

УДК 004.02

ПРЕОДОЛЕНИЕ НЕДОСТАТКОВ ПРОГРАММНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАРИЯ МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО СИСТЕМНОГО ИНЖИНИРИНГА, ИСПОЛЪЗУЕМОГО ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ

© 2020 А.А. Романов, Д.А. Шпотя

Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 03.12.2020

В работе обосновывается необходимость перехода от разрозненных стадий жизненного цикла изделия (ЖЦИ; НИР, ОКР, производство, эксплуатация) к единому проекту, реализуемому в новой парадигме проектирования систем, основанной на программно-методическом инструментарии (ПМИ) модельно-ориентированного системного инжиниринга (МОСИ; Model-Based Systems Engineering). Имеющийся на рынке РФ зарубежный ПМИ МОСИ для проектирования систем (включая спутниковую аппаратуру (СА)) - дорогой и сложный. В работе формулируется и рассматривается вопрос: «Можно ли использование ПМИ МОСИ удешевить и упростить средствами, доступными широкой аудитории пользователей?». Для ответа на этот вопрос, авторы проанализировали: язык «SysML» (Systems Modelling Language), методику «СФК» (Структурирование функции качества (Quality Function Deployment)), метод «ДК» (Дом качества (House of Quality)) и программное обеспечение (ПО) для их применения. В результате анализа литературных источников доказан рост актуальности применения рассматриваемых инструментов при проектировании и разработке (ПиР) аппаратно-программных систем. Определено ПО для использования SysML, СФК и ДК широкой аудиторией потенциальных пользователей РФ. Выявлено 13 недостатков SysML, СФК и ДК, а также ПО, препятствующих их применению. Для преодоления выявленных недостатков разработан ПМИ МОСИ, основанный на конкретизации, модернизации и синтезе SysML, СФК, ДК и ПО для автоматизации проектных работ. Разработанный ПМИ МОСИ позволяет широкой аудитории пользователей ПиР системы в соответствии с подходом МОСИ (СФК, ДК, SysML), идентифицировать критически важные требования разных элементов разработки, автоматизированно разрабатывать (за несколько часов вместо нескольких дней) и обновлять SysML-модели требований, сокращать трудозатраты на реализацию этапов ЖЦ ПиР будущих изделий-аналогов на 5-10%. В результате валидации SysML-моделей доказано, что их повторное использование сокращает сроки планирования этапов ЖЦ изделий-аналогов до 60%, повышает соответствие отчетной документации этапов ЖЦИ требованиям нормативно-технических документов (НТД) на 10%.

Ключевые слова: Модельно-ориентированный системный инжиниринг, МОСИ, SysML, СФК, ДК, ПО, анализ недостатков, методический инструментарий, проектирование систем.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-6-92-103

ВВЕДЕНИЕ

Постоянно возрастающая сложность систем обуславливает ужесточение предъявляемых к ним требований и рост объема выпускаемой отчетной конструкторской документации. В рамках текущей документо-ориентированной парадигмы разработки и создания продукции высок риск разночтений и невыполнения всех требований, что приводит к ошибкам, к увеличению сроков и стоимости проектирования систем, включая СА. Для решения этих проблем и удовлетворения современным требованиям необходим переход от разрозненных стадий ЖЦИ (НИР, ОКР, производство, эксплуатация) к

единому проекту, реализуемому в новой парадигме проектирования систем, основанной на синтезе образовательной, научно-инновационной и производственной деятельности, с методическим инструментарием МОСИ [1].

Существующий ПМИ МОСИ, основанный на SysML [2] - дорогой и сложный. Поэтому важный вопрос формулируется следующим образом: «Можно ли использование ПМИ МОСИ, основанного на SysML удешевить и упростить средствами, доступными широкой аудитории пользователей?». В рамках ответа на этот вопрос, в работе рассматривался следующий методический инструментарий МОСИ: СФК, ДК и SysML, а также ПО для их использования.

СФК и ДК предназначены для точного определения «Что» и «Как», с какой приоритетностью необходимо выполнять на этапах ЖЦИ. SysML предназначен для повышения эффективности коммуникации информации, для достижения

Романов Алексей Александрович, доктор технических наук, профессор. E-mail: romanov48@yandex.ru
Шпотя Денис Александрович, аспирант.
E-mail: denis.shpotya@phystech.edu

единого понимания сложности рассматриваемой системы и совершенствования управления связанных с ней требований, функций и физических характеристик [3]. В 2018 на первой конференции Стэнфордского университета по SysML было заявлено, что МОСИ (SysML) является основой создания цифрового двойника, развития машинного обучения и искусственного интеллекта.

В 2003 г. Дж. Коски провел анализ модификаций СФК, ДК и пришел к выводу, что ДК передает информацию менее эффективно чем UML-диаграммы (Unified Modeling Language, основа языка «SysML») [4]. В 2016 г. К. Стэнфилд заявил о намерении объединить СФК с модельно-ориентированным проектированием [5], но результаты пока не опубликованы.

За рубежом подводятся итоги опытной эксплуатации SysML. Как известно, развитие языков моделирования уже длится несколько десятилетий. Также внедрение новых идей и подходов часто сталкивается с психологической инерцией большинства людей работать «по-старому». Это особенно актуально для России, где практически нет локализованной НТД по использованию SysML, СФК, ДК на протяжении этапов ЖЦ ПиР систем (СА). Все это означает, что у рассматриваемого методического инструментария МОСИ имеется ряд недостатков, которые необходимо определить и преодолеть, для ускорения перехода широкой целевой аудитории к ПиР изделий в новой парадигме.

Цель данной статьи состоит в выявлении и преодолении недостатков, связанных с методическим инструментарием МОСИ (SysML, СФК, ДК) и соответствующим ПО для того, чтобы широкая аудитория пользователей могла их эффективно применять при проектировании и разработке систем. Для достижения этой цели, в этой работе решались следующие задачи:

1. Обзор источников литературы для анализа использования SysML, СФК, ДК.
2. Определение ПО для SysML, СФК, ДК, доступного разной аудитории пользователей.
3. Выявление недостатков, препятствующих изучению и применению SysML, СФК, ДК.
4. Разработка решений, обеспечивающих преодоление выявленных недостатков.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Анализ языка «SysML», SysML-ПО и выявление их недостатков

1.1 Краткая характеристика МОСИ и языка «SysML»

Согласно INCOSE [6] **системный инжиниринг (СИ)** – это междисциплинарный подход и средства, позволяющие реализовывать успешные системы. МОСИ является одним из подхо-

дов СИ и определяется как формализованное применение технологии моделирования для поддержки действий, направленных на формирование системных требований, проектирование, анализ, верификацию и валидацию (ВиВ), которые начинаются на этапе концептуального проектирования, продолжаются на протяжении всей разработки и на дальнейших этапах ЖЦИ [7]. За счет разработки, а также уточнения на протяжении ЖЦИ и использования в качестве основных рабочих «артефактов» - моделей разного рода, а не текстовых документов, обеспечивается переход от документо-ориентированной к модельно-ориентированной парадигме СИ проектирования и разработки систем [8].

Модель системы не является целью, она является используемым в МОСИ ресурсом. Для ее создания в МОСИ используются ПО, язык и методика моделирования [9].

Язык «SysML» состоит из 9 типов SysML-диаграмм, каждая из которых состоит из нотаций. SysML-диаграммы отражают систему или ее часть с точки зрения: требований, поведения (функций), архитектуры (аппаратной и/или программной), параметрических выражений. SysML-модель состоит из SysML-диаграмм. Соответственно SysML определяется как язык общего назначения для графического моделирования, который поддерживает анализ, детализацию, проектирование, разработку, ВиВ сложных систем [10].

1.2 Анализ применения и преимуществ языка «SysML»

С 2004 по 2019 год Scopus проиндексировал 1854 публикации с ключевым словом «SysML». Градация публикаций по предметным областям выглядит следующим образом (первые пять): компьютерные науки - 1222, инженерия - 1038, математика - 429, науки о земле - 87, астрономия - 85. Анализ по странам представлен в табл. 1.

Данная статистика подтверждается результатами исследования [11], в ходе которого было опрошено 326 респондента из 19 стран мира и 99 компаний из следующих секторов промышленности: авиация – 28,6%, космос – 27,1%, оборона – 17,7%, автопром – 17,7%, ИТ – 15,6%, медицина – 9,4%, другие – 25%. В выводах исследования выделяются два тезиса:

Возрастает количество компаний, практикующих и разрабатывающих собственные методики, инструменты и учебно-методические материалы для использования МОСИ (SysML).

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

Тезис № 1 коррелирует с результатами исследования [12] и опроса инженеров Германии

Таблица 1. Анализ публикаций, связанных с SysML по 5 странам (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 |

[13], где утверждается, что компании не совместимы с МОСИ, в связи с отсутствием методик использования современных стандартов и языков моделирования. В результате был выпущен обзор самых известных SysML-методик [9], но они не получили значимого становления.

Аналогичные результаты получены в Великобритании в результате опроса более 100 консалтинговых, оборонных и космических компаний [15]: 1) 14% респондентов не используют МОСИ; 2) используются разные языки моделирования: UML, блок схемы, контекстная диаграмма, SysML; 3) 43% не используют методики и стандарты МОСИ; 4) 16% используют собственные разработки. Самыми часто используемыми программами были: MS Visio (57%), Sparx Enterprise Architect (44%), IBM-Rhapsody (24%). Среднее количество используемого ПО равнялось 2.6. Это говорит о том, что за рубежом стремятся использовать ПО для МОСИ (SysML), доступное многим пользователям. В выводах говорится, что отсутствуют доказательства и практические рекомендации использования МОСИ.

1.3 Анализ и определение ПО для использования SysML широкой аудиторией пользователей

С увеличением числа пользователей SysML стал чаще звучать вопрос: «Как минимизировать затраты на моделирование?». Учитывая это, был проведен анализ SysML-ПО, которое на 2020 год, государственные организации РФ могут официально закупить:

1. IBM - Rational Rhapsody Designer for Systems Engineers: от 245 тыс. руб. в год, требуется освоение специальной методики.

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

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: бесплатно¹ или от 30 тыс. руб. Отсутствуют библиотеки SysML-нотаций, но есть библиотеки UML-нотаций. В отличие от первых трех продуктов MS Visio позволяет «из коробки» установить взаимосвязь с ПО MS Excel. MS Visio обладает потенциалом для его конкретизации под разработку SysML-моделей.

ПО MS Visio Professional, версия от 2013 года, стоит в 2020 году примерно в 8 раз меньше, чем самое дешевое на рынке РФ ПО, настроенное под SysML. Соответственно, MS Visio было определено как SysML-ПО для использования широкой аудиторией пользователей.

1.4 Недостатки языка «SysML» и SysML-ПО

В результате анализа применения (подразделы 1.1-1.3) и внедрения [16], личного опыта [17], определены недостатки (иными словами «дефекты») SysML и SysML-ПО (см. табл. 2). Выводы о том к каким проблемам (процессам или их отсутствию) приводят данные недостатки,

¹ ВУЗы партнеры Microsoft бесплатно выдают студентам и сотрудникам лицензии на это ПО.

Таблица 2. Недостатки SysML и ПО для его использования

| № | Формулировки | SysML | ПО |
|---|--|-------|----|
| 1 | Разработка SysML-диаграмм требований и их актуализация требуют значительных трудозатрат (от нескольких часов до недель). | | |
| 2 | Внедрение профессионального SysML-ПО требует больших затрат. | | |
| 3 | SysML-диаграммы не эффективны для системного отслеживания взаимосвязей требований «в» и «между» элементами разработки. | | |
| 4 | Русскоязычные учебно-методические материалы и примеры внедрения SysML в промышленные проекты - отсутствуют. | | |
| 5 | Трудозатраты на изучение МОСИ сопоставимы с изучением моделирования программных, электрических и других дисциплин. | | |

представлены далее в подразделе 3 данного раздела.

2. Анализ СФК, ДК, ПО для их использования и выявление их недостатков

2.1 Краткая характеристика методик «СФК» и метода «ДК»

Для сдвига парадигмы проектирования необходимо отказаться от традиционного пути достижения качества, заключающийся в выявлении и исправлении недостатков на предпроизводственном этапе. Иллюстрация этого пути, в сравнении с японской философией Генучи Тагучи - «качество должно быть спроектировано в продукт, а не найдено в нем» [18], показана на рис. 1а [19]. С точки зрения СИ космических систем, достижение качества путем изменения продукта на поздних этапах ЖЦИ - это очень затратно и опасно (см. рис. 1б [20]).

Йоджи Акао, установил, что издержки, ограничивающие в традиционном подходе достижение качества, вызваны неспособностью разработчиков

правильно определить требования к продукту и проконтролировать их достижение на этапах разработки изделия. Для массового внедрения в промышленность философии Тагучи и для решения этой проблемы Йоджи Акао и Шигэру Мицуно разработали СФК (определения указаны в табл. 3). Позже СФК была признана самой полезной методикой в области всеобщего управления качеством [21].

Основным инструментом СФК является ДК, который определяется как с одной стороны язык графического моделирования для построения нескольких взаимосвязанных таблиц и матриц в форме «дома», а с другой стороны метод, которые позволяют анализировать [22] зависимость удовлетворения входных параметров этапа ЖЦИ или элемента разработки (к примеру, ГП) от реализации выходных параметров (ГЗ), и приоритизировать последние.

Определения указывают на то, что СФК (ДК) ориентированы на перевод ГЗ в инженерные требования (Voice of the Engineer; ГИ) так, чтобы изделие удовлетворило ГП и ГЗ.

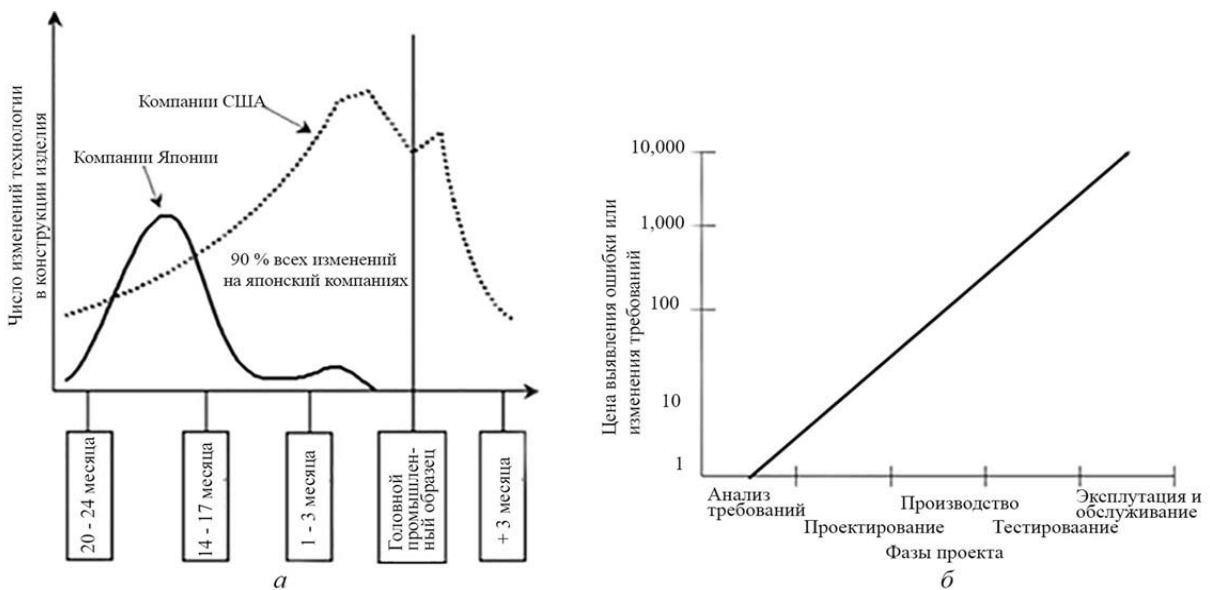


Рис. 1. Сравнение числа вносимых изменений (а) и стоимость исправления ошибок (б)

Таблица 3. Определения «Структурирование функции качества»

| Автор | Определение «Структурирование функции качества» |
|----------------|---|
| Йоджи Акао | Это преобразование требований (запросов) потребителей в «характеристики качества» и разработка качественного замысла (проекта) итогового продукта путем систематического структурирования взаимосвязей между требованиями и характеристиками, начиная с качества каждого функционального компонента и расширяя структурирование до качества каждой детали и процесса. Общее качество продукта будет формироваться через эту сеть взаимоотношений. |
| Романов, Шпотя | Это методика, состоящая из рамочного алгоритма ЖЦИ, а также метода и языка графического моделирования «ДК», обеспечивающая согласованный переход между требованиями разных элементов разработки: от анализа требований заказчика (голос заказчика (Voice of the Customer); ГЗ), основанных на потребностях пользователей («голос пользователя» (Voice of the User); ГП), к функциональному анализу, к синтезу системы, к контролю качества процессов разработки/производства. |

Таблица 4. Анализ публикаций, связанных с СФК по 5 странам (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 |

2.2 Анализ применения и преимуществ методики «СФК» и метода «ДК»

С 2010 по 2019 год Scopus проиндексировал 3148 публикации с ключевым словом «QFD» (перевод аббревиатуры «СФК»). Анализ публикаций по странам представлен в табл. 4.

За период с 2000 по 2019 градация 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.

Эти цифры доказывают высокую актуальность использования СФК (ДК) в ПиР аппаратно-программных изделий. Это подтверждается выводами нескольких работ [23-26]:

- снижается риск возникновения неверных интерпретаций требований заказчика;
- снижается стоимость проектирования на 60%;
- сокращаются технологические изменения на 30% - 50%;
- сокращаются производственные циклы на 30% - 50%;
- уменьшается количество гарантийных претензий на 20% - 60%.

2.3 Анализ и определение ПО для использования СФК и ДК широкой аудиторией пользователей

Современный анализ программ для использования СФК (ДК) выполнен в [27], в которой делается вывод, что наиболее удобным ПО для создания моделей «ДК» с помощью таблиц или с учетом разработки частных шаблонов модели «ДК», является MS Excel или Open Office Calc. Также исследование [28] установило, что язык Visual Basic является оптимальным языком для создания эффективного ПО для реализации СФК (ДК). А так как MS Excel содержит интегрированную среду разработки, основанную на языке Visual Basic for Applications, то это в очередной раз свидетельствует в пользу ПО MS Excel для использования СФК (ДК).

Личный опыт создания моделей «ДК» [29, 17] подтверждает, что MS Excel – это практически

повсеместно имеющееся ПО в РФ, которое предоставляет гибкий функционал для создания и реализации персонализированных моделей «ДК» и «СФК».

2.4 Недостатки СФК, ДК и ПО для их использования

В результате анализа применения (подразделы 2.1 - 2.3) и внедрения [30-33], личного опыта [29, 17], определены недостатки СФК, ДК и соответствующего ПО (см. табл. 5).

3. Итоги анализа SysML, СФК, ДК, ПО для их использования

Выявленные недостатки, в сочетании с ограниченными ресурсами создают ряд взаимосвязанных проблем, а именно:

- 1) препятствуют изучению и распространению ПМИ МОСИ: SysML, СФК и ДК;
- 2) в РФ разработчики систем (СА) не видят смысла в создании помимо утвержденного текстового документа, «дублирующую» его содержание SysML-модель и/или модель «ДК»;
- 3) SysML-модели и модели «ДК» не являются официальными отчетными документами, которые заказчик может принять в качестве результата работы.

В следствии этих проблем, появляются такие проблемы как:

- 1) крайне редко проводятся инвестиции в ПО для SysML, СФК, ДК;
- 2) не формируются запросы в ВУЗы на подготовку соответствующих специалистов;
- 3) в космической отрасли не проводится стандартизация в области СФК, ДК, SysML.

Как результат, цифровизация промышленности в основном идет по пути «уже вчерашнего дня» - внедрения CAE/CAD/CAM ИТ систем. Также все это приводит к тому, что в РФ отсутствует теоретический и прикладной ПМИ МОСИ для применения на этапах ЖЦ проектирования СА, реализуемый в доступном для широкой аудитории пользователей ПО.

Решение указанных проблем возможно за счет массового применения ПМИ МОСИ. Для этого необходимо преодолеть выявленные недостатки SysML (табл. 2) и СФК, ДК (табл. 5) и ПО для их использования, доступного широкой аудитории пользователей. Для этого была по-

Таблица 5. Недостатки СФК, ДК и ПО для их использования

| № | Формулировка | СФК | ДК | ПО |
|---|--|-----|----|----|
| 1 | Классическая четырехфазная модель «СФК» [33] не подразумевает проектирование СА в соответствии с ГП, SysML и требованиями НТД. | | | |
| 2 | Классический алгоритм «ДК» не позволяет однозначно приоритизировать требования [34], выделять из них критически важные. | | | |
| 3 | СФК использует, но не генерирует входные (к примеру, потребности пользователей) и выходные данные (требования заказчика) для анализа. | | | |
| 4 | Заполнение информацией модели «ДК» требует значительных трудозатрат, от нескольких месяцев до полутора лет. | | | |
| 5 | Создание архитектуры «ДК» требует времени до нескольких дней [34]. | | | |
| 6 | MS Excel не предлагает шаблоны модели «ДК». | | | |
| 7 | Существующие иностранные шаблоны модели «ДК» для MS Excel от «qfdonline.com» позволяют построить только 4 «ДК» с фиксированным набором полей, что не подходит для анализа сложных объектов [27]. | | | |
| 8 | Человек может эффективно воспринимать, анализировать и управлять в модели «ДК» не более 20-25 требованиями, в случае СА их больше | | | |

ставлена задача по разработке ПМИ МОСИ состоящего из новых решений, позволяющих преодолеть недостатки из табл. 2 и 5, и основанного на конкретизации и синтезе SysML, СФК, ДК и ПО MS Visio и Excel для проектирования и разработки СА. Валидация ПМИ МОСИ должна быть осуществлена в рамках ПиР малоразмерного космического аппарата (МКА).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В разделе рассматриваются новые решения, полученные в ходе разработки ПМИ МОСИ. Решения направлены на преодоление недостатков из табл. 2 и 5, включая конкретизацию и сокращение затрат на использования инструментов МОСИ (SysML, СФК, ДК) при ПиР систем (СА).

1. Конкретизация классической каскадной модели «СФК»

Для преодоления недостатка № 1 из табл. 5, модель «СФК» была конкретизирована в части назначения и количества этапов (добавлен новый этап). Названия этапов: 1) «уДК № 0»: ГП - ГЗ; 2) «уДК № 1»: требования заказчика – требования к функциям; 3) «уДК № 2»: требования к функциям – требования к аппаратной/программной части (АЧ/ПЧ); 4) «уДК № 3»: требования к АЧ/ПЧ – требования НТД к порядку реализации ЖЦИ; 5) «уДК № 4»: требования НТД к порядку реализации ЖЦИ – требования НТД к отчетной документации

ЖЦИ. Конкретизированная модель «СФК» была названа «усовершенствованное СФК» («уСФК»).

2. Разработка нового алгоритма приоритизации требований в модели «ДК»

В данном подразделе рассматривается решение для преодоления недостатка № 2 из табл. 5, направленное на приоритизацию требований j (выходных параметров модели «ДК») и определение их весов B_j . Согласно метода «ДК» это последняя операция перед переходом к следующему элементу разработки изделия (модели «ДК»). Классический алгоритм приоритизации требований j не учитывает то, как они коррелируют между собой. Это не позволяет учесть все факторы, влияющие на веса B_j . Для преодоления этого недостатка, был проведен синтез классического алгоритма приоритизации j с количественным учетом экспертных оценок их корреляций e_j (в том числе их категорий $S_{1...n}$) с помощью математического аппарата метода анализа иерархий (МАИ). Сравнение алгоритмов представлено в табл. 6 формулами (1) и (2), 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

Таблица 6. Формулы расчета финальных весов приоритизации выходных параметров в модели «ДК» согласно классическому и новому алгоритму

| Алгоритм | Классический | Усовершенствованный |
|----------|--|---|
| Формула | $B_j = \sum_i (T_i * a_{ij}), \quad (1)$ | $B_j = \left(\sum_i (T_i * a_{ij}) \right) * (S_{1...n} * e_j), \quad (2)$ |

i -го входного параметра от реализации j -ого выходного параметра; $S_{i...n}$ – подсчитанная по МАИ количественная оценка корреляции выбранной категории (подсистемы) выходных параметров; e_j – подсчитанная по МАИ количественная оценка корреляции j -го выходного параметра в выбранной категории выходных параметров S .

ВиВ нового алгоритма на примере МКА [29] доказали, что дополнительный учет экспертных оценок корреляций выходных параметров e_j повышает в несколько раз контрастность весов приоритизации V_j по сравнению с весами, получаемые по классическому алгоритму «ДК». Такой контраст позволяет идентифицировать критически важные требования.

3. Разработка унифицированного алгоритма генерирования входных и выходных данных этапов модели «уСФК»

Для преодоления недостатков № 3 и 4 из табл. 5 был проведен анализ средств СИ для идентификации ГП, определения ГЗ, формулировки ГИ. После этого был синтезирован унифицированный алгоритм генерирования данных для этапов модели «уСФК» (см. рис. 2).

Алгоритм условно поделен на 5 элементов: 1) «вход» - исходные данные (ГП, ГЗ, ГИ); 2) «выход» - приоритизированные и структурированные с помощью ДК, SysML ГЗ или ГИ; 3) «управляющее воздействие» по итогам ВиВ; 4) «ПО для цифровой обработки требований и использования методического инструментария»; 5) «генерация данных» - обеспечивает точное определение «области проблем» и их перевод в «область решений» (к примеру, перевод ГП в ГЗ). Использование средства СИ делятся на три группы:

- **Получение данных:** контекстная диаграмма, интервью, опросы; мозговой штурм.

- **Качественный анализ:** вербальный анализ системных требований (ВАСТ), схемы деления работ и продукта, группирующие диаграммы, SysML-модели, SWOT-анализ, диаграмма «N2», модель Кано (эмоциональное ранжирование).

- **Количественный анализ:** МАИ (ранжирование); метод «ДК» (приоритизация) [29].

В рамках конкретизации этого алгоритма, для каждого этапа модели «уСФК» (см. подраздел 1): 1) определен и формализован физический смысл (см. примеры формул (3) и (4)); 2) разработана рекомендованная структура модели «усовершенствованного ДК» (далее модель «уДК»); 3) разработана концепция алгоритма действий для реализации этапа [17]. Каждый алгоритм был назван «уСФК для уДК № n ». Где n это номер этапа модели «уСФК».

$$\{\overrightarrow{UN}_p\}[CRA_{pm}] = \overrightarrow{HoQCR}_m, \quad (3)$$

$$\left\| \frac{\overrightarrow{CR}_j \cdot HoQCR_j}{\sum_j \overrightarrow{CR}_j \cdot HoQCR_j} \right\| = \|\overrightarrow{iHoQCR}_m\| = 1, j = \overline{1, m}, \quad (4)$$

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

\overrightarrow{UN}_p – вектор размерности p , нормализованные веса параметров ГП, подсчитанные по МАИ;

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

$[CRA_{pm}]$ – центральная матрица уДК № 0 размерностью pm с результатами анализа числовой оценки зависимости каждого параметра ГП от достижения каждого ГЗ;

\overrightarrow{HoQCR}_m – вектор ненормализованных весов приоритизации параметров ГЗ (выходных пара-



Рис. 2. Унифицированный алгоритм генерирования данных этапов модели «уСФК» [7]

метров), подсчитанных по классическому алгоритму «ДК»;

j – столбцы центральной части модели «ДК» (уДК);

CR_j^* – вес важности j -го параметра ГЗ, подсчитанный по МАИ;

\overline{CR}_m^* – вектор размерности m (нормализованные веса параметров ГЗ, подсчитанные по МАИ);

\overline{iHoQCR}_m – вектор нормализованных весов приоритизации параметров ГЗ, подсчитанных по алгоритму «уДК № 0».

Валидация показала, что использование алгоритмов позволяет единообразно получить данные для этапов модели «уСФК». В рамках МКА было получено: 2 ГП, 6 ГЗ, 22 ГИ к функционалу и 27 ГИ к АЧ/ПЧ [29], а также требования НТД к этапам ЖЦ ПиР СА.

Таким образом были созданы новые методические основы и рекомендации для использования ПМИ МОСИ (уСФК, уДК, SysML в сочетании с инструментами СИ) на каждом этапе ЖЦ ПиР, реализуемого в ПО доступном широкой аудитории русскоязычных пользователей.

4. Разработка электронных шаблонов моделей «уДК»

Для преодоления недостатков, связанных с большими трудозатратами на построение моделей «ДК» (см. № 5-7 в табл. 5), в соответствии с этапами модели «уСФК» и рекомендованными структурами моделей «уДК» в MS Excel были разработаны электронные шаблоны моделей «уДК». Для сокращения трудозатрат на анализ данных, хранящихся в матрицах моделей «уДК», процессы «раскрытия» и «свёртывания» матриц в моделях «уДК» были автоматизированы с помощью макросов, написанных на языке VBA.

Полученные с помощью алгоритмов «уСФК для уДК» данные связанные с МКА [29] были структурированы в шаблонах «уДК». Применение шаблонов, позволило сократить трудозатраты на разработку новых моделей «уДК» до 20% (экспертная оценка).

5. Создание способа автоматизированной разработки SysML-диаграмм требований и последующего обновления в них информации

В данном подразделе представлено решение для преодоления недостатков № 1 и 2 из табл. 2, связанных с затратами на применение SysML. Анализ MS Visio показал, что оно позволяет: 1) синхронизировать фигуры с внешними источниками данных; 2) разрабатывать новые SysML-фигуры. Соответственно был создан новый способ автоматизированной разработки SysML-диаграмм требований и их обновления, за счет объединения данных из модели «уДК» с

SysML-фигурами требований. Способ состоит из четырех алгоритмов (см. рис. 3).

С помощью этого способа, на основе данных, связанных с МКА, были разработаны SysML-диаграммы требований (см. ниже пример двух SysML-диаграмм на рис. 4).

Валидация способа проведена в рамках экспериментальной разработки SysML-диаграмм требований классическим и автоматизированным способами (см. табл. 7) [17]. Достигнутое сокращение трудозатрат, доказывает, что созданный способ повышает эффективность функционирования системы автоматизированного проектирования MS Visio.

Валидация SysML-диаграмм заключалась в их использовании для проверки соответствия результатов этапов ОКР «Эскизный проект» требованиям НТД. В результате проверка была выполнена за два часа, вместо нескольких дней. SysML-диаграммы позволили выявить от 5 до более 10 несоответствий результатов проектов требованиям НТД. Если учесть, что срыв срока сдачи проекта заказчику, из-за несоответствия требованиям, как правило стоит больших штрафных санкций, то использование разработанного способа становится еще в большей степени актуальным и целесообразным. Полученные результаты также, позволяют сокращать трудозатраты на планирование этапов ЖЦ ПиР новых изделий-аналогов примерно на 60%.

6. Объединение разработок исследования в единый методический инструментарий

Было предположено, что использование SysML-диаграмм компенсирует недостаток, связанный с моделью «уДК» (№ 8 в табл. 5), а модель «уДК» компенсирует недостаток SysML-диаграмм (№ 3 в табл. 2). Для этого был проведен эксперимент по объединению уДК с SysML-диаграммами требований к МКА в единое рабочее пространство на базе MS Excel (см. рис. 4).

Объединение подтвердило указанное в предыдущем абзаце предположение. Таким образом была доказана эффективность коммуникации данных модели «уДК» с помощью SysML-диаграмм и отслеживания всех взаимосвязей требований с помощью модели «уДК». В результате был осуществлен финальный синтез всех решений и разработок в единый ПМИ МОСИ реализованный в ПО MS Excel и Visio, доступном широкой аудитории пользователей.

Достигнутые результаты «меняют правила игры», потому что позволяют:

1. кардинально снизить затраты времени на разработку SysML-диаграмм требований (с нескольких недель/дней до нескольких часов/минут) (см. табл. 7), используя привычное и до-

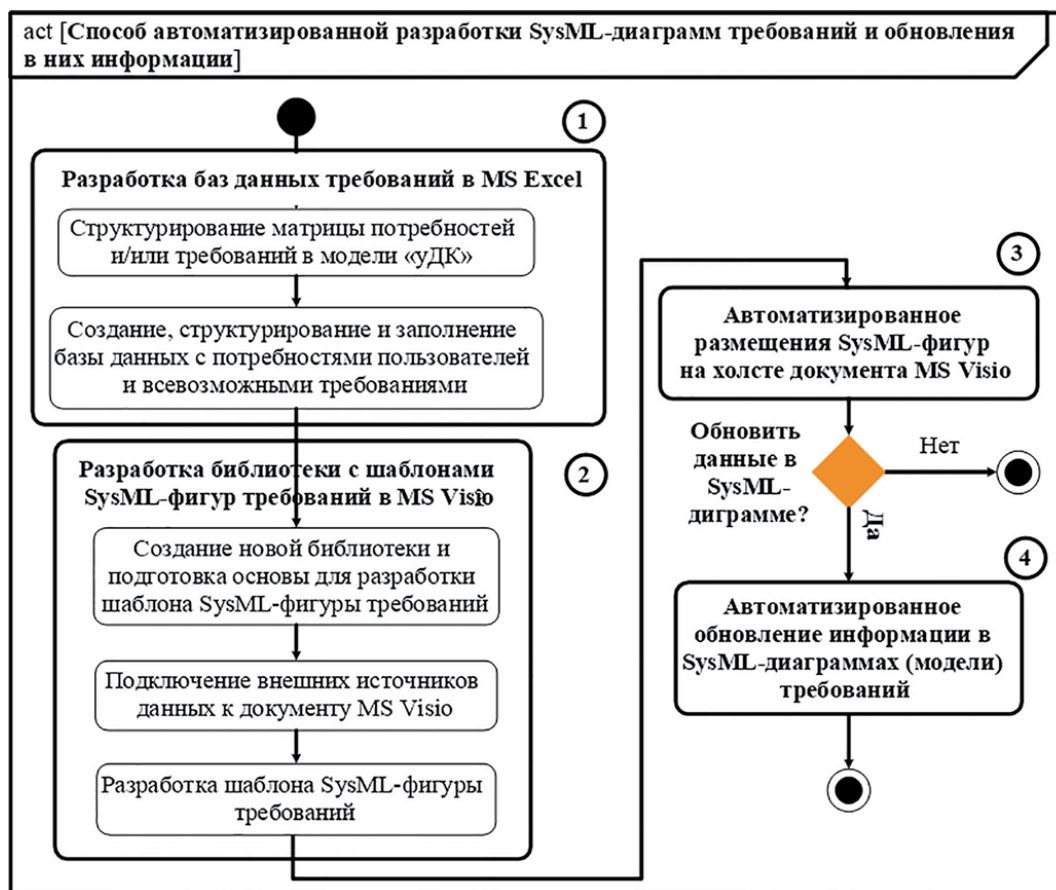


Рис. 3. Способ автоматизированной разработки SysML-диаграмм требований и обновления в них информации: комплекс алгоритмов действий

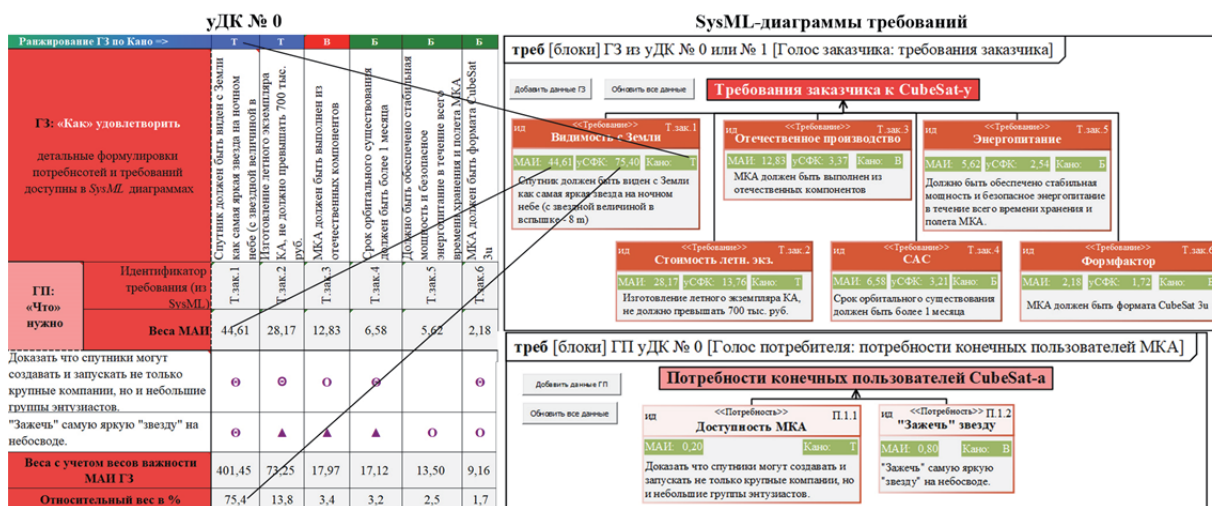


Рис. 4. Пример программного объединения и синхронизации модели «удК № 0» с SysML-диаграммами требований (ГП и ГЗ) на базе MS Excel

ступное широкой аудитории пользователей ПО MS Visio и MS Excel;

2. благодаря автоматизированной разработке SysML-диаграмм требований избежать психологических барьеров и отторжений от моделирования на языках «SysML» и «ДК», вызванных нежеланием людей тратить большое количество времени на «двойную работу» – подготавливать

текстовые документы и модели «SysML» и/или «удК».

3. снизить затраты на подготовку МОСИ-специалистов и на ПО для SysML и СФК (ДК);

4. сделать SysML-диаграммы более компактными. К примеру, в матрицах «удК № 0» уже отражены зависимости ГП и ГЗ, а значит, это не надо еще раз уточнять в диаграммах [17].

Таблица 7. Сравнение затрат времени на некоторые операции по разработке SysML-диаграмм

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

Также полученные результаты, создают научно-методическую основу проектирования, построения и функционирования интегрированных интерактивных комплексов анализа и синтеза проектных решений, а также создания конструкторской и иной документации.

В рамках преодоления недостатков SysML связанных с его изучением (№ 4 и 5 в табл. 2), на основе полученных новых результатов исследования разработаны учебно-методические материалы, которые были использованы в учебном процессе МФТИ. Обучение показало, что даже после одного дня обучения, инженеры получают достаточно знаний для начала использования ПМИ МОСИ в своей повседневной работе и для повышения ее эффективности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Для осуществления плавного перехода от традиционной документно-ориентированной парадигмы управления проектом к ПиР систем (СА) в парадигме МОСИ необходимо, чтобы широкая аудитория пользователей могла и знала как применить соответствующий ПМИ МОСИ. Но из-за того, что текущий, доступный в РФ ПМИ МОСИ дорогой и сложный, требуется разработка такого ПМИ МОСИ, который доступен за минимальные затраты и повышает эффективность документно-ориентированного подхода. Массовое применение ПМИ МОСИ позволит достичь точки бифуркации, необходимой для широкого признания и доминирования парадигмы МОСИ над документно-ориентированным подходом.

В рамках данного исследования был проведен анализ применения методического инструментария: SysML, СФК, ДК, а также ПО для их использования. В результате анализа: 1) доказан рост их популярности; 2) MS Visio (особенно версия Professional) определено как ПО (САПР) для использования языка «SysML», а MS Excel определено как ПО для создания персонализированных моделей «ДК»; 3) идентифицированы недостатки SysML, СФК, ДК и ПО для их использования (см. табл. 2 и 5); 4) определены производные от недостатков проблемы, препятствующие изучению и распространению МОСИ; 5) разработан ПМИ МОСИ, обеспечивающий пре-

одоления недостатков; 6) проведена ВиВ ПМИ на примере МКА.

В рамках разработки ПМИ МОСИ были достигнуты следующие новые результаты:

1. Конкретизирована классическая каскадная модель «СФК», которая предусматривает ПиР систем (СА) в соответствии с потребностями пользователей, SysML и требованиями НТД.

2. Синтезирован алгоритм приоритизации выходных параметров (требований) в модели «ДК»/«удК». ВиВ результатов применения алгоритма «удК», на примере МКА, доказала, что он позволяет повысить контраст весов приоритизации в два и более раз, по сравнению с алгоритмом «ДК», и идентифицировать критически важные требования.

3. Разработан унифицированный алгоритм генерирования входных и выходных данных этапов конкретизированной модели «СФК», основанный на синтезе инструментов СИ и инструментов МОСИ (СФК, ДК и SysML), MS Visio и MS Excel. На основе унифицированного алгоритма разработано пять алгоритмов «уСФК для удК № 0-4», каждый включает в себя: формулы, рекомендованные структуры моделей «ДК» и алгоритмы действий.

Валидация алгоритмов показала, что их применение позволяет единообразно получать, обрабатывать, качественно и количественно анализировать, ранжировать, моделировать с помощью SysML и приоритизировать требования разных элементов разработки систем (СА).

4. Разработаны электронные шаблоны моделей «ДК» в MS Excel, ВиВ шаблонов показала, они соответствуют алгоритмам «уСФК для удК №0-4» и что их использование сокращает трудозатраты на построение архитектур моделей «удК» на 20% (экспертная оценка).

5. Создан способ автоматизированной разработки и обновления SysML-диаграмм требований, конкретизирующий применение ПО MS Visio и Excel. Валидация способа доказала, что его использование позволяет снизить трудозатраты на разработку и обновление SysML-диаграмм требований с нескольких дней до нескольких часов и минут. Также обосновано, что данное решение позволяет сократить затраты на внедрение SysML-ПО более чем в три

раза (если сравнивать со стоимостью ПО от IBM, Siemens, Dassault Systems по ценам на 2020 год).

Валидация разработанных SysML-моделей требований НТД к реализации и к документации этапов ЖЦИ доказала, что SysML-модели позволяют сократить трудозатраты на проверку соответствия результатов текущих проектов требованиям НТД с нескольких дней до нескольких часов и сроки планирования этапов ЖЦИ изделий-аналогов до 60%, повысить соответствие отчетной документации этапов ЖЦИ требованиям НТД на 10%.

6. Модели «ДК» и SysML-диаграммы объединены в единый ПМИ на базе MS Excel. Валидация ПМИ доказала его эффективность в рамках коммуникации данных «ДК» с помощью SysML-диаграмм и отслеживания всех взаимосвязей требований с помощью модели «ДК».

7. Создан учебно-методический материал для обучения разработанному ПМИ МОСИ. После применения в учебном процессе МФТИ, получена положительная обратная связь.

Учитывая преимущества полученного ПМИ МОСИ можно утверждать, что его использование совершенствует процесс проектирования новых изделий на основе широкого использования ИТ и позволяет повысить скорость реализации этапов ЖЦИ ПиР изделий-аналогов на 5-10%. Следовательно, он содержит в себе научно-техническую и экономическую целесообразность использования как в космическом приборостроении, так и в других отраслях.

Успешная ВиВ решений и разработок этого исследования позволяет сделать вывод о том, что разработанный ПМИ МОСИ позволяет преодолеть выявленные недостатки SysML, СФК, ДК и ПО для их использования. А значит, он также помогает осуществить и ускорить плавный переход от документно-ориентированного подхода управления проектом к проектированию и разработке систем в парадигме МОСИ. Цель работы достигнута.

Результаты исследования были доложены на форуме «ИТОПК-2020» в рамках секции 8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цифровая трансформация космического приборостроения [под редакцией А.А. Романова, А.А. Романова, Ю.М. Урличича]. Королёв: АО «ЦНИИмаш», 2020. 397 с.
2. Романов А.А. Смена парадигмы разработки инновационной продукции: от разрозненных НИОКР к цифровым проектам полного жизненного цикла // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2017. Т. 4. Вып. 2. С. 68-84.
3. Olivier L. de Weck Fundamentals of Systems Engineering. Session 1 Systems Engineering Overview Stakeholder Analysis // Электронный ресурс: MIT. 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).
4. Koski J. Quality function deployment in requirements engineering: a review and case studies. Электронный ресурс Helsinki University of Technology. 2003. URL: <http://www.soberit.tkk.fi/core/reports/mbajouko-koski.pdf> (дата обращения: 08.09.2019).
5. Stansfield K., Mazur G. INCOSE UK Annual Systems Engineering Conference 2016 - Academic Research Showcase // Электронный ресурс INCOSE UK. 2016. URL: https://incoseuk.org/Documents/Events/ASEC2016/Posters/INCOSE_Poster_2016_-_Impact_ISO_16355_on_SE_vs_2.00_Kim_Stansfield_Glenn_Mazur.pdf (дата обращения 08.05.2020).
6. INCOSE. Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities, version 4.0. Hoboken, NJ, USA: John Wiley and Sons, 2015.
7. Романов А.А. и другие. Глава 6. Интегрированная модель сложной технической системы // Цифровая трансформация космического приборостроения / Под редакцией А.А. Романова, А.А. Романова, Ю.М. Урличича. Королёв: АО «ЦНИИмаш», 2020. - 397 с.
8. Delligatti L. SysML Distilled: A Brief Guide to the Systems Modeling Language, 1st ed. - Addison-Wesley Professional, 2013.
9. Estefan J. et al. Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies, Rev // INCOSE MBSE Focus Group. 2007. Т. 25. №. 8. С. 1-12.
10. Friedenthal S., Moore A., Steiner R. A practical guide to SysML: the systems modeling language. Morgan Kaufmann, 2014.
11. Cloutier R., Bone M. MBSE survey // Материалы INCOSE IW, 2015. Электронный ресурс OMG. 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).
12. Wolny S. et al. Thirteen years of SysML: a systematic mapping study // Software and Systems Modeling. 2020. Т. 19. № 1. С. 111-169.
13. Challenges of MBSE: A study towards unified term understanding and the state of usage of SysML / Albers A., Zingel C. // Smart Product Engineering: Proceedings of the 23rd CIRP Design Conference. Springer. Bochum, Germany, March 11th - 13th, 2013. С. 83-92.
14. Kasser J.E. Seven SE myths and the corresponding realities // Proceedings of the Systems Engineering Test and Evaluation Conference, Adelaide, Australia, 2010. С. 1-13.
15. Tower J. Model Based Systems Engineering-The State of the Nation // INCOSE UK Annual Systems Engineering Conference (ASEC), UK-Oxfordshire. 2013.
16. Chami M., Bruel J.M. A Survey on MBSE Adoption Challenges. INCOSE EMEASEC. 2018 URL: https://oatao.univ-toulouse.fr/22637/1/chami_22637.pdf (дата обращения 07.12.2020).
17. Романов А.А., Шпота 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.
18. Taguchi G. and Clausing D. Robust Quality // HBR. January-February 1990. С. 65-75.
19. Sullivan L. P. Quality Function Deployment: A System to Assure that Customer Needs Drive the Product

- Design and Production Process // Quality Progress (ASQC). 1986. С. 39-50.
20. Романов А.А. Прикладной системный инжиниринг // М.: «Физматлит», 2015. 556 с.
 21. Wang H., Xie M., Goh T.N. A comparative study of the prioritization matrix method and the analytic hierarchy process technique in QFD // TQM. 1998. Т. 9. № 6. С. 421-430.
 22. Herzwurm G., Mellis W., Schockert S. Higher customer satisfaction with prioritizing and focused software quality function deployment // Электронный ресурс BWI. URL: https://www.bwi.uni-stuttgart.de/abt8/dokumente/publikationen/Publikationen_Herzwurm3/paper.pdf (дата обращения 07.12.2020).
 23. Bouchereau V., Rowlands H. Methods and techniques to help quality function deployment (QFD) // Benchmarking: An International Journal. 2000. Т. 7. № 1. С. 8-20.
 24. Kathawala Y., Motwani J. Implementing quality function deployment // The TQM Magazine. 1994. Т. 6. № 6. С. 31-37.
 25. Hunt R.A. et al. Best practice QFD application: an internal/external benchmarking approach based on Ford Motors' experience // International Journal of Quality & Reliability Management. 2005. Т. 22. № 1. С. 38-58.
 26. Wolniak R. The use of QFD method advantages and limitation // Production Engineering Archives. 2018. Т. 18. № 18. С. 14-17.
 27. Курунова Р.Р. Оценка качества спецификаций требований пользователей на стадии формирования концепции программных средств на основе qfd-методологии: дис. канд. технических наук. ФГБОУВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», 2018. 167 с.
 28. 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. Т. 2. № 2. С. 132-146.
 29. Романов А.А., Шпотя Д.А. Методика определения важнейших инженерных характеристик изделия как основа идентификации критических технологий // Труды МФТИ. 2016. Т. 8, № 4. С. 155-168.
 30. Mazur G.H. Q. F. D. Red Belt. Beyond ISO 16355: QFD for a Digital World // Материалы 23rd International QFD Symposium ISOQFD 2017. Tokyo. 2017.
 31. Herzwurm G., Schockert S. What are the Best Practices of QFD? // Transactions from the 12th Int. Symposium on Quality Function Deployment, Tokyo, Japan, 2006.
 32. Watanabe Y., Kawakami Y., Iizawa N. Software requirements analysis method using QFD // Proceedings of 18th International Symposium on Quality Function Deployment. 2012.
 33. 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.
 34. Abu-Assab S. Integration of preference analysis methods into QFD for elderly people // Integration of preference analysis method into QFD. Gabler Verlag, 2012. С. 69-86.

OVERCOMING THE DISADVANTAGES OF THE SOFTWARE AND METHODOLOGICAL TOOLS OF MODEL-BASED SYSTEMS ENGINEERING USED IN THE DESIGN OF SYSTEMS

© 2020 A.A. Romanov, D.A. Shpotya

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia

The paper advocates the need to move from separate stages of the product life cycle (LC; R&D, production, operation) to a single project implemented in a new paradigm of system design based on software and methodological tools of model-based systems engineering (MBSE). Currently available in Russia foreign software (SW) and methodological MBSE tools for the design and development (D&D) of systems (including space instruments) are expensive and complex. This paper formulates and considers the question: «Is it possible to reduce the cost and simplify the use of software and methodological MBSE tools by means that are available to a wide audience of users?». To answer this question, the authors analyzed SysML, QFD method, HoQ method, and the SW for their application. As the result of literature review, it is shown that in the leading countries, the relevance of implementing these tools in the design and development of hardware and software systems is increasing. For the use of SysML, QFD, HoQ by a wide audience of potential users from Russian Federation were defined software tools. 13 disadvantages that prevent the application of SysML, QFD and HoQ, as well as SW for their use were identified. In order to overcome the identified disadvantages, was developed SW and methodological MBSE tool based on modernization, specification and synthesis of SysML, QFD, HoQ and SW for their application. The developed MBSE SW and methodological tool allows for a wide audience of users to D&D systems in accordance with MBSE approach (QFD, HoQ, SysML), to identify critical requirements of different development elements, to develop automatically (in a few hours instead of several days) and update SysML models of requirements, to reduce labor costs for the implementation of the D&D LC stages of future analog products by 5-10%. As a result of validation of SysML models, it is proved that their repeated use reduces the planning time of the LC stages of analog products by up to 60%, increases the compliance of the reporting documentation of the LC stages with the requirements of regulatory and technical documents by 10%.

Keywords: Model-Based Systems Engineering, MBSE, SysML, QFD, HoQ, Software, disadvantages analysis, methodological tools, system design.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-6-92-103

Alexey Romanov, Doctor of Technics, Professor.

E-mail: romanov48@yandex.ru

Denis Shpotya, Postgraduate Student.

E-mail: denis.shpotya@phystech.edu