

DOI:
**СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОДУКТА "УПРАВЛЕНИЕ
ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ"¹**

Егоров И.И.,

*МИРЭА - Российский технологический университет, Россия, г. Москва,
Проспект Вернадского, дом 78
egorov@moscowmail.com*

Королев А.С.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, г. Москва,
Каширское ш., дом 31
askorolev@mephi.ru*

Аннотация: В статье рассмотрены процессы проектирования и производства сложных технологических объектов. Предложен список специализированного программного обеспечения, покрывающий нужды инженеров в рамках выделенных процессов проектирования. Определены направления работы по созданию симулятора виртуального цифрового производства.

Ключевые слова: цифровое производство, индустрия 4.0, модели-ориентированная системная инженерия, управление жизненным циклом, PLM платформа, Arcadia, Simulink, T-Flex, планирование производства.

Введение

Сложность современных технологических объектов исходит из того факта, что они включают в себя множество подсистем, охватывают несколько областей проектирования, а также включают в себя несколько вариантов системных архитектур на разных уровнях проектирования. Подсистемы взаимодействуют не только друг с другом, но и с окружающим миром, и каждое такое взаимодействие требует зачастую реализации нетривиального интерфейса. Кроме этого, подобные объекты включены в сложный процесс производства с управлением жизненным циклом продукции от анализа потребностей заинтересованных сторон и инженерии требований до вывода изделия на технологическую линию. Типовыми примерами такого рода объектов являются спутниковые и наземные метеостанции, системы контроля и управления на атомных станциях и т. д.

На растущую сложность современных технологических объектов большое влияние оказал резкий рост числа дисциплинарных областей, которые затрагиваются в процессе управления жизненным циклом таких объектов. Сложившаяся ситуация в сочетании с глобальной конкуренцией среди компаний требует оптимизированных подходов к разработке сложных технологических объектов, которые смогли бы использовать весь потенциал передовых технологий в проектировании и производстве [1].

Так называемая «Индустрия 4.0» или «Четвертая промышленная революция» требует изменения фокуса внимания в разработке сложных технологических объектов, и предлагает рассматривать их как кибер-физические системы, что в свою очередь требует фундаментальных изменений в подходах к разработке и производству по отношению к традиционным инженерным методам.

Цифровое производство в его более широком смысле было предложено для решения проблем, с которыми сталкиваются при разработке современных сложных технологических объектов. Индустрия 4.0 предлагает объединять передовые производственные технологии с концепцией интернета вещей для создания цифрового производства, которое способно передавать, анализировать и использовать информацию, для совершения дальнейших действий по отношению к физическому миру. 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. Управление жизненным циклом может быть реализовано при помощи специализированного программного обеспечения, в основе которого находится система управления данными о продукте (PDM).

Применение концепции цифрового производства подразумевает, что инженер обладает компетенциями по разработке сложных технологических объектов по принципам модели-ориентированной системной инженерии (MBSE) с использованием интегрированной цифровой

¹ Материал подготовлен в рамках работ по гранту преподавателям магистратуры благотворительной программы «Стипендиальная программа Владимира Потанина», заявка № ГК200000056.

платформы управления жизненным циклом. Типовые курсы по проектированию в САД-программах, охватывающие базовый процесс проектирования технологических объектов с акцентом на их механику, должны включать в себя обучение интегрированной цифровой платформе поддержки проектирования, которая реализует функционал управления полным жизненным циклом технологического объекта.

В настоящее время актуальной задачей является подготовка высококвалифицированных специалистов в области создания информационной модели изделия, содержащей все данные для его проектирования, производства, эксплуатации и утилизации. Очевидна потребность в специальном учебном курсе, который продемонстрирует цифровизацию процессов системной инженерии за счет интеграции модели-ориентированного подхода и концепции управления жизненным циклом технологического объекта. Обучение по курсу должно носить междисциплинарный характер и затрагивать разделы из области проектного управления (управление проектами, управление рисками, управление персоналом и другие), из области системной инженерии (управление требованиями, управление конфигурациями, разработка системных архитектур и другие) и специальные инженерные дисциплины (САД-проектирование, электротехника и другие). Таким образом произойдет расширение охвата проектирования изделия от рассмотрения конкретного объекта до управления жизненным циклом системы в целом. Использование PLM систем, в свою очередь, позволяет проводить непрерывный процесс моделирования жизненного цикла методами системной инженерии от анализа требований заинтересованных сторон до изготовления, сопровождения и вывода из эксплуатации готового изделия.

Предполагается, что в рамках разрабатываемого курса «Управление жизненным циклом сложных технологических объектов» слушатели узнают о том, как и когда применять разнообразные инженерные модели с разным уровнем детализации на разных этапах процесса разработки изделия таким образом, чтобы сделать процесс разработки более эффективным.

В этой работе указывается на необходимость в симуляторе цифровой производственной среды, который можно использовать для обучения инженеров, путём демонстрации передового опыта в разработке сложных технологических объектов. Важным аспектом при проектировании такого рода симулятора является понимание спектра процессов и прикладных задач, с которыми сталкивается современный инженер при проектировании и производстве какого-либо изделия. Данная информация может являться основой для определения стека специализированного программного обеспечения, которое позволит должным образом реализовать указанный симулятор.

Студент или слушатель программ повышения квалификации, получивший компетенции при помощи такого образовательного продукта и соответствующей системы обеспечения, будет носителем знаний по методикам создания, развертывания и использования инструментария современного цифрового производства, по ведению проектов создания сложных технических систем и по управлению их жизненным циклом. Вузы получают в свое распоряжение инфраструктуру виртуального предприятия, максимально приближенную к структуре предприятий отрасли.

1 Процессы проектирования и производства сложных технологических объектов

На сегодняшний день PLM-платформа обеспечивает непрерывность потока информации и позволяет консолидировать и интегрировать различные модели, используемые на протяжении всего жизненного цикла разработки изделия. Она также используется для проектирования производственного процесса и управления данными предприятия.

Процесс создания изделия начинается с разработки высокоуровневой модели проектируемой системы с использованием концепции MBSE. Поведение системы может быть смоделировано путем построения имитационной модели. Затем для оптимизации проектирования различных составных компонентов создаются трехмерные модели изделия при помощи технологий проектирования компьютерного дизайна (САД) и моделируются с использованием нескольких методов инженерного анализа (САЕ). На следующем этапе и с использованием инструментов автоматизированного производства (САМ) моделируется производственный процесс. Полученная структура объединяет в себе понятие «цифрового двойника» и управление потоком данных, обеспечиваемое PLM системой [2].

На рисунке 1 представлена V-модель жизненного цикла, которая рассматривает процесс разработки изделия от идеи до непосредственной реализации. Особенность данного вида модели состоит в том, что каждому этапу проектирования и разработки системы соответствует отдельный уровень интеграции и верификации. Этапы указанной модели жизненного цикла полностью

покрываются вышеописанными процессами проектирования. Так, например, этапы проектирования концепции применения, системных требований и верхнеуровневого проектирования, а также соответствующие им уровни верификации могут быть реализованы процессом разработки высокоуровневой модели на базе модели-ориентированного подхода.



Рис. 1. V-модель жизненного цикла

1.1 Высокоуровневая модель проектируемой системы

Согласно определению INCOSE, система представляет собой набор интегрированных элементов и подсистем, взаимодействующих друг с другом и окружающей средой, которые выполняют определенную задачу. Эти элементы включают в себя различного рода аппаратные средства, программное обеспечение, процессы, людей, информацию и различные сервисы. Системная инженерия является междисциплинарным подходом и средством, позволяющим реализовывать успешные системы. Системная инженерия фокусируется на проектировании и управлении сложными системами в течение их жизненного цикла, включая такие действия, как проектирование, анализ, интеграция, верификация и валидация. Модели-ориентированный подход в системной инженерии (Model-Based Systems Engineering, MBSE) подразумевает, что модель системы разрабатывается на ранних стадиях процесса и эволюционируют по мере разработки, в ходе жизненного цикла системы, выступая в качестве основы для процессов верификации и валидации. При этом развитие и уточнение модели осуществляется с использованием специальных методов и инструментов.

Модель системы представляет собой аспектное представление структуры и поведения системы, иногда называемое архитектурой. Для того, чтобы разработать полную модель системы необходимо иметь специальную среду моделирования, которая поддерживает моделирование с использованием графического и/или текстового языков, строго определенную методологию моделирования и интуитивно понятный интерфейс. В общем случае, модель системы представляет собой разнообразную информацию, отражающую требования заинтересованных сторон, в виде различных архитектурных точек зрения с использованием ряда артефактов моделирования. Модели, обладающие достаточной степенью детализации и прошедшие формальную верификацию, могут использоваться как задания для автоматизированных средств изготовления физических изделий и последующего управления ими, исключая искажение инженерных решений человеческим фактором исполнителей.

Основной целью модели-ориентированной системной инженерии является определение функциональных и нефункциональных требований к системе на основе потребностей различных заинтересованных сторон и построение архитектурных описаний системы, которые соответствуют этим требованиям. Архитектурные описания строятся на разных уровнях анализа системы: уровне анализа применения, уровне анализа потребностей в системе, уровне логической архитектуры, уровне физической архитектуры, уровне структурной декомпозиции конечного продукта. При работе на всех этих уровнях обычно применяют функциональный анализ. При этом функциональные требования к системе позволяют идентифицировать сначала функции системы в целом, которые в дальнейшем декомпозируются и распределяются между различными логическими подсистемами и компонентами системы. Архитектурные описания вместе формируют структурную и поведенческую модели системного проектирования.

В настоящее время существуют различные коммерческие и свободно распространяемые решения системного моделирования, доступные системным инженерам для реализации подхода модели-ориентированной системной инженерии. На выбор решения сильно влияют такие факторы, как область применения, отрасль, требуемая степень детализации модели и т.д.

Одним из общепризнанных инструментов, позволяющих реализовать подход модели-ориентированной системной инженерии, является методология Arcadia, неоднократно подтверждавшая свою эффективность в области проектирования программно-насыщенных систем для авиастроения, систем вооружения, телекоммуникации, ракетно- и спутникостроения. Различные перспективы (perspective), установленные в Arcadia, помогают структурировать реализацию метода на каждом из пяти перечисленных нами выше инженерно-технических уровней и связанных с ними моделями [3].

Polarsys Capella является свободно распространяемым инструментом модели-ориентированной системной инженерии, разработанным компанией Thales. При помощи этого инструмента можно строить архитектурные описания системы на разных уровнях (перспективах) согласно методологии Arcadia [4]. Так, на рисунке 2 представлен пример диаграммы уровня физической архитектуры, выполненной в средстве моделирования Polarsys Capella по методологии Arcadia.

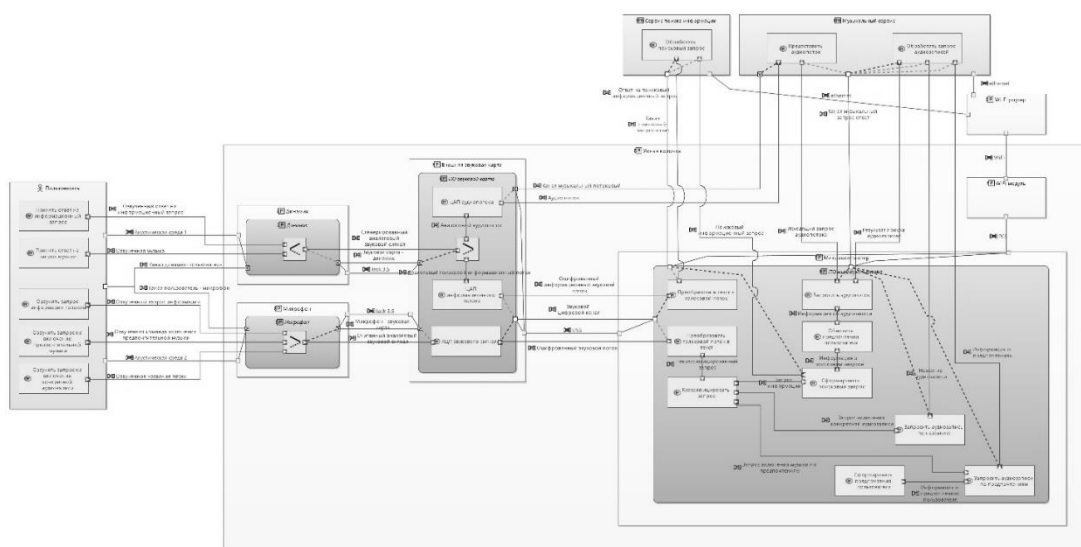


Рис.2 Пример диаграммы уровня физической архитектуры инструмента Polarsys Capella

1.2 Моделирование поведения системы

Модель архитектуры, определяющая структуру и поведение системы, должна быть проверена на соответствие предъявляемым к ней функциональным требованиям. Другими словами, речь идет о валидации логической архитектуры системы, чтобы затем смоделировать производительность системы на основе варьирования различных входных данных, таких как параметры компонентов системы или свойства окружающей среды. Моделе-ориентированная симуляция систем позволяет осуществить анализ поведения системы с помощью моделей непрерывной/дискретной симуляции [5].

Диаграммы Arcadia/Capella довольно точно отражают системные требования и позволяют описать структуру и поведение системы. Тем не менее, анализ поведения систем для оценки требований средствами Capella не предусмотрен.

Различные инструменты позволяют решать задачу подобного моделирования, однако все они ограничены. Следовательно, анализ моделей должен выполняться с использованием инструментов моделирования, предназначенных для конкретной области. Архитектура системы, подходящая для моделирования, состоит из различных компонентов и подсистем, связанных друг с другом при помощи различных портов и интерфейсов. Эти компоненты разработаны с использованием математических уравнений, описывающих соответствующие элементы исходной системы. Различного рода интерфейсы между этими компонентами облегчают обмен информацией, энергией, объектами через соответствующие порты компонентов. Для решения уравнений, коэффициентами которых являются элементы массива входных данных, используется специальный математический аппарат. Результаты вычислений могут интерпретироваться в виде графиков и/или оптимальных значений для различных системных переменных.

Одним из специализированных инструментов, предназначенным, в частности, для моделирования и симуляции поведения системы является MathWorks Simulink. Основными его преимуществами, ускоряющими, а значит и удешевляющими процесс проектирования являются:

1. Наличие готовых модулей и специальных инструментов для разных предметных областей;
2. Возможность повторного использования разработанных ранее компонентов;
3. Поддержка многоядерных систем и облачных вычислений при запуске симуляций;
4. Разнообразное выходное форматирование имитационных моделей в виде, например, веб-приложений или автономно исполняемых файлов.

На рисунке 3 продемонстрирован пример исполнения модели подброшенного тела в среде MathWorks Simulink – отражены такие физические факторы, как гравитация и сила трения, результатом моделирование является график положения тела в пространстве от времени.

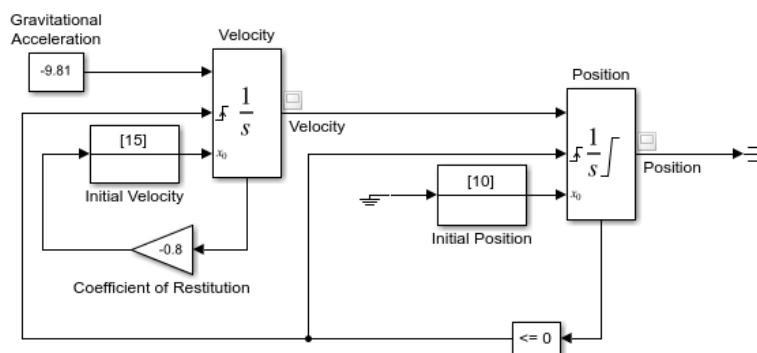


Рис. 3. Пример исполнения симуляционной модели в среде MathWorks Simulink

1.3 Разработка CAD моделей

После того, как потребности и требования заинтересованных сторон были определены, а логическая и физический архитектуры были утверждены, можно приступать к детальному проектированию 2D-чертежей или 3D-моделей.

Чтобы помочь разработчику в создании и оптимизации моделей, обычно используются системы автоматизированного проектирования (САПР). Стоит отметить, что некоторые современные САПР могут быть интегрированы с инструментами модели-ориентированной 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.

Приемлемым вариантом специализированного программного обеспечения для отечественных пользователей является САПР от компании Топ Системы – T-Flex CAD [6]. Данная САПР построена на геометрическом ядре Parasolid (Siemens Digital Industries Software Inc.), которое на сегодняшний день считается одним из лучших ядер для 3D-моделирования. Среди преимуществ можно отметить следующие:

1. Включена в Единый реестр российских программ;
2. Содержит мощные инструменты параметризации деталей и сборок;
3. Содержит инструменты коллективной работы над проектами;
4. Наличие интеграций с другими программами комплекса T-Flex PLM.

1.4 Инженерный анализ CAD моделей

Следующим этапом моделирования изделия при управлении его жизненным циклом является выполнение инженерного анализа геометрии полученной 3D-модели. Инструменты инженерного анализа (CAE) используются для решения различных видов инженерных задач, включая, например, анализ напряжения на деталях и сборках с использованием анализа методом конечных элементов (FEA), а также анализ теплового и жидкостного потоков.

По мере того, как проектируемые технологические объекты становятся все более сложными, время разработки продукта резко возрастает. Таким образом, для принятия обоснованных решений необходимы программные средства CAE со встроенными решателями, обеспечивающие реализации для различного типа анализов (например, линейного и нелинейного структурного анализа, динамического, акустического и термического анализа). 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.

Рассмотренная ранее САПР T-Flex CAD имеет в своём составе интегрированные среды расчётных систем:

1. T-Flex Анализ – интегрированная среда конечно-элементных расчётов, которая позволяет, в частности, проводить статистический, динамический и тепловой анализы;
2. T-Flex Динамика – интегрированный программный модуль, который обеспечивает проведение динамических расчётов и анализ пространственных механических систем.

Также рассматриваемая САПР содержит библиотеку пружин (сжатия-растяжения, тарельчатые, кручения, конические) с готовыми расчетами, проведенными по соответствующим методикам.

1.5 Планирование производства

После этапа оптимизации CAD модели следует этап планирования производства изделия. Этот этап включает в себя проектирование производственного процесса, моделирование процесса валидации изделия, проектирование производственной линии, а также имитация процесса сборки отдельного компонента или изделия в целом.

Ядро производственного процесса – это совокупность CAD модели и ведомости конструкционных материалов (eBOM). Последний из артефактов используется для автоматической генерации производственной ведомости материалов (MBOM), из которой создается технологическая спецификация или ведомость объёма работ (BOP).

С другой стороны, САМ также используется для моделирования производства отдельных составных компонентов изделия. Так, например, наиболее часто используемым технологическим процессом является механическая обработка – траектория инструмента обработки генерируется автоматически на основании имеющихся артефактов моделирования.

Современные инструменты проектирования поддерживают все эти функции, однако степень интегрированности процессов между собой и уровень их автоматизации варьируются от одной платформы к другой. Для оптимизации закупки лицензий на программное обеспечение предложено рассмотреть продукты серии T-Flex.

Так, процесс подготовки необходимой документации покрывается системой T-Flex Технология, входящей в состав продукта T-Flex DOCs и позволяющей организовать единое информационно-справочное пространство для технологов и конструкторов. Процесс моделирования механической обработки изделия покрывается программным модулем T-Flex ЧПУ, который позволяет создавать траектории обработки (3D и 5D фрезерование), опираясь на трехмерную геометрию изделия.

1.6 PLM платформа

Непрерывность потока информации обеспечивается PLM платформой, которая позволяет консолидировать и интегрировать модели на всех этапах проектирования изделия. 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.

Открытым остаётся вопрос разработки интеграций со сторонними приложениями, покрывающими более высокие уровни проектирования. У предложенной цифровой платформы существует единый открытый программный интерфейс, который позволяет сторонним разработчикам создавать интеграционные модули для повышения уровня автоматизации процесса проектирования изделия.

Так, на рисунке 4 изображена диаграмма, отражающая структуру и интеграции предложенного стека специализированного программного обеспечения. Пунктирными стрелками отмечены отсутствующие на текущий момент интеграционные связи.

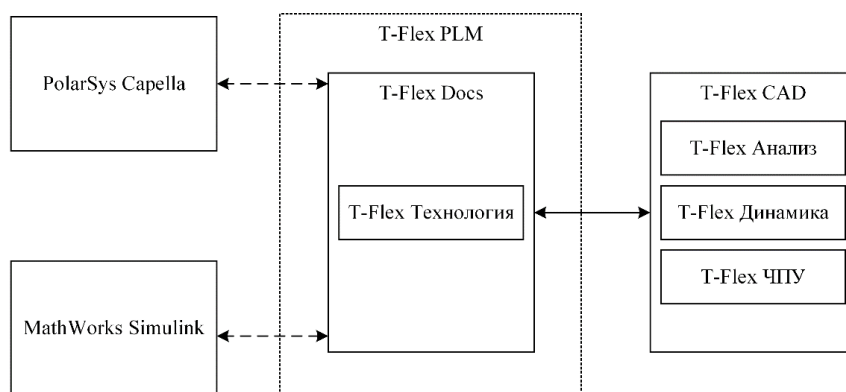


Рис. 4. Структура и интеграции предложенного стека СПО

Заключение

Внедрение учебно-методических материалов и инструментальных средств образовательного продукта «Управление жизненным циклом сложных технологических объектов» позволит приблизить образовательную среду вузов к условиям современного цифрового производства. Студенты или слушатели программ повышения квалификации, пройдя процесс обучения, смогут гармонично встраиваться в производственный процесс на предприятиях индустрии. В образовательном процессе посредством внедрения такого продукта удастся реализовать компетентностный подход, ориентированный на выполнение проекта группой профессионалов, умеющих работать в команде в единой информационной среде, созданной на базе высокоскоростной компьютерной сети и современных CAD/CAM/CAE/PDM/SCADA/MES/ERP-систем.

В данной работе было представлено следующее:

1. Определены процессы проектирования и производства сложных технологических объектов, а именно разработка высокоуровневой модели проектируемой системы, разработка CAD моделей, их инженерный анализ, а также планирование производства;
2. Предложен список специализированного программного обеспечения, покрывающий нужды инженеров в рамках выделенных процессов проектирования.

Одним из дальнейших направлений работ является детализированное проектирование системы обеспечения курса «Управление жизненным циклом сложных технологических объектов» в виде симулятора виртуального производства.

Также остро стоит задача разработки интеграционных модулей между предложенной PLM системой и сторонним программным обеспечением – PolarSys Capella и MathWorks Simulink, так как наличие подобных модулей может значительно повысить эффективность использования ресурсов проекта.

Литература

1. Щейников С.П. Системно-ориентированный подход к разработке продукции на базе продуктов Siemens PLM Software // Рациональное управление предприятием #2/2017. – С. 58-60
2. Rareeran P. Innovative Digital Manufacturing Curriculum for Industry 4.0 // Procedia Manufacturing 34. – Pennsylvania, 2019. – pp. 1043-1050
3. Jean-Luc Voirin. Model-based System and Architecture Engineering with the Arcadia Method 1st Edition // ISBN: 9780081017944 ISTE Press – Elsevier. 2017
4. Capella MBSE Tool – Arcadia [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.eclipse.org/capella/arcadia.html>
5. Xiang Xuejun Real-time Digital Simulation of Control System with LabVIEW Simulation Interface Toolkit // 2007 Chinese Control Conference
6. Платформа T-Flex PLM [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.tfex.ru/products/docs/docslines/>