

# МЕТОДИЧЕСКАЯ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА ПРОЦЕССА СИСТЕМНОЙ ИНЖЕНЕРИИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Егоров И.И., Королев А.С.

РТУ МИРЭА,

Россия, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78

egorov@moscowmail.com, korolev@mirea.ru

*Аннотация: В статье рассмотрены процессы проектирования и производства сложных технических систем в соответствии с принципами и подходами современной системной инженерии. Приведены особенности документо-ориентированного и модели-ориентированного подходов к разработке систем. Предложен список специализированного программного обеспечения, покрывающий нужды инженеров в рамках выделенных процессов проектирования.*

Ключевые слова: цифровое производство, индустрия 4.0, модели-ориентированная системная инженерия, архитектура, PLM, ARCADIA.

## Введение

Важным аспектом современного производства является управление моделью жизненного цикла создаваемых систем, с целью обеспечения эффективности разработки с точки зрения всех заинтересованных сторон. В отношении обозначенного управления можно выделить два подхода системной инженерии – документо-ориентированный и модели-ориентированный [1].

Подход документо-ориентированной системной инженерии в сочетании с каскадной моделью жизненного цикла системы хорошо зарекомендовал себя в практике создания сложных технических систем с середины 20 века. Он постоянно развивался, формализовывался, было выпущено большое количество стандартов и рекомендаций. В связи с этим, создание моделей не стало основной практикой, а носило вспомогательный характер. Одним из примеров документо-ориентированной разработки является подход, заложенный в стандарте по созданию автоматизированных систем ГОСТ 34.601, который и сейчас носит актуальный характер.

С другой стороны, в современной системной инженерии активно развивается модели-ориентированный подход к разработке (Model-Based Systems Engineering – MBSE), при котором разработка систем ведётся с применением моделей вплоть до выпуска первого изделия. Модели, обладающие достаточной степенью детализации и прошедшие верификацию и валидацию, используются в качестве заданий для разработки систем. Применение принципов модели-ориентированной системной инженерии позволяет выполнять верификацию и валидацию системы на ранних этапах проектирования и добиваться основных декларируемых системной инженерией преимуществ – снижению рисков, относящихся к бюджету и срокам проекта.

MBSE может эффективно применяться в цифровом производстве на всех стадиях вплоть до изготовления первого изделия. Одним из ключевых факторов цифрового производства является концепция управления жизненным циклом продукта (PLM). Это бизнес-стратегия, которая поддерживает разработку технологических объектов, включая в себя всю информацию, необходимую на протяжении всех этапов их жизненного цикла (ЖЦ). Использование PLM системы позволяет проводить непрерывный процесс моделирования жизненного цикла методами системной инженерии от анализа требования заинтересованных сторон до вывода из эксплуатации готового изделия.

В свое время появился системно-ориентированный подход к разработке изделий на основе моделей (Systems-Drive Product Development – SDPD) [2], который сейчас применяется у разработчиков PLM систем мирового уровня и на предприятиях, внедряющих эти системы в свои производственные циклы как системы обеспечения.

Очевидна потребность в интеграции современных подходов создания сложных технических систем с целью повышения эффективности работы команд инженеров на разных стадиях ЖЦ изделия.

В этой работе представлены принципы интегрированного применения документо-ориентированного и модели-ориентированного подходов на стадиях разработки сложных технических изделий. Также проведен анализ методов и средств, которые позволяют применять эти подходы системной инженерии в интегрированной манере.

# 1 Документо-ориентированный и модели-ориентированный подходы к разработке сложных систем

## 1.1 Современные методики создания систем

Документо-ориентированный подход остается актуальным при разработке сложных систем и в российской и в зарубежной практике. Примерами стандартов, где представлен этот подход, можно назвать ГОСТ Р 15000 и ГОСТ 34.601. ГОСТ 34.601 задает, по сути дела, жизненный цикл системы, где обычно выставляют контрольные точки (или вехи), на которых принимают решения о продолжении работ, о приостановке работ, о проведении изменений и т.п., осуществляя таким образом управление разработкой. Как только в организации определено, на какой стадии жизненного цикла и согласно каким документам должно приниматься решение, начинает действовать кибернетическая модель, где пороговым значением является показатель качества «документа» – то есть проекта системы, проходящего несколько стадий от идеи и набора требований до комплекта рабочей и эксплуатационной документации [3].

Таким образом, процесс создания автоматизированной системы, согласно ГОСТ 34.601, представляет собой совокупность упорядоченных во времени, взаимосвязанных, объединенных в стадии и этапы работ, выполнение которых необходимо и достаточно для создания соответствующей заданным требованиям системы. Состав и правила выполнения работ на стадиях и этапах определяют в соответствующей документации организаций, участвующих в создании конкретных видов автоматизированных систем. Результаты процесса создания системы документируются в установленном порядке. Схожие методики есть и в западных стандартах и лучших практиках. В качестве примера из западной практики можно привести рекомендации INCOSE Systems Engineering Guide. Допустим, на стадии определения требований заинтересованных сторон, согласно этим рекомендациям, формируются следующие концепции (документы): производства; развертывания; функционирования; поддержки; утилизации.

При всех достоинствах документо-ориентированного подхода есть ряд особенностей, которые делают актуальной интеграцию модели-ориентированного подхода с документо-ориентированным. Допустим, процесс верификации и валидации в проектах сложных технических систем, проводимых в документо-ориентированной парадигме, обладает следующими недостатками [4]:

- Задействование большого количества экспертов;
- Итеративный характер работ и, как следствие, увеличение сроков проверок и проекта в целом;
- Лоскутное использование формальных проверок на основе моделей;
- Увеличение стоимости проверок и проекта в целом;
- Затруднённое управление изменениями и конфигурацией.

Рассмотрим V-образную модель разработки сложного технического изделия (рис. 1.), где по левой ветви идет декомпозиция системных описаний, по правой – сборка готового изделия, а в точке перегиба осуществляется реализация системы. При декомпозиции мы работаем в двух доменах – архитектурном и домене требований. При сборке осуществляется верификация системных решений каждой части системы с требованиями на соответствующем уровне.



Рис. 1. V-образная модель ЖЦ изделия

Согласно ГОСТ 34.601 происходят примерно те же процессы, только модель там каскадная, а не V-образная, и основные артефакты системы присутствуют в виде документных описаний. В модели-

ориентированной системной инженерии система моделируется на всех этапах ее жизненного цикла. Для этого мы используем соответствующие языки моделирования, инструменты и методы. Одним из примеров языков моделирования является SySML.

В общем случае модель системы представляет собой разнообразную информацию, отражающую требования заинтересованных сторон, в виде различных архитектурных точек зрения с использованием ряда артефактов моделирования.

Основной целью модели-ориентированной системной инженерии является определение функциональных и нефункциональных требований к системе на основе потребностей различных заинтересованных сторон. Таким образом модель может обеспечить архитектурное представление системы, которое соответствует этим требованиям. Оно должно представлять функциональную и логическую архитектуры системы, а также её физическую архитектуру на всех уровнях абстракции. Функциональные требования к системе позволяют идентифицировать различные функции системного уровня, которые в дальнейшем декомпозируются и распределяются между различными логическими подсистемами и компонентами системы. Физическая архитектура – это техническая реализация логической архитектуры. Архитектуры вместе составляют структурную и поведенческую модель системного проектирования.

Если смотреть на современный инструментарий подхода модели-ориентированной системной инженерии, то целесообразно, в первую очередь, обратить внимание на метод ARCADIA (Architecture Analysis & Design Integrated Approach) [5]. Он разрабатывался компанией Thales в промежутке с 2005 по 2010 года путем итеративного процесса с привлечением системных архитекторов компании из предметных областей. Метод ARCADIA представляет архитектурный подход к функциональному анализу систем в соответствии со стандартом ИСО/МЭК 42010. При этом он четко разделяет область проблем с целями, потребностями и требованиями заинтересованных сторон и область решений с функциями системы и ее компонентов и соответствующим списком требований.

Эффектом применения модели-ориентированной методологии является также стандартизация отчетов, генерируемых из репозитория данных. Различные описания представлений (view descriptions) во фреймворках превращаются в шаблоны для генератора отчетов в приложении моделирования. Фактически, фреймворки делают документы обязательной частью модели-ориентированной парадигмы.

## 1.2 Разработка системы в области проблем

При создании автоматизированной системы согласно ГОСТ 34.601 стадия формирования требований относится к системной инженерии в области проблем. В этой области изучается не система, а деятельность пользователей, выявляются их проблемы, потребности и цели и формируется спецификация требований заинтересованных сторон. К области проблем в подходе ARCADIA относится рассмотрение системы на уровне анализа применения (Operational Analysis). На нем также моделируется не система, а деятельность пользователя, формулируются проблемы, потребности, цели пользователей, выставляются количественные метрики достижения целей. Если обратиться к показателям оценки целесообразности создания системы, которые определяются согласно подходу ГОСТ 34.601, то в ARCADIA происходит примерно то же самое, но с другой понятийной базой. А именно, мы исходим из показателей эффективности выполнения миссии. Это так называемые MES – Measures of Effectiveness. Они представляют из себя деревья показателей, где вклад по отдельным ветвям вносят показатели выполнения задачи/результативности – MOP (Measures of Performance) и показатели пригодности MOS (Measures of Suitability). Согласно одному из принципов создания эффективной системы успех миссии требует содержательного планирования и решения правильной проблемы при помощи правильной системы в правильное время [6]. Время миссии задается характеристикой MET (Mission Event Timeline). На основе приведенной системы показателей формируются возможности применения (Operational Capabilities) на уровне ОА согласно ARCADIA, которые потом, в области решений, преобразуются в System Capabilities. Понятие Capability включает в себя классическое понятие функции и связывает его с показателями результативности миссии, что придает новый смысл современному функциональному анализу сложных систем. Теперь трассировка и связность функций с архитектурными компонентами системы будет вестись с учетом этих показателей, что даст возможность осуществлять валидацию архитектурных описаний системы на всех уровнях.

Помимо архитектурного моделирования в области проблем идет моделирование системы в домене требований. По ГОСТ 34.601 требования документируются на этапе «Формирование требований пользователя к автоматизированной системе». Аналогично, по методике ARCADIA при построении

архитектурных описаний на уровне анализа применения, параллельно, в домене требований, формируются требования заинтересованных сторон, которые можно аллоцировать, или распределить, на элементы архитектурных описаний.

### 1.3 Разработка системы в области решений

Область решений появляется, как только разработчики сформировали варианты концепции автоматизированной системы с целью выбора того варианта, который максимальным образом удовлетворяет требования пользователей. По ГОСТ 34.601 это делается на проектных стадиях, к которым относятся стадии разработки концепции, эскизного проекта, технического проекта и рабочей документации.

Модель системы в области решений в ARCADIA появляется на уровне анализа потребностей в системе. В англоязычной терминологии этот уровень носит название System Analysis. Фактически, здесь специфицируют требуемые от системы функции, отделяя их от функций, выполняемых пользователями или внешними системами. При этом важно ограничить функциональный анализ, проводимый на этом уровне, только фиксацией потребности, исключая любой выбор или сведения о реализации. Параллельно, в домене требований, формируются требования к системе в целом, которые распределяются на соответствующие элементы архитектурных описаний.

Надо сказать, что стадия «Техническое задание» в ГОСТ 34.601 носит промежуточный характер по отношению к двум намеченным выше блокам работ – предпроектному и проектному. С одной стороны, эта стадия, конечно, относится ко второму блоку, так как на основе ТЗ ведется вся дальнейшая проектная работа. С другой стороны, большинство данных, входящий в ТЗ, формируется во время предпроектного обследования системы. В модели-ориентированной системной инженерии нет понятия ТЗ, там есть дерево спецификаций требований. Кроме документного представления требований есть модельное представление, где каждая сущность требования привязана к соответствующему архитектурному компоненту.

На стадиях эскизного и технического проектирования по ГОСТ 34.601 разрабатываются предварительные и затем более детальные решения по системе в целом и ее основным частям. На этих стадиях принимаются конкретные проектные решения, исходя из бюджета и сроков, отведенных на стадию. Однако нормативной документацией ГОСТ 34. не дается никаких конкретных методов проведения работ для получения описаний системы, достаточных для принятия решений.

Надо сказать, что в общем случае, на каждой из проектных стадий можно формировать все уровни архитектурных описаний по методу ARCADIA, начиная с уровня потребностей в системе. Хотя больший вес на эскизном проектировании остается за логической архитектурой, на техническом проектировании и стадии рабочей документации – за физической архитектурой и уровнем EPBS (End Product Breakdown Structure). Физическая архитектура на стадии «Рабочая документация» по ГОСТ 34.601 чаще всего представляется сборочным чертежом, монтажным чертежом и спецификацией, а точнее частью общей спецификации.

Уровень EPBS идет по методике ARCADIA за уровнем физической архитектуры. На этом уровне рассматривается состав системы из конкретных физических компонентов, подбираемых таким образом, чтобы удовлетворить проектным ограничениям и выбранной архитектуре, сделанным на предыдущих этапах. Можно сказать, что уровень декомпозиции конечного продукта по ARCADIA очень близок по содержанию к спецификации изделия по ГОСТ 2.053 и ГОСТ 19.202-78. И если принять такие обобщения, то ГОСТ 2.053-2013, в какой-то степени, является стандартом модели-ориентированной системной инженерии в отечественном варианте.

На рис. 2 представлена возможная модель деятельности при разработке системы в области решений. Работа проводится параллельно в домене требований и в домене архитектур. В архитектурном домене мы декомпозируем capabilities (возможности) на функции с уровня анализа системы в целом через анализ логической и физической архитектур. Функции можно привязать к архитектурным компонентам, например, при помощи N-квадрат матриц.

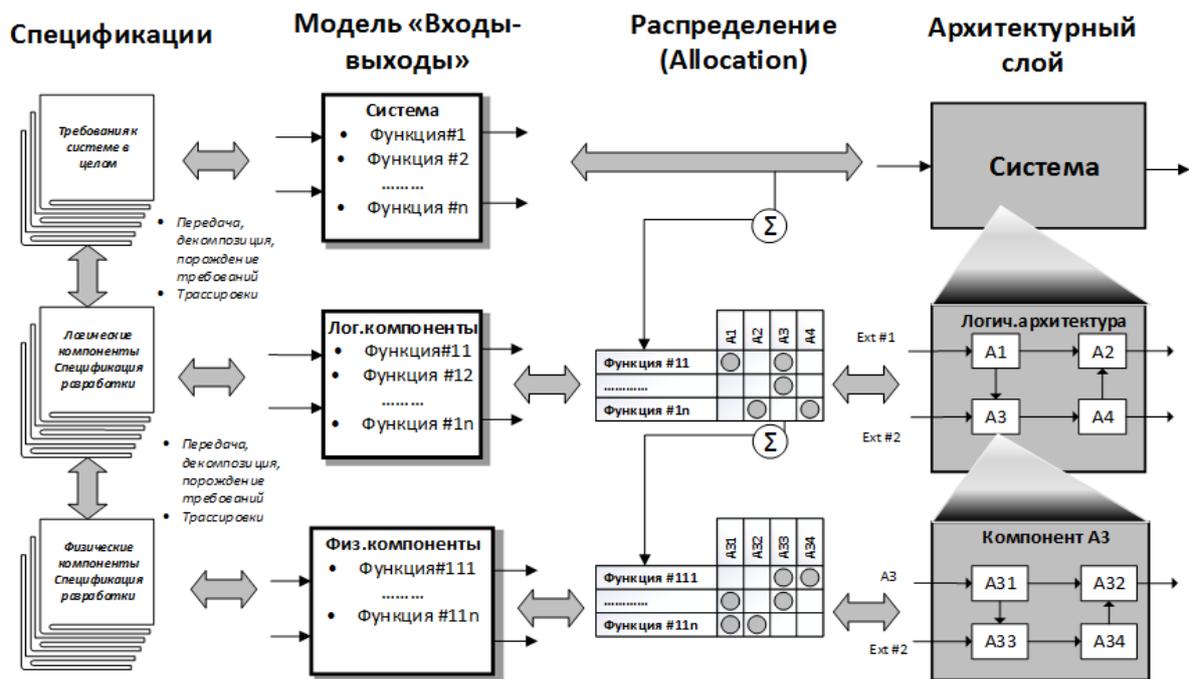


Рис. 2. Подход к функциональному анализу и разработке систем

Отметим выявленный нами важный момент, относящийся к интегрированному применению подходов ARCADIA и ГОСТ 34.601. Все архитектурные описания, выполняемые согласно методу ARCADIA могут присутствовать на всех проектных стадиях создания системы по ГОСТ 34.601. То есть, например, на стадии эскизного проектирования могут быть описания и системы в целом и логической и физической архитектуры. И на стадии технического проекта и рабочей документации – так же. Разница будет заключаться в степени их детализации и в объеме принимаемых решений по составу и поведению системы.

## 2 Инструментальные средства поддержки разработки систем

### 2.1 Построение архитектурных описаний

Для того, чтобы разработать полную архитектурную модель системы необходимо иметь специальную среду моделирования, которая поддерживает моделирование с использованием графического и/или текстового языков, строго определенной методологии моделирования и интуитивно понятного интерфейса.

В настоящее время существуют различные коммерческие и свободно распространяемые решения для моделирования систем, доступные системным инженерам для эффективного проектирования соответствующих систем. На выбор решения сильно влияют такие факторы, как область применения, отрасль, требуемая степень детализации модели и т.д.

Polarsys Capella является одним из инструментов, который совмещает и язык построения архитектурных описаний системы и метод такого построения и, собственно программную реализацию системы поддержки [7]. Capella позволяет моделировать систему в домене архитектуры и в домене требований. Для этого в инструменте есть набор соответствующих диаграмм. По типам это древовидные диаграммы декомпозиции, диаграммы взаимодействия, возможностей, функций, деятельности, потоков данных, сценариев и другие. При помощи Capella можно выполнить поддержку разработки на предпроектных и проектных стадиях по ГОСТ 34.601. Можно это сделать и в домене архитектуры, и в домене требований, реализовав объектные модели требований и связав сущности требований с элементами архитектурных описаний. В домене архитектуры моделируются архитектура применения, архитектура системы в целом, логическая, физическая архитектуры и конфигурация конечного продукта. В домене требований моделируются требования заинтересованных сторон, требования к системе в целом, к логическим и физическим компонентам. При этом, можно вести управление передачей требований с уровня на уровень, порождением новых требований, распределением требований по архитектурным компонентам.

На рис. 3 показан пример моделирования на уровне физической архитектуры.

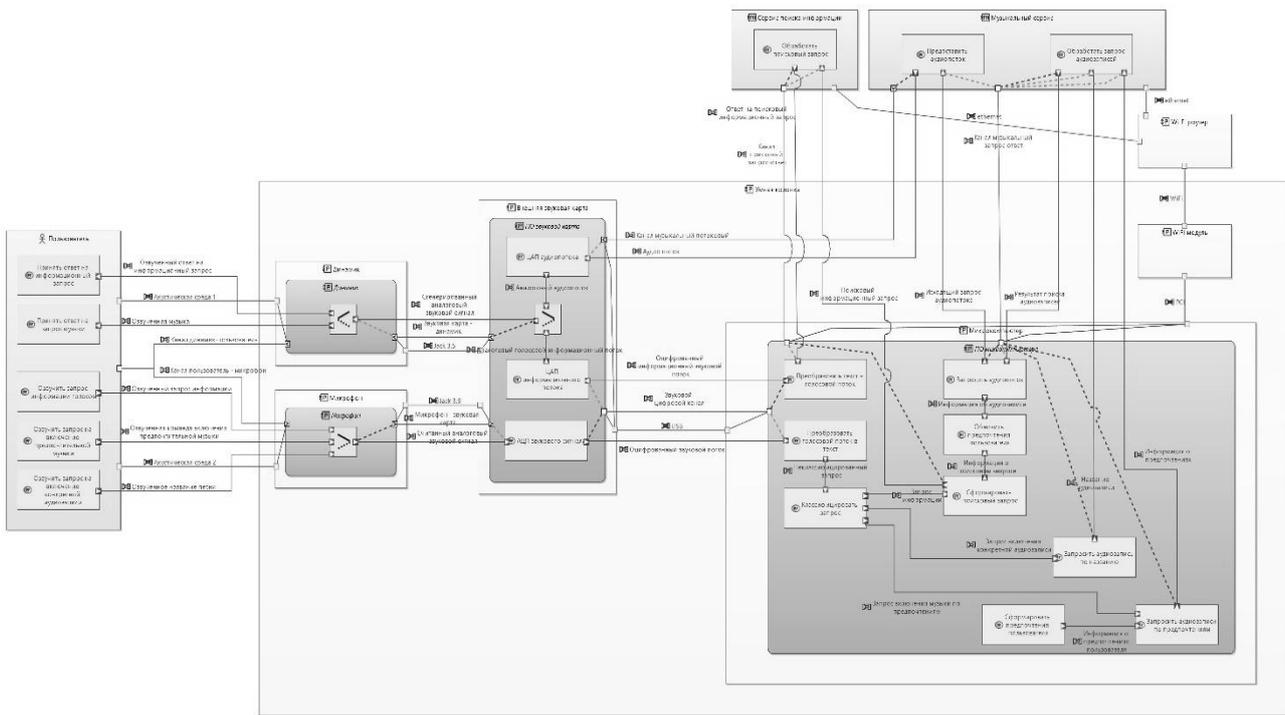


Рис. 3. Пример диаграммы уровня физической архитектуры инструмента Polarsys Capella

## 2.2 Моделирование поведения

Диаграммы ARCADIA/Capella довольно точно отражают системные требования и позволяют описать структуру и поведение системы. Тем не менее, анализ поведения систем для оценки требований здесь не предусмотрен. На помощь приходят инструменты моделирования, предназначенные для конкретной области. Одним из специализированных инструментов, предназначенным, в частности, для моделирования и симуляции поведения системы является, например, MathWorks Simulink.

## 2.3 Разработка CAD, CAE, CAM моделей

После определения потребностей и требований заинтересованных сторон и утверждения логической и физической архитектур приступают к детальному проектированию 2D-чертежей или 3D-моделей. Для автоматизации этой деятельности обычно используются системы автоматизированного проектирования (САПР). Стоит отметить, что некоторые современные САПР могут быть интегрированы с инструментами моделирования системной инженерии, тем самым обеспечивая прослеживаемость соотношения геометрии изделия и требований заинтересованных сторон. Эта интеграция позволяет инженерам повысить свою производительность, а также улучшить качество конструкторской документации.

Оптимальным вариантом специализированного программного обеспечения для отечественных пользователей является САПР от компании Top Системы – T-Flex CAD. Данная САПР построена на геометрическом ядре Parasolid (Siemens Digital Industries Software Inc.), которое на сегодняшний день считается одним из лучших ядер для 3D-моделирования.

По мере того, как проектируемые технологические объекты становятся все более сложными, время разработки продукта резко возрастает. Программные средства CAE со встроенными решателями, обеспечивающие реализации для различного типа анализов (например, линейного и нелинейного структурного анализа, динамического, акустического и термического анализа), необходимы для принятия обоснованных решений. Изделие можно анализировать и моделировать для него различные ситуации для прогнозирования производительности системы на ранних стадиях проектирования.

Программное обеспечение CAE позволяет оценить, как готовое изделие или его компоненты будут работать в ожидаемых и экстремальных условиях эксплуатации, экономически эффективно с точки зрения бюджета проекта. Однако производительность сложных технологических объектов зависит от большого количества переменных. Чтобы найти лучший вариант CAD модели, который удовлетворяет определенным критериям и множеству ограничений, инженерам необходимо запустить симуляцию несколько раз, и на ручное выполнение этих операций потребуется несколько

недель. Программное обеспечение для оптимизации CAD моделей выводит процесс инженерного анализа моделей на новый уровень, позволяя инженерам определять подходящие переменные конструкции, которые обеспечивают дизайн продукта с достаточной производительностью и значительно сокращают время на проектирование.

## 2.4 PLM платформа

Непрерывность потока информации обеспечивается PLM платформой, которая позволяет консолидировать и интегрировать различные модели, используемые на протяжении всего жизненного цикла разработки изделия. Платформа PLM также используется для проектирования производственного процесса и управления данными предприятия.

На основании предложенного стека программного обеспечения для задачи симуляции цифрового производства подойдёт цифровая платформа T-Flex PLM. Она поддерживает интеграции со многими CAD системами, в том числе поддерживается двухсторонняя интеграция с T-Flex CAD.

## 2.5 Специализированное программное обеспечение

Объединяя сказанное ранее можно предложить один из вариантов инструментария поддержки разработки систем на стадиях жизненного цикла (рис. 4). Он включает в себя инструментарий построения архитектурных описаний и инженерии требований, инструментарий имитационного моделирования, инструментарий PDM/PLM, инструментарий CAD с разными инструментами анализа и планирования производства [8].

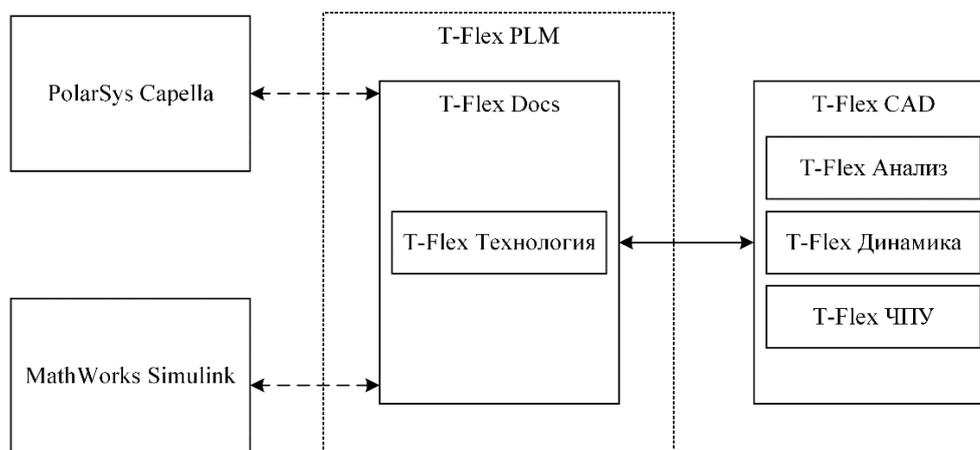


Рис. 4. Структура и интеграции предложенного стека СПО

К интеграции всех необходимых инструментов системного проектирования планомерно идут ведущие разработчики PLM-систем, например, Siemens со своим продуктом Teamcenter. Но по имеющимся у авторов данным полной интеграции пока не удалось достичь никому.

## Заключение

В современной системной инженерии интересны для применения в проектах как документо-ориентированный, так и модели-ориентированный подходы к разработке систем. Метод ARCADIA является представителем модели-ориентированного подхода к разработке систем, а ГОСТ 34.601 – представителем документо-ориентированного подхода. В статье продемонстрировано, что в проектах создания автоматизированных систем целесообразно установить связи между этими двумя подходами и применять их в интегрированной манере. Существует современный программный инструментарий, поддерживающий деятельность инженеров в процессе создания систем с использованием указанных подходов.

Компания Thales продвинулась в решении этих проблем, интегрировав методику, язык и инструмент в одном средстве – Capella (методика ARCADIA, язык Thales, основанный на SySML). Но до сих пор остается актуальной задача интеграции методики, языка и инструмента таким образом, чтобы проводить функциональный анализ совместно с инженерией требований, построением системной архитектуры, разработкой проектной и конструкторской документации на изделие. Это позволит повысить эффективность междисциплинарной работы проектных групп на стадии разработки концепции и на стадии инженерной разработки в жизненном цикле систем.

## Литература

1. *Paul Logan, David Harvey, Daniel Spencer*. Documents are an Essential Part of Model Based Systems Engineering// INCOSE International Symposium. – 2012, Vol 22(1), pp. 1899-1913.
2. *Vahid, Salehi & Burseg, Lukas*. (2016). System Driven Product Development (SDPD) by Means of Development of a Mechatronic Systems in an Industrial Context. 729-737. 10.1007/978-3-319-33111-9\_66.
3. *Сазонов Б.В., Кожевников Д.Е., Королев А.С.* Компетентностная модель и роль системного инженера в управлении жизненным циклом объекта атомной отрасли// Материалы четвертой Научно-практической конференции «Актуальные проблемы системной и программной инженерии». Сборник научных трудов/Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». – М.: Издательство НИУ ВШЭ, 2015 – С. 76-84.
4. *Anton S. Korolev, Alexander Yu. Shamanin* The Use of Formal Methods of Verification and Validation in NPP Design// IEEE Xplore Digital Library, 29 November 2018, Electronic ISBN: 978-1-5386-4924-4, Print on Demand (PoD) ISBN: 978-1-5386-4925-1, DOI: 10.1109/MLSD.2018.8551837.
5. *Jean-Luc Voirin*. Model-based System and Architecture Engineering with the Arcadia Method 1st Edition // ISBN: 9780081017944 ISTE Press – Elsevier. 2017.
6. *Wasson, Charles S*. System engineering analysis, design, and development: concepts, principles, and practices / Published by John Wiley & Sons. 2016. - 880 pages.
7. *Pascal Roques*. Systems Architecture Modeling with the Arcadia Method // ISBN: 9780081017920 ISTE Press – Elsevier. 2018
8. *Королев А.С., Егоров И.И., Щербаков В.В.* Информационные технологии поддержки управления жизненным циклом сложных технологических объектов// Информатизация и связь –Таганрог: Издательство ЮФУ, №6, 2020. С.61-65.