

# МЕТОДИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО СИСТЕМНОГО ИНЖИНИРИНГА ДЛЯ СИНТЕЗА С СОВРЕМЕННЫМИ ОТЕЧЕСТВЕННЫМИ CALS- СИСТЕМАМИ

**Д.А. Шпотя**

*Московский физико-технический институт (НИИУ)*  
Россия, 141701, Московская область, Долгопрудный, Институтский переулок, 9.  
E-mail: denis.shpotya@yandex.ru

**А.А. Романов**

*Московский физико-технический институт (НИИУ)*  
Россия, 141701, Московская область, Долгопрудный, Институтский переулок, 9.  
E-mail: romanov48@yandex.ru

**Ключевые слова:** CALS, МОСИ, системный инжиниринг, СФК, МАИ, SysML, MBSE.

**Аннотация:** Доклад подготовлен для ВСПУ-2024 в рамках секции по автоматизированному проектированию. Цель авторов доклада передать экспертному сообществу понимание о том, что результаты исследования и разработок авторов в области методического инструментария модельно-ориентированного системного инжиниринга (МОСИ) актуально синтезировать с активно разрабатываемыми сейчас в России интегрированными программными средами на основе CALS-технологий. Во введении доклада кратко рассматриваются проблемы, связанные с устойчивым развитием крупных промышленных компаний, выполняющие научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР). Приводится обоснование решения этих проблем за счет автоматизации бизнес-процессов с помощью CALS-технологий и МОСИ. В основной части доклада определяется соответствие использования методического инструментария МОСИ (методики Структурирование функции качества (СФК), метода Дом качества (ДК), языка Systems Modelling Language (SysML) и методического, лингвистического, информационного и программного видов обеспечения CALS-технологий. Кратко приводятся недостатки указанного методического инструментария МОСИ и результаты его модернизации и разработки нового, а затем рассматриваются его верификация и валидация на примере разработки части интегрированной модели системы (ИМС) по управлению требованиями нормативно-технической документации для выполнения опытно-конструкторских работ в области спутнико-строения. В конце доклада кратко обосновывается целесообразность синтеза разработок и опыта авторов с CALS-системами современных российских компаний-разработчиков.

## 1. Введение

Сегодня в эпоху развития и распространения САПР по различным аспектам инженерной деятельности (CAD, CAE, SCM, CAM, CRM, PDM, ERP, PLM и т.д.) все более широкая аудитория пользователей этих систем становится способной создавать

технические объекты (ТО). Такие ТО, которые благодаря маркетинговым технологиям, преподносятся как нечто очень качественное и конкурентно-способное, что на самом деле, как правило могут быть не готовы для серийного производства и не соответствовать качеству приемки изделия государственным заказчиком. И это, в определенном смысле, создает иллюзию самодостаточности и успешности стартапов и необоснованную критику в адрес подхода к управлению и функционированию гос. компаний.

Эта иллюзия успеха, часто ассоциируемая с тем, что эти небольшие команды работают в каком-то особом программном обеспечении (ПО) и выполняют меньшее количество бизнес-процессов. Такая мысль захватывает умы управленцев разного уровня и побуждает их искать мифическое ПО, вместо того, чтобы искать, изучать, развивать и внедрять в отношении своих бизнес-процессов по проведению НИОКР, в первую очередь, методическое, лингвистическое, информационное виды обеспечения CALS-технологий и только затем искать или заказывать под себя ПО. Как правило, управленцы идут от обратного – ищут сразу готовое ПО. После закупки нового ПО, предприятия, начинают судорожно проводить пилотные проекты и затем «ломать», пытаясь перестроить, существующие бизнес-процессы, которые были отработаны годами ранее. А с учетом того, что лица принявшие решения о закупке ПО и методологи бизнес-процессов предприятия могут еще и поменяться, то такое ПО может меняться по разным причинам несколько раз за последующие 5-10 лет, со всеми вытекающими проблемами из-за увеличения неопределенности и запутанности.

Отсутствие устойчивого процесса преемственности поколений исследователей, проектировщиков и разработчиков, производителей и их разрозненность между собой по разным этапам ЖЦ приводит к тому, что сданная в архив конструкторская и программная документация (КД и ПД) не может быть по разным причинам воспроизведена.

Для решения вышеперечисленных проблем и в условиях, когда необходимо гарантировать полное соответствие технического объекта требованиям, **необходимо осуществить переход от разрозненных стадий жизненного цикла (ЖЦ) изделия к единому проекту, реализуемому в новой парадигме проектирования изделий с помощью отечественного и доступного программно-методического обеспечения (ПМО) основанного на МОСИ**. Такое ПМО обеспечит создание так называемых «еди-ных источников правды» (интегрированных моделей систем) о разрабатываемых изделиях, характеризующиеся описаниями технических объектов с нескольких точек зрения: 1) всевозможных требований (к примеру, требований ГОСТ), 2) выполняемых функций, 3) физической и программной архитектур изделия и их параметрического описания.

Реализация таких описаний ТО подразумевает создание с указанных точек зрения специальных абстрактных моделей и подкрепление их моделями, разрабатываемыми в целевых САПР. **Синтез и синхронизация абстрактных моделей с моделями из целевых САПР в единое целое позволит нам создавать цифровые двойники изделий.**

Данным докладом в рамках секции по автоматизированному проектированию на ВСПУ-2024, **мы, демонстрируя наши исследования и разработки** в области методического инструментария МОСИ и CALS, **а также раскрывая их актуальность** для реализации НИОКР, **добиваемся** расширения исследований и распространения разработок в этих направлениях науки. В результате доклада и его обсуждений мы хотим получить поддержку экспертов в имплементации наших разработок и опыта в развивающиеся в РФ интегрированные программные среды (CALS-системы).

Несмотря на работы А.И. Боровкова (СПбПУ) [1, 2], С.П. Ковалева, А.В. Толока (ИПУ РАН) [3], Д.В. Буздалова (ИСП РАН) [4] в которых доказывается, что использование МОСИ (SysML) обеспечивает сокращение сроков создания новых ТО,

направления МОСИ и CALS очень слабо распространены в ведущих ВУЗах и в промышленности РФ.

## 2. Разработка методического инструментария МОСИ, его текущая и будущая реализация на практике

### 2.1. CALS-технологии и методический инструментарий МОСИ

Идея CALS основана на синтезе функционала систем маркетинга (CRM), планирования, проектирования и конструирования (CAE, CAD), производства (CAM) и управления в единое информационное пространство для повышения эффективности и обеспечения информационной согласованности всех участников процесса создания и использования ТО [5]. Такой синтез можно рассматривать как производство цифрового двойника. Но **главная проблема** построения таких интегрированных программных средств – это **обеспечение единообразного описания и интерпретации данных**.

Для решения этой проблемы, в рамках методического инструментария МОСИ (который определяется, как методология создания системной модели для поддержки, анализа, верификации и валидации требований разных аспектов проектирования и разработки на всех этапах ЖЦИ [6]), перспективными инструментами являются: язык SysML, методика СФК и метод ДК [7], которые соответствуют лингвистическому и методическому видам обеспечения, а их применение, подразумевает разработку информационного и программного видов обеспечения CALS-технологий.

**2.1.1 Язык SysML.** SysML это язык общего назначения для графического моделирования, поддерживающий: анализ, описание, детализацию, проектирование/разработку, верификацию и валидацию сложных систем. Этот язык основа МОСИ.

SysML развивается с 2000-х годов [8]. В 2018 на первой конференции Стэнфордско-го университета по SysML он был назван основой создания цифровых двойников (ЦД) и искусственного интеллекта (ИИ). К июню 2023 года более 200 специалистов из множества НИОКР компаний (в том числе аэрокосмических: Airbus, Boeing, JPL, MITRE, IBM и других) разработали и опубликовали бета версию SysML 2.0 [9].

**2.1.2 Методика СФК и метод и язык ДК.** Методика СФК это методика, состоящая из рамочной модели ЖЦ, и языка и метода графического моделирования «Дом качества». Метод и язык ДК – это язык графического моделирования для построения нескольких взаимосвязанных таблиц и матриц в форме «дома», которые позволяют анализировать и приоритизировать требования заказчика и переводить их в требования разработчиков.

Методика СФК была представлена в рамках тотального управления качеством (ТУК) для повышения эффективности коммуникации между подразделениями компаний за счет связи требований заказчика с НИОКР и производственными решениями. СФК была признана самым полезным инструментом в области ТУК.

**2.1.3 Распространение в РФ и текущие ограничения указанного методического инструментария МОСИ.** SysML преподают в Сколтех и МФТИ. СФК и ДК преподают и изучают в МФТИ, Самарском НИУ имени академика С.П. Королева [10], УГАТУ.

Несмотря на исследования и разработки, демонстрирующие большой потенциал инструментов МОСИ, существуют недостатки, которые препятствуют их повсеместному использованию в проектировании изделий. Вот примером некоторых из них:

1. Создание модели ДК и SysML-диаграмм требует трудозатрат от дней до недель.

2. SysML-диаграммы не позволяют наглядно отслеживать все взаимосвязи требований.
3. В РФ нет доступного ПМО МОСИ, для использования SysML.
4. SysML-модели не являются официальными документами, но требуют трудозатрат сопоставимые с разработкой официальных документов.
5. ДК не позволяет идентифицировать критически важные требования.
6. Отсутствуют методические материалы и примеры внедрения SysML в РФ.

Эти и другие недостатки, **в сочетании с психологической инерцией человека работать по «старому»**, приводят к тому, что в РФ, лица принимающие решения, практически не владеют и не осознают преимущества современных инструментов системного инжиниринга и МОСИ, не формируют запросы в ВУЗы и промышленный сектор информационных технологий (ИТ) на подготовку соответствующих специалистов и ПО. Под таким ПО подразумеваются **интерактивные комплексы, интегрирующие на основе МОСИ (SysML-моделей) системы автоматизации проектирования 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 как шла 10 лет назад, так до сих пор и идет по пути локального внедрения CAE/CAD/CAM/PDM ИТ систем, а требуется внедрение интегрированных видов обеспечений CALS-технологий.

С учетом вышеперечисленного, был авторами был поставлен вопрос: **«Можно ли использование ПМО МОСИ, основанного на SysML, удешевить и упростить средств-вами, доступными для широкой аудитории потенциальных пользователей?».**

В результате была поставлена и достигнута следующая **цель исследования - создание методического инструментария** для проектирования широкого класса ТО, **основанного на модернизации, конкретизации и синтезе инструментов МОСИ**, обеспечивающего снижение временных и финансовых затрат без ухудшения качества.

## 2.2. Результаты исследования

**2.2.1 Конкретизированная каскадная модель СФК.** Классическая модель СФК была дополнена новой моделью ДК (этапом) для формулировки требований заказчика в соответствии с потребностями пользователей. Классические этапы модели СФК № 1–4 были конкретизированы в соответствии с подходом SysML и требованиями отраслевой нормативно-технической документации (НТД) к созданию аппаратно-программных средств космического назначения.

Для генерирования входных и выходных данных этапов конкретизированной модели СФК (потребностей пользователей, требований заказчика, инженерных требований, требований НТД) были разработаны алгоритмы, основанные на МОСИ [11].

**2.2.2 Алгоритм приоритизации выходных параметров в модели ДК.** Новый алгоритм, основан на синтезе классического алгоритма с подходом и математическим аппаратом метода анализа иерархий. Это 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 [11].

**2.2.3 Способ автоматизированной разработки SysML-моделей требований и обновления в них информации.** В рамках способа разработан комплекс алгоритмов

действий. В рамках 1-го алгоритма рассматриваются такие вопросы как создание в ПО MS Excel базы данных (БД) на основе модели ДК и подключение БД к ПО MS Visio.

В рамках разработки 2, 3, 4-го 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.

Созданный способ обеспечивает массовое использование языка SysML для представления и обмена информацией об изделиях и процессах на этапах ЖЦ.

### **2.3. Верификация и валидация результатов исследования**

Верификация и валидация разработанного методического инструментария МОСИ прошла в том числе в рамках частичной реализации концепции ИМС [11].

**2.3.1 Постановка задачи.** Разработать информационно-справочную систему – «единый источник правды» о всех требованиях НТД к этапам ЖЦ проектирования спутниковой аппаратуры, который сокращает трудозатраты и повышает точность:

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

**2.3.2 Решение задачи.** На основе алгоритмов, указанных в пункте 2.2.3 разработан алгоритм и реализована на языке SysML информационно-справочная система (ИСС).

**2.3.3 Преимущества от использования полученной ИСС.** Валидация показала, что благодаря использованию разработанного методического инструментария МОСИ и полученной ИСС, являющейся частичной реализацией интегрированной модели системы, **возможно:** 1) сокращать время экспертизы документации с нескольких дней до нескольких часов; 2) повышать соответствие конструкторской документации требованиям НТД на 5–10%; 3) снижать сроки планирования этапов ЖЦ изделий-аналогов; 4) снижать срок реализации этапов ЖЦ проектирования и разработки образцов новой техники на 5–10%.

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;
2. унификацию понимания: «Что», «Как», «Кто» и «Когда» делает;
3. моментальный доступ к необходимой информации;
4. уменьшение трудозатрат на планирование проектных работ этапов ЖЦИ, а также на верификацию и валидацию отчетных документов;
5. повышение эффективности информационного мониторинга исполнения работ;
6. улучшение информационно-коммуникационного обмена между сотрудниками.

### **2.4. О целесообразности внедрения полученных результатов исследования в области МОСИ в отечественные CALS-системы**

На момент доклада промышленность РФ старается перейти на отечественное ПО. Среди активных разработчиков **интегрированных программных сред и отдельных САПР** в РФ выделяются такие разработчики как ЗАО «Топ Системы» и ГК «Росатом».

ЗАО «Топ Системы» создает модуль для использования языка SysML в рамках своей платформы T-Flex PLM. Но по уже названным причинам, компания «Топ Системы» тоже испытывает дефицит кадров и особенно по теме МОСИ/SysML для обоснования того зачем пользователям это необходимо, какую пользу их использование принесет и как это достижимо с помощью ПО, которое они создают. Без этого понимания, ЛПП не понимают, что будет настолько ценным в этом модуле, что

обеспечит им его продажи. А находясь в рыночных условиях, это вынуждает их направлять свои ресурсы в большей степени на более прибыльные направления. Как результат, данный модуль очень медленно дорабатывается, а потенциальная аудитория до сих пор не может его купить.

Представленный в данном докладе методический инструментарий МОСИ и опыт его реализации мог бы быть воспроизведен с помощью модуля системного инжиниринга в T-Flex PLM и стать реализованной учебно-методической основой для создания ком-мерческого предложения с обоснованной ценностью и с понятным алгоритмом действий достижения этой ценности широкой аудиторией потенциальных получателей выгод.

В дальнейшем, с учетом ПО от ЗАО «Топ Системы» в таких направлениях как САЕ и САД, проектное управление и управление требованиями, можно было бы создать практические примеры полноценных интегрированных моделей систем.

### 3. Заключение и выводы

Результаты разработанного и апробированного методического инструментария МОСИ показывают, что он обеспечивает для широкой аудитории пользователей минимизацию финансовых затрат на начальное внедрение, изучение и эксплуатацию ПМО МОСИ для освоения языка SysML для методической оптимизации бизнес-процессов и дальнейшего внедрения интегрированных программных сред.

**Представленные результаты исследования** на примере реализации концепции интегрированной модели системы в парадигме МОСИ и их сопоставление с отсутствием у разработчиков ПО ценных примеров опыта реализации SysML, демонстрируют целесообразность объединения нашего опыта и возможностей разработчиков ПО. Результаты данного исследования должны быть синтезированы с ИТ решениями отечественных разработчиков (ЗАО «Топ Системы», ГК «Росатом»), чтобы появились программно-реализованные учебно-методические кейсы по интегрированию программ и САПР в единую CALS-систему автоматизации различных аспектов проектирования и разработки ТО, управления и отчетности по НИОКР - достижения принципиально нового взаимодействия проектировщика с системой (ЦД).

Такая взаимовыгодная и актуальная сейчас кооперация исследователей, ученых, педагогов, инженеров и разработчиков позволит обеспечить устойчивое развитие программно-методического обеспечения МОСИ (методического, лингвистического, информационного и программного видов обеспечения CALS-технологий).

### Список литературы

1. Боровков А.И., Бурдаков С.Ф., Клявин О.И. и др. Компьютерный инжиниринг. С.Пб.: Изд-во Политехнического ун-та. 2012. 93 с.
2. Боровков А.И. и др. Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК // Вестник Восточно-Сибирской открытой академии. 2019. №. 32.
3. Ковалёв С.П., Толок А.В. Применение модельно-ориентированного подхода в управлении жизненным циклом технических изделий // Информ. технологии в проектировании и производстве. 2015. № 2. С. 3-9.
4. Буздалов Д.В. и др. Инструментальные средства проектирования систем интегрированной модульной авионики // Труды Института системного программирования РАН. 2014. Т. 26, № 1. С. 201-230.
5. Норенков И.П., Трудоношин В.А., Уваров М.Ю., Федорук Е.В. Основы САПР. МГТУ им. Н.Э. Баумана. [http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=140\\_CADedu/CAD.cou](http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=140_CADedu/CAD.cou) (дата обращения: 10.01.2024).
6. Шпотя Д.А., Романов А.А. Общедоступный методологический инструментарий проектирования систем в парадигме модельно-ориентированного системного инжиниринга: опыт реализации //

Презентация к докладу IX Форума по цифровизации оборонно-промышленного комплекса России ИТОПК-2020. Август, 2020.

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. [https://ocw.mit.edu/courses/aeronautics-and-astronautics/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/lecture-notes/MIT16\\_842F15\\_Ses1SE\\_Ovr\\_vw.pdf](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. The Object management group: About the omg system modeling language specification version 2.0 beta. <https://www.omg.org/spec/SysML/2.0/Beta1> (дата обращения 10.01.2023).
10. Вашуков Ю.А., Дмитриев А.Я., Митрошкина Т.А. QFD: разработка продукции и технологических процессов на основе требований и ожиданий потребителей. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева: 2012. 54 с.
11. Шпотя Д.А. Системный подход к разработке методического инструментария проектирования технических объектов с помощью модельно-ориентированного системного инжиниринга: дис. канд. техн. наук: 05.13.12. [Место защиты: ФГБУН Институт проблем управления им. В. А.Трапезникова Российской академии наук]. Долгопрудный, 2022. 160 с.