикла опытно-конструкторских работ без использования
вышеуказанного способа и унифицированного алгоритма.

Председатель комиссии:
Начальник отдела 7801 _____ С.В. Петров

Члены комиссии:
Заместитель начальника отдела 7801 _____ П.А. Биркин
Начальник отделения 71, к.т.н. _____ А.Е. Мордвинов

«06» июля 2020 г.

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор Физтех-школы аэрокосмических технологий МФТИ, к.т.н.

С.С. Негодяев
2022 г.



АКТ О ВНЕДРЕНИИ

Настоящим актом подтверждаем, что результаты диссертационной работы Шпота Дениса Александровича на тему: «Системный подход к разработке методического инструментария проектирования технических объектов с помощью модельно-ориентированного системного инжиниринга»:

1. алгоритм приоритизации выходных параметров в модели «Дом качества»;
2. унифицированный комплекс алгоритмов генерирования входных и выходных данных (параметров) этапов конкретизированной каскадной модели СФК;

были внедрены в учебный процесс кафедры Систем, устройств и методов геокосмической физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» и использовались при проведении лекций и практических семинаров в рамках:

1. Зимней Аэрокосмической школы МФТИ для школьников;
2. Учебного курса для магистрантов «Системное проектирование космической техники».

Внедрение полученных в диссертационной работе Шпота Д.А. результатов в учебный процесс позволило расширить теоретические и практические знания школьников и студентов в области получения, обработки, многокритериального анализа, оценки, моделирования на языке SysML и управления требованиями разных элементов проектирования и разработки космических систем с помощью методического инструментария модельно-ориентированного системного инжиниринга.

Заместитель заведующего
кафедрой СУМГФ МФТИ

С.В. Автайкин