

*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)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Долгопрудный – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский физико-технический институт (НИУ)» (МФТИ (НИУ)).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Романов Алексей Александрович**

Официальные оппоненты: **Чистякова Тамара Балабековна**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный технологический  
институт (технический университет)»,  
заведующий кафедрой «Системы  
автоматизированного проектирования  
и управления»  
**Скобелев Петр Олегович**,  
доктор технических наук, доцент,  
Самарский Федеральный исследова-  
тельский центр Российской академии  
наук, главный научный сотрудник

Ведущая организация: Автономная некоммерческая образо-  
вательная организация высшего обра-  
зования «Сколковский институт науки  
и технологий»

Защита состоится «19» сентября 2022 г. в 16 часов 00 минут на засе-  
дании диссертационного совета Д002.226.02 при Институте проблем  
управления имени В.А. Трапезникова Российской академии наук  
(ИПУ РАН) по адресу: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПУ РАН и на  
сайте [www.ipu.ru](http://www.ipu.ru). Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д002.226.02, к.ф.-м.н.



Е.Г. Мусатова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность и степень разработанности темы**

Возрастающая сложность технических объектов обуславливает ужесточение требований и рост объема разрабатываемой документации. В рамках документно-ориентированной парадигмы высок риск разночтений и невыполнения всех требований, что приводит к увеличению сроков и стоимости проектирования. Решение этих проблем актуально для многих отраслей промышленности, к примеру, для аэрокосмической, судостроительной, автомобильной. Для решения проблем и соответствия современным требованиям необходим переход от разрозненных стадий жизненного цикла (ЖЦ) изделия к единому проекту, реализуемому в новой парадигме проектирования широкого класса технических объектов (ТО) с помощью современного и доступного программно-методического обеспечения (ПМО) модельно-ориентированного системного инжиниринга (МОСИ; Model-Based Systems Engineering). В рамках теории систем автоматизации проектирования ПМО МОСИ и результаты использования такого ПМО относятся к стратегии CALS (Continuous Acquisition and Lifecycle Support) и видам обеспечения CALS: лингвистическому, информационному, программному и методическому. К составу перспективного методического инструментария (методов, принципов и средств) МОСИ относятся: язык моделирования SysML (Systems Modelling Language), методика «Структурирование функции качества» («СФК»; Quality Function Deployment) и метод «Дом качества» («ДК»; House of Quality).

SysML обеспечивает абстрактное представление требований, функций и физических параметров, а также ускорение всех процессов системного инжиниринга (СИ). Он также используется для проектирования и создания интегрированных интерактивных программных средств (ПС) взаимодействия проектировщик — система. В 2018 году на первой конференции Стэнфорда по SysML этот язык назван основой создания цифровых двойников. В работах М. Бэджажа, Ф. Тао, А.М. Мадни, А. Фишера, Е. Бруса, Дж. Холквиста, А.И. Боровкова (СПбПУ), А.А. Романова (МФТИ), С.П. Ковалева, А.В. Толока (ИПУ РАН), Д.В. Буздалова (ИСП РАН) показывается, что использование МОСИ (SysML) обеспечивает сокращение сроков создания новых ТО и переход на безбумажный сетевой

документооборот. «СФК» и «ДК» позволяют определять с каким приоритетом выполнять «Что» и «Как» на этапах ЖЦИ (аспектах) проектирования для эффективного инвестирования ресурсов.

SysML, «СФК» и «ДК» обладают рядом недостатков, которые препятствуют использованию МОСИ. Например, SysML-диаграммы не позволяют системно отслеживать все взаимосвязи требований «в» и «между» разными аспектами проектирования; разработка SysML-диаграмм требований занимает до нескольких дней. Доступное для гос. организаций РФ ПМО основанное на SysML — дорогое и сложное. Разработке алгоритмов применения «СФК» («ДК») для проектирования ТО посвящены работы Й. Акао, Г. Мазура, Р. Цультнера, Г. Херцвурма, Х. Шиндо, Д. Мавриса, Р. Фанга. Однако в этих работах модель «СФК» не конкретизирована для проектирования технических объектов в соответствии с подходом SysML и требованиями нормативно-технической документации (НТД), а в приоритизации выходных параметров по алгоритму метода «ДК» количественно не учитываются их корреляции. В 2016 году ведущие зарубежные исследователи и практики «СФК» К. Стэнсфилд и Г. Мазур заявили о намерении объединить «СФК» с модельно-ориентированным проектированием.

Отечественные работы, в основном, посвящены применению «СФК» и «ДК» для анализа требований заказчика. Заслуживают внимания работы М.А. Архиповой и Д.В. Кудрявцева, посвященные модели онтологии «СФК», и работы Р.Р. Куруновой о разработке метода оценки качества спецификаций требований пользователей к ПС.

Эти недостатки и психологическая инерция потенциальных пользователей негативно влияют на изучение, исследование и возможность использования современных инструментов модельно-ориентированного СИ (SysML, «ДК»). В результате, в РФ отсутствуют отечественного производства программно-методические комплексы управления проектными работами ЖЦ, основанные на SysML, а цифровизация промышленности в основном идет по пути внедрения неинтегрированных в единый комплекс CAE/CAD/CAM ИТ систем.

Вышеперечисленное актуализирует **цель диссертационного 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 МОСИ (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 ТО с учетом потребностей пользователей, требований заказчика, к функционалу, к аппаратной и программной частям 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 электронные шаблоны модели «Дом качества», снижающие трудозатраты на их построение на 20%.
7. Синтезировать решения и разработки в единый методический инструментарий МОСИ.
8. Провести верификацию и валидацию решений и разработок на примерах проектирования различных технических объектов.

**Соответствие шифру специальности.** Работа соответствует специальности 05.13.12 «Системы автоматизации проектирования» (САПР) (в отраслях информатики, вычислительной техники и в промышленности) по пунктам паспорта специальности ВАК:

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

цессов 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 СИ, позволяющих снизить затраты на проектирование аппаратно-программных объектов.

**Научная новизна.** Полученные в диссертационном исследовании решения и разработки обладают элементами научной новизны и в совокупности позволяют достичь поставленную цель.

1. Разработан алгоритм приоритизации выходных параметров (требований) в модели «ДК», *отличающийся* усовершенствованием уже существующего алгоритма метода «ДК» 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 «СФК», *отличающаяся* от классической каскадной четырехэтапной модели «СФК» дополнительным этапом, конкретизацией назначений этапов и формализацией перехода между этапами (асpekтами) проектирования.

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

**Достоверность полученных научных результатов** обеспечивается их верификацией и валидацией (ВиВ), проведенными в рамках проектирования спутниковой аппаратуры и информационной системы, а также в рамках экспертиз ОКР. Используются современные **методы исследования** соответствующие цели — инструменты СИ и модельно-ориентированного СИ: опросы, модель Кано, метод анализа иерархий (МАИ), методика «СФК», метод «ДК», язык SysML.

**Теоретическая значимость.**

1. Разработанный алгоритм приоритизации выходных параметров (требований) в модели «ДК» позволяет количественно и согласо-

ванно учесть оценки корреляций выходных параметров и получить иной ранг их приоритизации, повысить контраст весов в два и более раз по сравнению с классическим алгоритмом метода «ДК».

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 САПР в единый комплекс.

3. Конкретизированная модель «СФК» позволяет разрабатывать ТО в соответствии с потребностями пользователей, подходом SysML (требованиями к функционалу, архитектурам программной и аппаратной частей изделия) и требованиями НТД.

4. Разработанный унифицированный комплекс алгоритмов генерирования данных этапов конкретизированной модели «СФК» 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.** Предложенный методический инструментарий МОСИ является научной основой для реализации и развития видов обеспечения CALS-технологий широкой аудиторией пользователей, позволяет решать традиционные и вновь возникающие проблемы, связанные с проектированием ТО.

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 ПС для SysML.

2. Разработанный комплекс алгоритмов генерирования входных и выходных данных для этапов конкретизированной модели «СФК» 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, которые 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 стоимость проекта за счет минимизации на 5–10% рисков несоответствия качества результатов проектных работ этапам ЖЦИ исходным требованиям.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы подтверждается актами о внедрении, полученными от АО «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем» и от МФТИ (НИУ). Созданный методический инструментарий МОСИ использован при выполнении составной части (СЧ) ОКР «Разработка и изготовление высокоскоростной радиопередающей линии для российско-белорусского космического аппарата», шифр СЧ ОКР «ВРЛ-РБ» на этапе «Эскизный проект»; в учебном процессе МФТИ (НИУ) для обучения проектированию спутниковой аппаратуры и ТО; при разработке информационной системы автоматизированной поддержки выполнения работ по созданию спутниковой аппаратуры.

Внедрение показало, что результаты диссертационной работы: повышают скорость реализации этапов ЖЦ 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 и обучение МОСИ (особенно 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 докладывались и обсуждались на научных конференциях МФТИ № 58, 59, 60, 61 (ежегодно с 2015 г.), Первой всероссийской конференции по космическому образованию «Дорога в космос» (ИКИ РАН, 2019 г.), науч-

ных семинарах: ИПУ РАН (2021 г.), кафедры системного инжиниринга МФТИ (с 2018 г.), факультета аэрофизики и космических исследований МФТИ (2019 г.), кафедры РК-6 САПР МГТУ им. Н.Э. Баумана (2022 г.); IX Форуме по цифровизации оборонно-промышленного комплекса России «ИТОПК-2020» (Калуга, 2020 г.), 64<sup>th</sup> EOQ Scientific&Business Quality Congress (SRMEK, 2021 г.), 18<sup>th</sup> WOSC Congress «WOSC2021» (ИПУ РАН, 2021 г.), 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.

**Личный вклад автора.** Постановка задач исследования осуществлялась совместно с научным руководителем. Все результаты, указанные в диссертационной работе, получены автором лично.

**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.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность диссертационного исследования, формулируется научная проблема, заключающаяся в разработке методического инструментария проектирования широкого класса ТО в парадигме модельно-ориентированного СИ с использованием таких инструментов, как методика «Структурирование функции качества», методами и языками моделирования «Дом качества» и SysML. Формулируются цель и задачи. Указываются сведения о научной новизне, достоверности, апробации, внедрении, значимости результатов, положениях, выносимых на защиту.

В **главе 1** определены недостатки и проблемы инструментов МОСИ: SysML, «СФК», «ДК» и ПО для их использования.

Определяется программное обеспечение, доступное широкой аудитории пользователей для использования: SysML — MS Visio (в том числе версия Professional), «СФК» и «ДК» — MS Excel.

Определяются недостатки. В рамках SysML особенно выделяют следующие: 1) большие трудозатраты на разработку

SysML-диаграмм; 2) высокая стоимость внедрения и эксплуатации ПО для SysML. В рамках «СФК» и «ДК»: 1) алгоритм приоритизации требований метода «ДК» не позволяет однозначно приоритизировать выходные параметры (требования); 2) в модели «ДК» пользователь может эффективно управлять ограниченным набором параметров — не более 20–25 параметрами. Определяются производные проблемы.

В главе 2 предлагаются новые подходы к качественному и количественному анализу данных в модели «Дом качества».

Рассматривается новый способ моделирования матриц «Крыльцо» и «Крыша» для обеспечения в них двустороннего качественного анализа корреляций параметров. Классическую структуру этих матриц предложено заменить на структуру матрицы из метода анализа иерархий для проведения попарного сравнения параметров.

Алгоритм «ДК» (см. в табл. 1 формулу (1) и на рис. 1 цифры 1 и 2), не учитывает корреляции выходных параметров (подписано цифрой 3). Это не позволяет учесть все факторы, способные влиять на веса приоритизации  $B_j$  выходных параметров  $j$ . Для преодоления этого недостатка синтезирован новый алгоритм приоритизации (см. формулу (2)), названный «усовершенствованный ДК» («уДК»). Алгоритм «уДК» позволяет, по сравнению с «ДК», учитывать корреляции параметров и тем самым повышает контраст весов приоритизации.

Табл. 1. Формулы приоритизации по алгоритмам «ДК» и «уДК»

Алгоритм	Классический алгоритм «Дом качества»	Усовершенствованный алгоритм «Дом качества»
Формула	$B_j = \sum_i (T_i * a_{ij}), (1)$	$B_j = (\sum_i (T_i * a_{ij})) * (S_{1...n} * e_j), (2)$
<p>где <math>B_j</math> — вес приоритизации <math>j</math>-го выходного параметра (требования заказчика («Голос заказчика» (ГЗ)) или инженеров («Голос инженера» (ГИ)) заданного аспекта (этапа ЖЦ) проектирования ТО; <math>j</math> — все отдельно взятые выходные параметры модели «ДК» от 1 до <math>n</math>; <math>T_i</math> — нормализованный вес важности отдельно взятого входного параметра (потребности пользователей («Голос пользователей» (ГП)) или ГЗ) в модели «ДК»; <math>i</math> — все отдельно взятые входные параметры от 1 до <math>n</math>; <math>a_{ij}</math> — коэффициент степени зависимости <math>i</math>-го входного параметра от реализации <math>j</math>-ого выходного параметра; <math>S_{1...n}</math> — подсчитанная с помощью математического аппарата метода анализа иерархий оценка корреляции выбранной категории выходных параметров; <math>e_j</math> — подсчитанная с помощью математического аппарата МАИ количественная оценка корреляции <math>j</math>-го выходного параметра в выбранной категории.</p>		

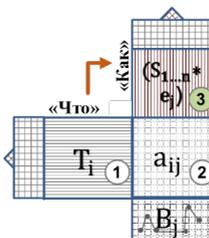


Рис. 1. Концептуальная модель метода «Дом качества»

ВиВ результатов диссертационной работы показаны в главе 5.

В главе 3 описывается способ автоматизации разработки SysML-диаграмм требований и обновления в них информации.

Проведен аналитический обзор SysML (включая его роль в создании интегрированных (общих) моделей систем (ИМС)). Анализ SysML-ПО (MS Visio (Professional)) показал, что оно содержит библиотеки графических фигур языка UML (предшественник SysML) и позволяет: 1) синхронизировать графические фигуры с данными из таблиц MS Excel; 2) разрабатывать новые фигуры. С учетом этого, автором предложен способ автоматизации разработки SysML-диаграмм требований и обновления в них информации. Способ поделен на 4 алгоритма действий (см. рис. 2).

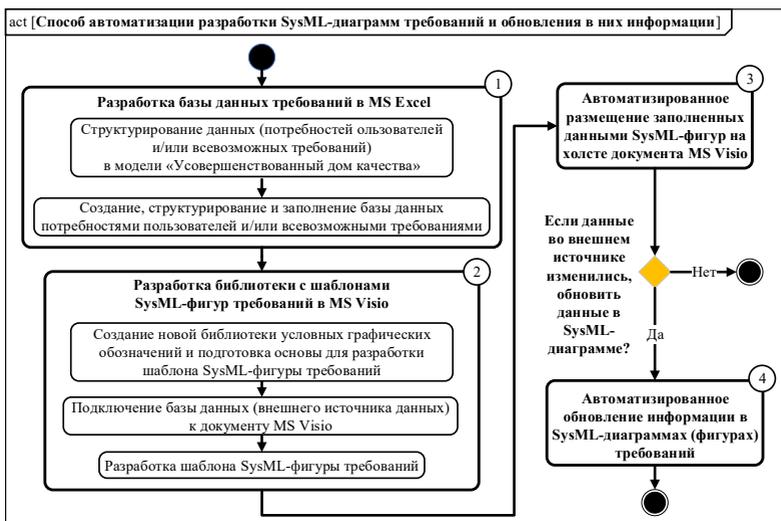


Рис. 2. SysML-диаграмма действий, отражающая способ автоматизации разработки и обновления SysML-диаграмм требований

В **Главе 4** разработана модель «усовершенствованное Структурирование функции качества» («уСФК»), конкретизирующая классическую модель «СФК» для проектирования ТО в соответствии с требованиями заказчика, основанными на потребностях пользователей, с подходом SysML и с требованиями НТД. Разработан комплекс алгоритмов: унифицированный алгоритм и основанные на нем алгоритмы генерирования входных и выходных данных для этапов модели «уСФК», а также электронные шаблоны модели «ДК».

Этапы новой модели «уСФК» были изменены в рамках назначения, что отразилось на количестве этапов и их названиях:

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

«**уДК № 1**»: проектирование поведения (функционала) изделия (*перенос или формулировка требований заказчика – определение функций изделия и требований к ним (голос инженера (ГИ) № 1)*);

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

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

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

Получен унифицированный алгоритм генерирования входных и выходных данных этапов модели «уСФК». Он основан на синтезе инструментов модельно-ориентированного СИ из глав 2, 3 с практиками и инструментами СИ. Назван «усовершенствованное **СФК** для усовершенствованного **ДК**» (см. рис. 3). Алгоритм поделен на пять элементов: 1) «**Вход**» — исходные данные; 2) «**Выход**» — приоритизированные данные (параметры ГЗ или ГИ № 1–4); 3) «**Управляющее воздействие**» по итогам верификации и валидации; 4) «**ПС для цифровой обработки данных**»; 5) «**Генерация данных**» — определение «области проблем» (к примеру параметров ГП) и их перевод в «область решений» (в параметры ГЗ; или параметров ГЗ в параметры ГИ). Для этого использованы следующие инструменты:

- **Получение данных:** описание проекта, контекстная диаграмма, интервью, опросы, мозговой штурм.
- **Качественный анализ:** вербальный анализ системных требований (ВАСТ), схемы деления, морфологическая матрица альтернатив, SysML-модели (требований, поведения и структур), SWOT-анализ, диаграмма N2, модель Кано.
- **Количественный анализ:** МАИ; метод «Дом качества».



Рис. 3. Унифицированный алгоритм генерирования входных и выходных данных для этапов конкретизированной модели «СФК»

На основе конкретизации алгоритма «уСФК для уДК» было разработано пять алгоритмов, предназначенных для получения параметров ГП, ГЗ, ГИ № 1–4. Алгоритмы названы «уСФК для уДК № 0–4». В рамках каждого алгоритма: 1) получено описание физического смысла алгоритма, которое было формализовано (см. ниже пример формул (3) и (4)); 2) разработана рекомендованная структура шаблона модели «уДК № 0; 3») разработана концепция рамочного (обобщенного) алгоритма и определен порядок ее реализации.

$$\left\{ \overline{iHoQCR}_m^* \right\} [FRA_{mn}] = \overline{HoQFR}_n^*, \quad (3)$$

$$\left\| \frac{\overline{(FSR}_a^* \cdot FR_{j_a}^* \cdot HoQFR_{j_a})}}{\sum_{a=1}^f \sum_{j_a} FSR_a^* \cdot FR_{j_a}^* \cdot HoQFR_{j_a}} \right\| = \left\| \overline{iHoQFR}_n^* \right\| = 1, j_a = \overline{1, n_a} \quad (4)$$

где  $CR$  — требования заказчика (от англ. «Customer Requirements»);  
 $iHoQCR_m^*$  —  $m$ -вектор нормализованных весов приоритизации параметров ГЗ, подсчитанных в модели «УДК № 0»;

$FR$  — требования к функциям изделия (от англ. Functional Requirements) или голос инженера (в «УДК № 1» и «УДК № 2» — это ГИ № 1);  
 $[FRA_{mn}]$  — центральная матрица модели «УДК № 1» размерностью  $mn$  с числовой оценкой зависимости удовлетворения каждого параметра ГЗ от достижения каждого параметра ГИ № 1;

$HoQFR_n^*$  —  $n$ -вектор ненормализованных весов приоритизации параметров ГИ № 1 (выходных параметров), подсчитанных по классическому алгоритму «Дом качества»;

$j_a$  — номер столбца центральной части 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 параметров ГИ № 1 (от англ. Functional Subsystem Requirements), подсчитанный с помощью математического аппарата метода анализа иерархий;

$FSR_f^*$  — 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  $a$ -ой категорий (подсистемы);

$FR_{n_a}^*$  — вектор размерности  $n_a$ , состоит из весов параметров ГИ № 1;  
 $iHoQFR_n^*$  —  $n$ -вектор нормализованных весов приоритизации параметров ГИ № 1, подсчитанных в соответствии с алгоритмом «УДК».

В **главе 5** показано, что разработанный методический инструментарий МОСИ соответствует требованиям к его ВиВ.

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

- 1) удовлетворяют требованиям, указанным в плане ВиВ;
- 2) совершенствуют процессы проектирования новых ТО с помощью современных инструментов МОСИ («СФК», «ДК», SysML), сокращают сроки создания новой техники;
- 3) повышают эффективность ПС и реализуются с помощью ПС, доступных широкой аудитории пользователей;
- 4) являются научно-методической основой, которую целесообразно учитывать при проектировании новых средств взаимодействия

проектировщика с системой — комплексов интегрирования целевых программ и САПР (CALS–технологий);

5) способствуют переходу на безбумажные сетевые формы документооборота и повышают качество проектных работ.

Основные ВиВ проводились на примере проектирования мало-размерного космического аппарата (МКА) «Маяк» в соответствии с планом (частично представлен в табл. 2) и с помощью таких методов, как: анализ (А), инспекция (И), демонстрация (Д), тест (Т).

Табл. 2. Сокращенный план ВиВ полученных решений и разработок

Номер главы, название результата исследования	Требование к верификации, валидации или ВиВ	Метод			
		А	И	Д	Т
Глава 4, унифицированный алгоритм генерирования данных для этапов конкретизированной модели «СФК».	ВиВ. Основанные на унифицированном алгоритме алгоритмы должны обеспечить получение, качественный и количественный анализ параметров ГП, ГЗ и ГИ.	А	—	Д	—
Глава 2, алгоритм приоритизации выходных параметров в модели «ДК»/«ДК» для идентификации критически важных параметров.	ВиВ. Алгоритм «удК» должен обеспечить: 1) повышение контрастности весов выходных параметров в два и более раз (по сравнению с алгоритмом «ДК») и 2) идентификацию критически важных параметров.	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 минут.	—	—	Д	Т
Глава 5, ВиВ решений и разработок данного диссертационного исследования.	Верификация. Решения и разработки должны быть синтезированы и реализованы как единый методический инструментарий.	—	—	Д	—

Для ВиВ унифицированного алгоритма генерирования данных для этапов конкретизированной модели «СФК» («уСФК») были использованы основанные на нем алгоритмы «уСФК для удК № 0 и 1». На этапе «удК № 0» была получена информация о том «Что» нужно — проведены: опросы, интервью, мозговые штурмы с заказчиком и участниками проекта. С помощью инструмента «Вербальный анализ системных требований», данные были отсортированы по двум группам «Что» и «Как», и проведен анализ причин их появления (рис. 4).

Благодаря схемам деления «работ» и «продукта» из группы «Что» получено 2 потребности пользователей и 6 требований заказчика. Из группы «Как» сформулировано 22 инженерных требования, 7 подсистем МКА. Полученные потребности пользователей, требования заказчика и инженеров были структурированы в моделях «уДК № 0, 1, 2». Использование электронных шаблонов «ДК» продемонстрировало реализацию модели «уСФК», а также обеспечило сокращение трудозатрат на их разработку на 20% (экспертная оценка).

Пожелания к МКА от заинтересованных сторон и заказчика			Причина пожелания - выделения «корня» причины (конкретного требования).
	ЧТО	КАК	
Бюджет программы космического эксперимента менее 15 млн. рублей.			Летный образец должен стоить меньше 700 тыс. руб
Отражатель спутника должен быть довольно большим, чтобы отражения Солнца на Земле тоже были большими.			Должен давать как можно более полное облучение видимой стороны Земли.

Рис. 4. Пример использования инструмента «ВАСТ»

Параметры ГП и ГЗ были качественно и количественно проранжированы с помощью модели Кано и МАИ. Ранжирование показало, что для численного анализа надежнее использовать МАИ, а если требуется найти требование, вызывающее у пользователей яркие эмоции и выделяющее продукт на фоне конкурентов, то модель Кано.

Также продемонстрировано, что основанные на унифицированном алгоритме «уСФК для уДК» алгоритмы позволяют единообразно получать, параметры ГП, ГЗ и ГИ. Таким образом, были выполнены требования из плана ВиВ к модели «уСФК», электронным шаблонам модели «уДК» и унифицированному алгоритму.

ВиВ алгоритма приоритизации выходных параметров в модели «ДК» («уДК») демонстрируется на примере параметров ГИ № 1. Они были приоритизированы по формуле (2) с учетом количественных оценок их корреляций, а затем проведены анализы весов. Первый анализ заключался в том чтобы понять, как в рамках заданной подсистемы ее параметр с наибольшим значением веса соотносится с весами других параметров. Так, соотношение весов приоритизации в рамках подсистемы «Энергопитание подсистем МКА», полученных по алгоритму «ДК» — 1,18, по «уДК» — 9,47.

В рамках второго анализа рассматривался ранг весов приоритизации. Было показано, что алгоритм «уДК» обеспечивает по сравнению с алгоритмом «ДК», иной ранг весов (см. таблицу 3).

Для проверки корректности приоритизации была проведена инспекция разработки МКА. Она выявила, что изначально ход разработки МКА совпал с результатами приоритизации по алгоритму «ДК» — МКА надо реализовать через «подсистема солнечный отражатель». Ее синтез обернулся угрозой ликвидации проекта. Алгоритм «уДК» показал, что МКА надо реализовывать через «подсистема развертывания крупногабаритной светоотражающей конструкции», что и было позже выполнено. Дополнительные ВиВ были также проведены на примере проектирования информационной системы. Так, было показано, что алгоритм «уДК», в отличие от «ДК», обеспечивает иной ранг весов приоритизации выходных параметров (требований) в модели «ДК», повышает контрастность весов приоритизации в два и более раз, что обеспечивает идентификацию критически важных выходных параметров и делает целесообразным его использование в проектировании ТО широкого класса.

Табл. 3. Сокращенная таблица весов приоритизации ГИ № 1

<b>Параметры ГИ № 1 - функциональные подсистемы МКА</b>	<b>Вес</b>	<b>Ранг</b>		<b>Вес</b>
<b>Алгоритм приоритизации:</b>	<b>ДК</b>		<b>уДК</b>	
Подсистема № 1: Развертывание крупногабаритной светоотражающей конструкции (КСК)	18,25	<b>II</b>	<b>I</b>	29,27
Подсистема № 2: Управление электронными подсистемами МКА	17,81	<b>III</b>	<b>II</b>	23,52
Подсистема № 3: Закручивание МКА	13,54	<b>V</b>	<b>III</b>	21,07
Подсистема № 4: Энергопитание подсистем МКА	15,71	<b>IV</b>	<b>IV</b>	15,61
ПдС № 5: Создание яркой видимой вспышки в ночном небе	22,49	<b>I</b>	<b>V</b>	7,18

Для верификации способа автоматизации разработки SysML-диаграмм требований, способ был использован для моделирования параметров ГП, ГЗ и ГИ. Для этого были разработаны структуры баз данных (рис. 5) и соответствующие SysML-фигуры, отражающие параметры ГП, ГЗ (рис. 6) и ГИ (требования к функциям (рис. 7) и к структурам АЧ/ПЧ, требования НТД к ЖЦ изделия).

ид	Потребности	Кано	МАИ	Текст=	удК
Т.зак.1	Видимость с Земли	Т	44,61	Спутник должен быть виден с Земли как самая яркая звезда на ночном небе (с звездной величиной в вспышке - 8 m)	75,4

Рис. 5. Сокращенный пример структуры БД с параметрами ГЗ

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)			

Рис. 6. SysML-фигура, отражающая требование заказчика (параметр ГЗ)

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

Рис. 7. SysML-фигура с функциональным требованием к МКА

Для валидации способа был проведен экспериментальный анализ трудозатрат на выполнение операций при разработке SysML-диаграмм требований классическим и новым способами (см. табл. 4).

Табл. 4. Сравнение способов создания SysML-фигур требований

Операции	Недостатки и преимущества способов	
	Традиционный	Автоматизированный
Создание заполненных 300 SysML-фигур	От нескольких дней до нескольких недель	От нескольких минут до нескольких часов
Массовое и точное обновление информации в 300 SysML-фигурах требований	От нескольких часов и более, в связи с ошибками и итерациями из-за их исправления	От нескольких секунд до нескольких минут, как правило, без ошибок и итераций

Эксперимент подтвердил, что новый способ позволяет снизить трудозатраты на разработку SysML-фигур требований — пользователи могут на основе текстовых документов и с помощью ПО MS Visio и Excel быстро (автоматизировано) формировать SysML-диаграммы. В рамках развития лингвистического обеспечения CALS, это означает повышение эффективности функционирования и совершенствование процессов проектирования новых изделий с помощью современных научно-методических основ моделирования, информационных технологий, ПО, доступных широкой аудитории пользователей. Способ повышает эффективность функционирования MS Visio и позволяет, в сравнении с ПО от Siemens PLM, Dassault

Systems, IBM сокращать в два-три раза финансовые затраты на внедрение и обучение МОСИ (SysML).

Также была проведена валидация разработанных SysML-моделей требований НТД к этапам ЖЦИ, которая заключалась в их использовании в экспертизе соответствия результатов (документации) ОКР этапа «Эскизный проект» требованиям отраслевой НТД. Создание и использование таких моделей соответствует развитию информационного обеспечения CALS. Благодаря использованию SysML-модели (неавтоматизированным способом) экспертиза была выполнена за два часа вместо нескольких дней. В каждой экспертизе было идентифицировано от 5 до более 10 несоответствий результатов ОКР требованиям НТД. Иными словами, полученные результаты позволяют повысить соответствие отчетных документов требованиям НТД на 5–10%, сократить трудозатраты на планирование проектов-аналогов примерно на 60%. Если учесть, что срыв сдачи проекта из-за его несоответствия требованиям может стоить разработчику больших штрафов, то использование разработанного способа становится актуальным и целесообразным.

Так, было показано, что способ удовлетворяет предъявляемому к нему требованию по ВиВ — сокращает трудозатраты на построение SysML-диаграмм требований до нескольких часов.

Для преодоления двух недостатков SysML и «ДК», а именно:

- 1) SysML-диаграммы требований не позволяют отследить все взаимосвязи требований «в» и «между» аспектами проектирования,
  - 2) человек может эффективно воспринимать, анализировать и управлять в модели «ДК» не более 20–25 параметрами,
- было предположено, что использование SysML-диаграмм требований компенсирует недостаток, связанный с «ДК», а модель «ДК» компенсируют недостаток, связанный с SysML. Для этого проведен эксперимент по их объединению на базе MS Excel (см. рис. 8).

Объединение подтвердило эффективность коммуникации данных (параметров) из модели «ДК» с помощью SysML-диаграмм и отслеживания всех взаимосвязей параметров с помощью модели «ДК».

В результате были выполнены требования плана ВиВ, а также финальный синтез всех диссертационных разработок и решений в единый методический инструментарий МОСИ. Учитывая указанные выше преимущества, можно утверждать, что полученный методический инструментарий развивает лингвистический и методический

виды обеспечения CALS-технологий и позволяет повысить скорость реализации этапов ЖЦ проектирования будущих проектов на 5–10%.



Рис. 8. Пример (сокращенный) синхронизации модели «усовершенствованный ДК № 1» с SysML-диаграммой требований

Дополнительные ВиВ методического инструментария МОСИ выполнены на примере реализации алгоритма создания интегрированной модели системы. Они продемонстрировали целесообразность использования полученного методического инструментария МОСИ, с одной стороны, для доступного и быстрого его внедрения в проектную деятельность, а с другой стороны, для изучения и проектирования новых ПС взаимодействия проектировщика с системой, основанных на интеграции ПС и САПР в единую систему автоматизации процессов различных аспектов проектирования технических объектов и управления (документирования) проектными работами ЖЦ.

В **заключении** изложены основные результаты и перспективы дальнейших исследований тематики диссертационной работы.

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 ЖЦ изделия (асpekтами проектирования), метод «Дом качества» для приоритизации выходных параметров этапов ЖЦ изделия. Разработанный 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 учебном процессе 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 метода анализа иерархий. Разработанный алгоритм «усовершенствованный ДК» по сравнению с классическим алгоритмом «ДК», 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 разработки с нескольких дней до нескольких часов; 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).

Показано, что полученные результаты развивают теорию САПР в области лингвистического и методического обеспечения CALS-технологий (информационной поддержки изделий на этапах ЖЦ), создают научную основу для развития и разработки информационного и программного обеспечения CALS-технологий.

Вышесказанное обуславливает актуальность дальнейшего развития полученных результатов, которые будут сосредоточены на разработке научных основ проектирования и создания программно-методического обеспечения для реализации полнофункциональной концепции «интегрированной модели системы», обеспечивающее комплексное и сетевое проектирование технических объектов в парадигме модельно-ориентированного системного инжиниринга.

## ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### **В изданиях из Перечня ВАК 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.

### **Статья в сборнике конференции, индексируемый Scopus**

3. 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.

### **В других изданиях из Перечня ВАК РФ**

4. 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.

### **В других рецензируемых научных изданиях**

5. 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.

6. 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.

### **Научно-практические труды, запатентованные в 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.

*Научное издание*

**Шпотя Денис Александрович**

**СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ  
МЕТОДИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАРИЯ  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ  
С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО  
СИСТЕМНОГО ИНЖИНИРИНГА**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать 30.06.2022. Формат 60×90/16.

Усл. печ. л. 1,5. Уч.-изд. л. 1,0.

Бумага офсетная. Тираж 100 экз. Заказ № 783140.

---

Типография «Копирка»  
123022, ул. 1905 года, 7с1  
Россия, Москва  
<https://kopirka.ru/>