

На правах рукописи



Павлов Павел Юрьевич

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПРЕЦЕДЕНТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СБОРКИ УЗЛОВ ТРУБОПРОВОДНЫХ
СИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Специальность: 05.13.12- Системы автоматизации проектирования
по техническим наукам (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск — 2018

Работа выполнена на кафедре «Вычислительная техника» Ульяновского государственного технического университета.

Научный руководитель — **Соснин Петр Иванович**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Вычислительная техника»
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный
технический университет»

Официальные оппоненты: **Бурдо Георгий Борисович**,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Технологии и автоматизации
машиностроения» ФГБОУ ВО «Тверской
государственный технический университет»

Перфильев Олег Владимирович,
кандидат технических наук,
Инженер-конструктор 2 категории, Ульяновский
филиал ПАО «Туполев»

Ведущая организация — **Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»**

Защита состоится «28» декабря 2018 г. в «15» часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д212.277.01 при Ульяновском государственном техническом университете по адресу: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32 (ауд. 211, главный корпус).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ульяновского государственного технического университета. Также диссертация и автореферат размещены в сети Internet на сайте УлГТУ - <http://www.ulstu.ru/>

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Смирнов Виталий Иванович

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Авиационное производство является одной из высокотехнологичных отраслей промышленности. Отличительная черта данной отрасли в большой номенклатуре деталей, узлов, агрегатов, большом количестве вовлеченного персонала и длительности цикла разработки и эксплуатации изделия.

Процесс разработки летательного аппарата (ЛА) и его изготовления - это междисциплинарная деятельность, основанная на интенсивном использовании различных геометрических моделей деталей, сборок и их комплексов на разных этапах жизненного цикла (ЖЦ) большим количеством инженеров и специалистов. Поэтому существует такой артефакт, как строительная мастер-геометрия (СМГ), который как единый источник информации при геометрической увязки деталей в узлы и который может совместно использоваться пользователями для параллельного решения широкого круга задач в режиме реального времени.

Так же стоит отметить, что ЖЦ ЛА является очень длительным и может составлять 5-10 лет на разработку и 40-50 лет на эксплуатацию, поэтому качество принятых технических решений инженерами на этапах разработки и производства может быть оценено только спустя десятилетия на этапе испытаний или эксплуатации самолета. Что привело к необходимости аккумулировать опыт в виде различной нормативной документации, которая, в настоящий момент, в основном представлена в виде различных справочников, стандартов, инструкций и классификаторов, существующим недостатком которых является медленный процесс расширения и обновления, а также малая интерактивность при работе пользователя с информацией.

Так как современный самолет является очень сложным техническим решением, то диссертационное исследование будет ограничено рамками металлических деталей и узлов трубопроводов систем и процессом подготовки производства и их узловой сборки. Здесь стоит отметить, что в ЖЦ каждого отдельного трубопровода накапливается большое количество информации, связанной с конкретными этапами ЖЦ при помощи обозначений или идентификаторов, таких как номер технологического процесса (ТП), номер используемого технологического оснащения (ТО) и т.д. Для автоматизации поддержки ЖЦ целесообразно включить методы и средства прецедентно-ориентированной поддержки, которые позволяют создавать специализированные онтологии, статьи которых позволяют специалистам интегрировать необходимую информацию для каждого этапа подготовки производства и в самом производстве. Так же важным аргументом в пользу включения средств онтологической поддержки в процесс конструкторско-технологической подготовки производства (КТПП) трубопроводных систем ЛА является необходимость геометрического моделирования деталей и сборок, согласованных с представлением самолета в его онтологическом пространстве, которое необходимо учитывать в производственных процессах, а в частности при проектировании специального ТО (СТО) для сборки трубопроводов систем ЛА в том числе и с использованием промышленного сварочного робота.

Предлагаемые методы и средства прецедентно-ориентированной поддержки процесса КТПП сборки трубопроводов ЛА, ориентированы на: контролируемое накопление профессионального опыта, являющегося результатом работы инженерного персонала в процессе подготовки производства и сборки трубопроводов в форме моделей прецедентов, подготовленных к повторному использованию; создание прикладной интерактивной онтологии, содержащей модели деталей и узлов трубопроводов, а так же модели СТО; контролируемое использование лексики при работе с нормативными и разрабатываемыми документами в процессе КТПП.

Инструментом для работы с прецедентами, создания модели онтологии и средств сопровождения производственных процессов была выбрана вопросно-ответная моделирующая среда WIQA, основным преимуществом которой являются широкие возможности материализации, которые позволяют повысить уровень автоматизации при принятии технических решений.

Областью исследования настоящей работы является процесс конструкторско-технологической подготовки сборки трубопроводов летательного аппарата.

Объектом исследования являются геометрически согласованное проектирование и сборка узлов трубопроводов с использованием СТО в условиях роботизированной сварки.

Предмет исследования настоящей работы являются методы и средства прецедентно-ориентированного проектирования и сборки узлов трубопроводных систем ЛА, геометрическое моделирование которых согласовано с СМГ и геометрией технологического оснащения

Направление исследований в диссертации связано с геометрическим моделированием деталей и узлов трубопроводов в пространстве СМГ ЛА и их позиционированием учитывающем технологические средства для их сборки:

- с исследованием применения СМГ ЛА на различных этапах ЖЦ, а в особенности на этапе подготовки производства и предварительной сборки узлов трубопроводов сваркой с использованием промышленного робота.

- с исследованием способов представления деталей и узлов трубопроводов систем, а также ТО в виде моделей прецедентов, связанных онтологически и геометрически с пространством СМГ, а также учитывающих все основные их особенности при сборке.

- с исследованием средств прецедентно-ориентированной поддержки, обеспечивающей контролируемое накопление опыта принятия технических решений на этапах КТПП и предварительной узловой сборки трубопроводов в форме моделей прецедентов, подготовленных к повторному использованию.

Целью диссертационного исследования является разработка геометрических моделей деталей и узлов трубопроводов ЛА, а также СТО, обеспечивающее прецедентно-ориентированное контролируемое накопление опыта технологической подготовки производства трубопроводных систем, а также связанные с этим позитивные эффекты.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе были решены следующие задачи:

1. Провести анализ значения мастер-геометрии самолета в проектировании и подготовки производства.

2. Провести анализ трубопроводов, входящих в различные системы летательного аппарата для выделения геометрического подобия и составления классификатора.

3. Провести анализ существующих технологических и производственных процессов и используемой оснастки для сборки трубопроводов в том числе и с использованием сварочного робота.

4. Разработать средства, ориентированные на прецедентное геометрическое моделирование компонентов трубопровода в промышленных условиях атрибуты, которых имеют связь с СМГ самолета.

5. Разработать средства онтологического сопровождения, которые ориентированы на геометрические модели деталей трубопровода и узлов, свариваемых промышленным роботом в условиях применяемой ТО. Онтологические средства должны обеспечивать интеграцию этих моделей в прецеденты и взаимодействовать с ними на определенных этапах КТПП.

6. Разработать механизмы инструментально-технологического сопровождения процессов технологической подготовки производства, в котором применяются сварочные роботы, с использованием средств онтологической поддержки.

7. Разработать методики, обеспечивающие прецедентно-ориентированное накопление опыта на этапах ЖЦ сборки трубопроводов в форме моделей прецедентов.

8. Разработать методы согласования систем координат для деталей, узлов и СТО, в том числе и с учетом роботизированной сварки для различных этапов ЖЦ трубопровода ЛА

9. Включить в состав программно-функционального комплекса конструкторско-технологической подготовки производства инструментально-моделирующую среду, предназначенную для работы с прикладными онтологиями.

Методы исследований. При решении задач, рассматриваемых в диссертации, были использованы системный подход, метод вопросно-ответного анализа, метод прецедентно-ориентированного решения проектных задач, вычислительные методы, а также методы программной инженерии.

Научная новизна:

1. Система согласованных геометрических моделей деталей металлических трубопроводов ЛА, их сборок и СТО, спецификации которых настроены на предварительную роботизированную сварку деталей, обеспечивающую требуемые технологические характеристики их позиционирования в рамках мастер-геометрии (МГ) ЛА.

2. Расширение атрибутики «имён» нормативной идентификации деталей трубопроводов, их сборок и средств оснастки, дополнительными составляющими, которые позволяют включить в представление деталей, сборок и средств оснастки их геометрические модели, связав их ассоциациями по смежности и сходству, способствующими улучшению характеристик поиска в системе имён.

3. Метод прецедентно-ориентированной интеграции геометрических моделей деталей и узлов трубопроводов ЛА, а также специализированных средств оснастки, обеспечивающий информационно-онтологическую поддержку проектно-технологического цикла создания трубопроводных систем.

4. Метод согласования систем координат (СК) деталей, сборок и СТО, обеспечивающий требуемые характеристики позиционирования деталей при сборке, в том числе с учетом и корректировкой погрешностей позиционирования СТО относительно положения сварочного промышленного робота при выполнении технологических операций.

Практическую ценность работы составляет разработанные скелетные геометрические и списковые представления деталей, узлов и СТО, которые применяются в качестве прецедентно-ориентированных моделей, интегрированных в инструментально-технологическую среду WIQA, а также метод согласования СК на разных этапах ЖЦ и модули автоматизации процесса проектирования в Siemens NX.

Положения, выносимые на защиту:

1. Система геометрических скелетных моделей деталей трубопроводов, их сборок и средств ТО, специфицированных в собственных СК, связанных линейными отношениями, каждая из которых конструктивно представлена в абсолютной СК ЛА (в его МГ), что упрощает расчёты по проверкам корректности позиционирования деталей в точках предварительной сварки.

2. Согласованная классификация деталей трубопроводов, их сборок и средств оснастки, в которой производственная классификация иерархического типа объединена с фассетной классификацией, вводящей дополнительную атрибутику геометрического

моделирования и ассоциативные связи по сходству и смежности, что расширяет класс задач, использующих классификации, и приводит к ряду полезных эффектов.

3. Секционированная структура онтологии и прецедентно-ориентированная спецификация её статей, интегрирующая модели деталей, их сборок и средств оснастки в форме, облегчающей их формирование, расширение, модификацию и повторное использование.

4. Совокупность автоматизированных методик онтологической поддержки, в которых не только открыт доступ к содержимой онтологии в точках ЖЦ КТПП, но и возможность согласования СК на различных этапах ЖЦ в том числе и с использованием сварочного робота.

5. Метод согласования СК деталей, узлов, СТО и сварочного робота на этапах ЖЦ, в том числе с учетом погрешностей позиционирования СТО относительно сварочного робота и их корректировкой.

Результаты исследований внедрены в учебный процесс подготовки магистрантов и студентов ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет», а также переданы для внедрения на АО «Авиастар-СП». Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ №2.1816.2017/ПЧ в ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-технической конференции «Теоретические и практические аспекты развития отечественного авиастроения», апрель 2012 г. Ульяновск; X Международной Четаевской конференции «Аналитическая механика, устойчивость и управление», 12-16 июня 2012 г. Казань; VI Международной конференции «Железнодорожное машиностроение, перспективы, технологии, приоритеты», 11-14 сентября 2013 г. экспериментальное кольцо ВНИИЖТ Москва; IV Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Современная российская наука глазами молодых исследователей», 17 февраля 2014 г. Красноярск; IV научно-практической конференции «Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития». 16-17 октября 2014 г. Ульяновск; VII Всероссийской научно-практической конференции: «Актуальные проблемы машиностроения», 25-27 марта 2015 г. Самара; IV Молодежной инновационном форуме Приволжского федерального округа, 13-15 мая 2015 г. Ульяновск; VIII Всероссийской научно-практической конференции: «Актуальные проблемы машиностроения» 2017; IEEE 12th International Conference on Application of Information and Communication Technologies, Kazakhstan, Almaty, 17-19 October 2018.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 16 печатных научных работ (из них 11 статей из перечня ВАК, 2 тезиса докладов) и 1 свидетельство о регистрации ПО для ЭВМ.

Личный вклад автора. Научные результаты проведенных исследований, представленные в диссертационной работе и, выносимые на защиту, получены автором лично. Научному руководителю, принадлежит выбор направления исследований, постановка задачи и конструктивное обсуждение. В публикациях с соавторами вклад соискателя определяется рамками представленных в диссертации результатов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (133 наименований) и 12 приложений; включает 191 страницу машинописного текста, 127 рисунков и 5 таблиц. Общий объем диссертационной работы – 232 страницы.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, цель и задачи работы, практическое значение, дана краткая характеристика работы и приведены основные результаты работы, выносимые на защиту.

В первой главе дается обзор особенностей проектирования трубопроводных систем ЛА и средств специального технологического оснащения, необходимых для их сборки. Проводится обзорно-тематический анализ используемых геометрических моделей, описываются подходы к решению задачи прецедентно-ориентированной поддержки процессов подготовки производства и узловой сборки, а также делается обобщенная постановка задачи.

Отмечается, что основным концептом, определяющим внешний облик разрабатываемого ЛА, а также задающим положение деталей или узлов в ЛА является СМГ или МГ, начало координат которой является точкой отсчета для позиционирования всех остальных частей самолета.

Раскрывается, что процесс разработки ЛА – это междисциплинарная деятельность, основанная на интенсивном использовании различных геометрических моделей деталей, сборок и их комплексов на разных этапах ЖЦ большим количеством инженеров и специалистов. Обосновывается, что в качестве единого источника информации, используемого для параллельного решения задач в реальном времени в процессе КТПП следует использовать такой артефакт как СМГ.

Учитывая, что теория и практика онтологического сопровождения процессов проектирования ЛА накопила богатый опыт их цифрового моделирования, позволяющий активно расширять и внедрять его в производственные процессы различных составляющих ЛА, в частности в КТПП сборки узлов трубопроводов, принято решение об использовании такого сопровождения для формирования и интеграции повторно используемых единиц опыта.

Подчеркивается, что целесообразно разработать новое представление моделей деталей и сборочных единиц (узлов), атрибуты которых сохраняют связь с МГ самолета, что должно позволить проводить согласование различных СК, необходимость которого возникает на этапах подготовки производства и производства трубопроводов для реализации возможности контроля геометрии стыков деталей с учетом их расположения в геометрическом пространстве самолета.

Отмечается, что для повышения эффективности процессов КТПП производства металлических трубопроводов ЛА необходимо разработать средства, ориентированные на прецедентное геометрическое моделирование компонентов трубопровода в промышленных условиях с учетом МГ самолета. А значит, что онтологическое сопровождение должно ориентироваться на геометрические модели деталей и узлов трубопроводов, свариваемых промышленным роботом в условиях применяемой то. Кроме того, онтологические средства должны обеспечивать интеграцию этих моделей в прецеденты и взаимодействовать с ними на этапах КТПП.

Для решения задач диссертационного исследования решено использовать инструментарий WIQA, включающий в себя средства для создания прикладных онтологий, которые закодированы в семантической памяти вопросно-ответного типа, ячейки которой могут хранить графические и любые другие файлы, полезные для использования инженерами.

Сформулирована обобщенная постановка задачи диссертационного исследования, проведен ее вопросно-ответный анализ, разработана мотивационно-целевая диаграмма, раскрывающая достижения поставленных целей.

Во второй главе рассматривается значение мастер-геометрии при проектировании деталей и сборок узлов, разрабатывается система геометрических моделей, а также их спецификации для скелетно-геометрического и спискового представлений деталей и сборок, выделяются основные геометрические дефекты сборки деталей трубопроводов сваркой, производится расширение нормативной системы наименования деталей и узлов, разрабатывается геометрическое и списковое представление технологического оснащения, включая расширение нормативной системы наименования оснастки, рассматриваются особенности программирования промышленных роботов с согласованием систем координат и преобразования систем координат для расчета поправочных коэффициентов, корректирующих неравномерность размещения оснастки на координатной плите.

При проектировании ЛА его СМГ (SMG^{LA}) служит основой для проектирования каркаса планера, что можно коротко выразить: $G(SMG^{LA}) \xrightarrow{R} G(Plan^{LA})$, где $G(Plan^{LA})$ – конструкция планера ЛА, состоящая из набора деталей и сборочных единиц, R – некоторая функция преобразований отображения, которую выполняет проектировщик при работе с исходными математическими моделями (в том числе и поверхностями) и построении новых математических моделей элементов ЛА.

Аналогичным образом можно кратко записать переход от конструкции планера к конструкции системы, в которую входят трубопроводы. Такой переход, например, для гидравлической системы ($G(Gidr^{Sys})$) можно записать: $G(Plan^{LA}) \xrightarrow{R} G(Gidr^{Sys})$, где $G(Gidr^{Sys}) = \{Det_i^{Sys}, i=1..n\}$

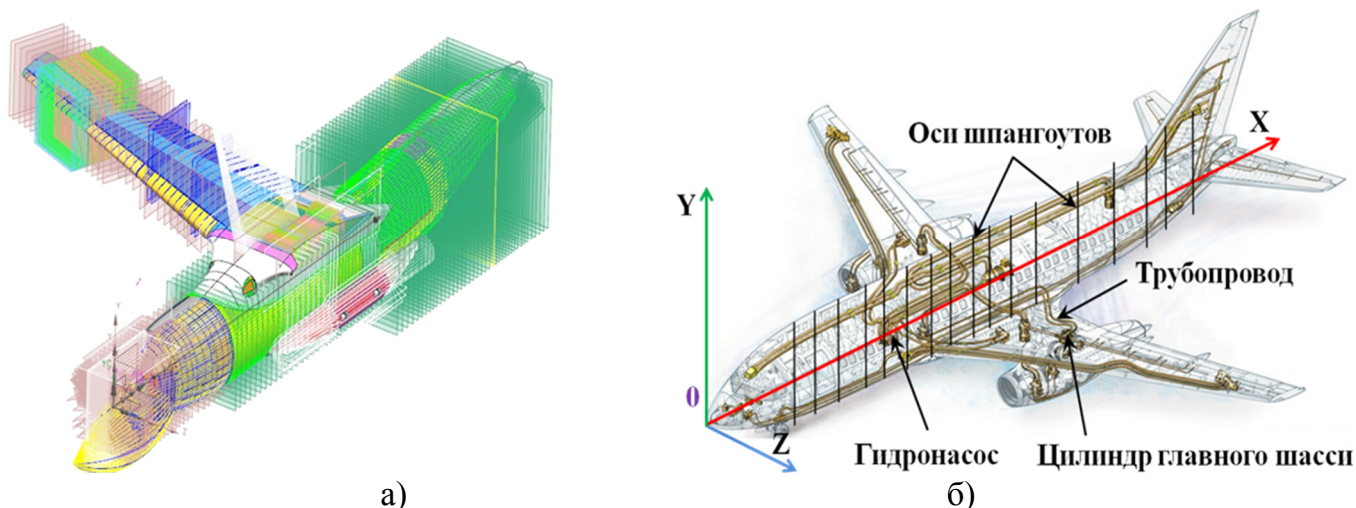


Рис. 1 а) Мастер геометрия б) трассировка трубопроводов гидравлической системы

Рассмотренные зависимости между геометрическими параметрами деталей и сборочных единиц ЛА позволили с геометрией каждой детали, привязанной к мастер-геометрии самолета, связать ее модель включающую:

1. Скелетное геометрическое представление в виде ломаного набора отрезков с ориентацией по осям трубопроводных частей с координатами концов в абсолютной системе координат самолета.

2. Списковое представление, элементы которого имеют следующий вид $\{det_number_1; connection_type; D1; P1_1, P2_1, P3_1, \$ det_number_2; connection_type; D2; P1_2, P2_2, P3_2\}$ для стыка деталей трубопровода, содержащее координаты трех точек стыка, где знаком «\$» производится разделение точек одного стыка, $det_number_1, det_number_2$ – номер детали в КД, $connection_type$ – тип соединения, $D1, D2$ – диаметры состыковываемых деталей, $P1_1, P2_1, P3_1, D2; P1_2, P2_2, P3_2$ – точки стыка двух деталей.

Формирование спискового представления стыков трубопровода рассматривается на примере двух труб. Для однозначного определения стыка трубы в пространстве выделяются три точки, расположенные на внутреннем диаметре трубопровода. Выбор внутреннего диаметра обусловлен тем, что по трубопроводу передается жидкость или газ и, следовательно, для нормального течения не должно быть никаких выступов и ступенек, в то время как форма наружной поверхности может быть произвольной.

Для деталей типа «труба прямая» и «труба гнутая» скелетное геометрическое представление каждой из них будет иметь вид отрезка, ограниченного плоскостями стыков. Списковое представление будет иметь вид: $det_number_i_1; connection_type_i_1; D_i; Pi_1, Pi_2, Pi_3, \$ det_number_i_2; connection_type_i_2; Pi_4, Pi_5, Pi_6$.

Такое геометрическое представление будет полезно использовать для формирования моделей прецедентов, привязанных к этапу проектирования деталей и узлов трубопроводов систем ЛА и, тем самым, связать этап проектирования с остальными этапами ЖЦ. Пример геометрического и спискового представления для сборки двух труб представлен на рисунке 2.

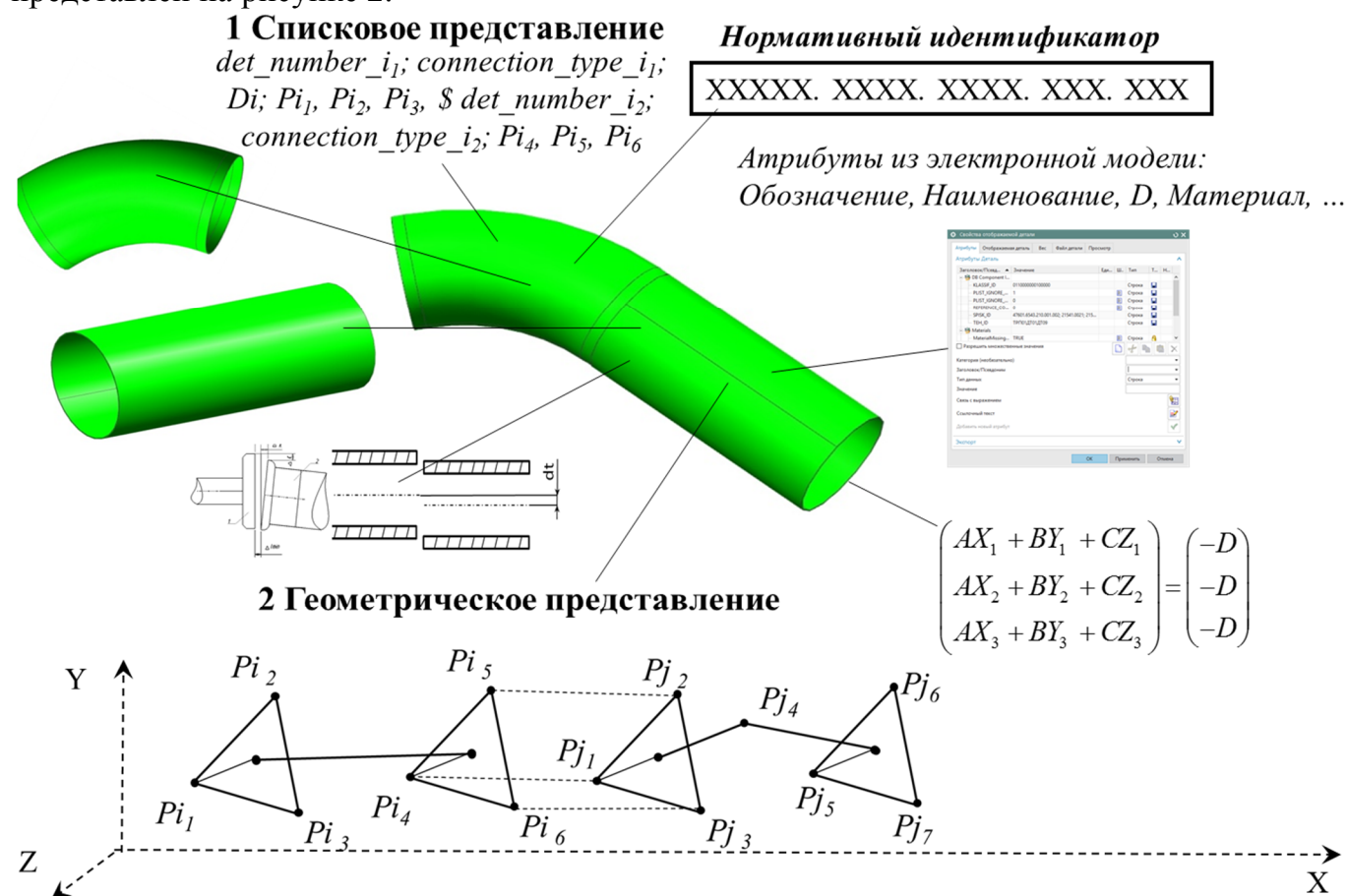


Рис. 2 Сборка двух труб в виде геометрического и спискового представления

Выбор трех точек стыка позволяет однозначно специфицировать положение торца соединения двух деталей, объединяемых по трассе трубопровода в пространстве в виде уравнения плоскости, которое в общем виде имеет вид $AX+BY+CZ+D=0$, где A, B, C – постоянные коэффициенты, а X, Y, Z – координаты и имеет решение в виде системы линейных алгебраических уравнений. Приведенные коэффициенты вычислялись для оценки возможности применения при обнаружении геометрических дефектов в контактах двух деталей на этапе сборки трубопровода. Получение трех точек стыка на практике возможно при помощи контрольно-измерительной машины или лазерного трекера.

Такое представление торца детали в виде математического уравнения дает представление о расположении соединяемого торца первой детали относительно торца

второй в пространстве после замера заданных точек на изготовленной детали и решения уравнений нахождения угла между плоскостями и расстояний от точки до плоскости. Применение данных уравнений будет использовано для проверки геометрических дефекты сварки трубопроводов. Основные геометрические дефекты свариваемых деталей можно разделить на три группы: осевые отклонения, линейны отклонения и угловые отклонения

Каждая деталь или сборочная единица имеет свои уникальные конструкционные элементы, которые отражены в определенной геометрической форме и возможно выделение топологически подобных деталей и сборочных единиц. Такое выделение сформировано в виде классификационного кода, состоящего из двух частей.

Первая часть классификационного кода представлена в виде иерархической древовидной структуры для типа сборочной единицы.

Вторая часть классификационного кода представлена в виде фасетного кода для кодирования деталей. Каждый тип деталей записан в таблицу и ему присвоен специальный код. Для обозначения детали введено значение «00» в виде сборочной единицы.

Такое представление деталей позволяет автоматизировать формирование классификационного кода для сборочной единицы путем добавления в фасетную часть значения «1» при наличии детали или «0» при ее отсутствии. Пример формирования классификационного кода представлен на рисунке 3.

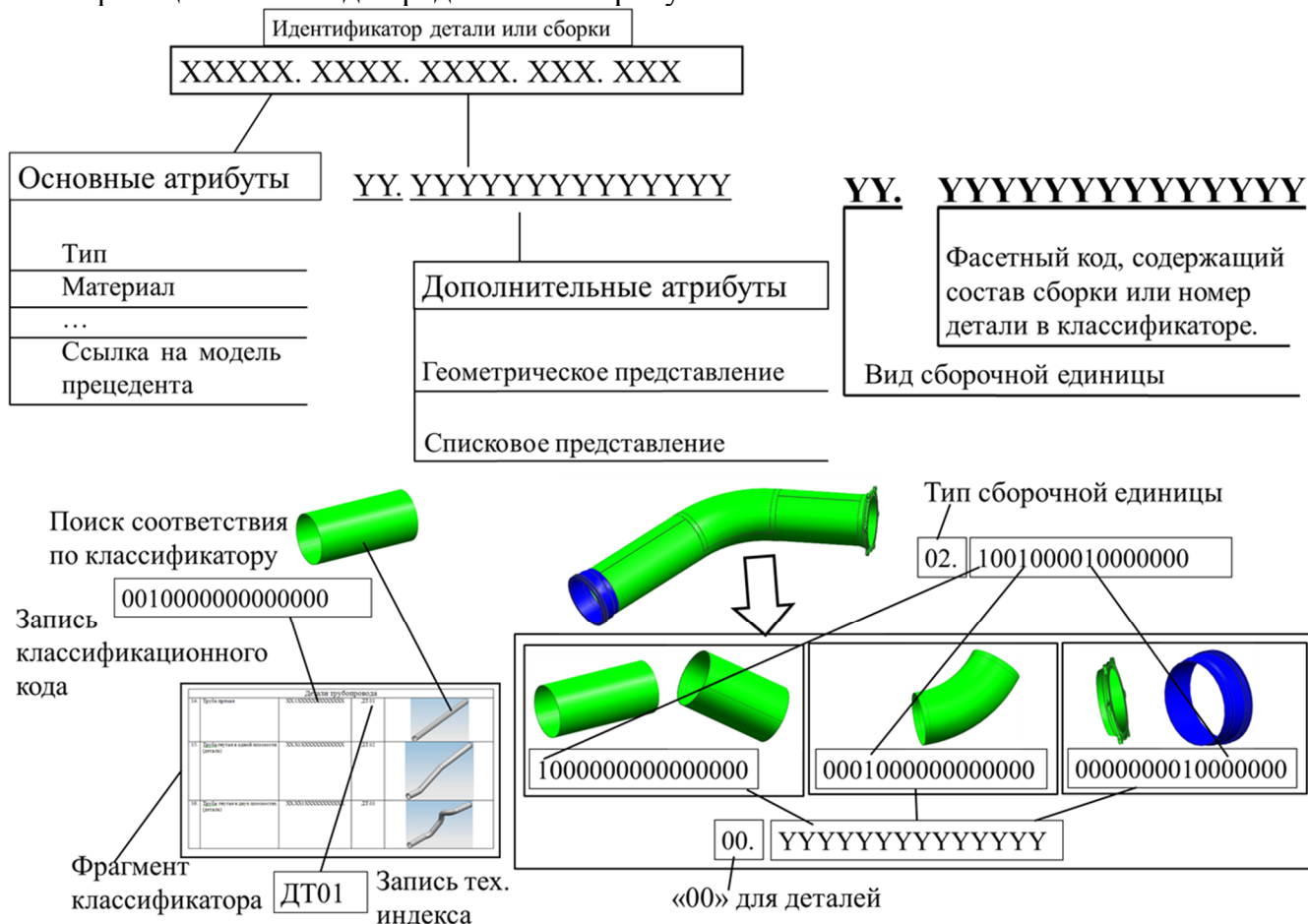


Рис. 3 Формирование классификационного кода для деталей и узлов трубопроводов

Для удобства чтения классификационного кода человеком введены технические индексы. Технический индекс содержит информацию о типе сборочной единицы или детали, записанной в виде набора букв и цифр. Для детали тех. индекс будет иметь вид «ДТХХ», где «ДТ» означает, что это деталь трубопровода, а «ХХ» - номер по классификатору. Аналогичным образом технический индекс формируется для сборочной единицы и будет иметь «ТРПХХДТХХ...ДТХХ», где «ТРП» означает что это сборка

Глава завершается основными выводами, подчеркивающими для элементов научной новизны сопровождающие их позитивные эффекты.

В третьей главе рассматривается система геометрических моделей деталей, сборок, оснастки, а также образования сборок в условиях предварительной сварки с позиций онтологического сопровождения этих процессов. В основу методологического обеспечения положена разработка системы прецедентных решений задач сборки деталей в узлы. Для представления таких решений была выбрана инструментально моделирующая среда WIQA, на базе которой разработан метод прецедентно-ориентированной интеграции геометрических моделей деталей и узлов трубопроводов ЛА, а также СТО, обеспечивающий информационно-онтологическую поддержку проектно-технологического цикла создания трубопроводных систем. Так же в главе рассматривается метод согласования СК деталей, узлов, СТО и сварочного робота с выходом на точки сварки.

В диссертационном исследовании к разряду прецедентов отнесены геометрические модели, разработанные и представленные во второй главе.

Для представления единиц профессионального опыта в виде прецедентов выбрана модель $M(Z_j)$ задачи Z_j его повторного использования инженером с учетом использования скелетного геометрического и спискового представлений деталей, узлов трубопроводов и СТО.

Рассмотрение моделей прецедентов, связанных с ЖЦ трубопроводов систем ЛА начнем с рассмотрения модели прецедента для прямой детали трубопровода постоянного сечения без ответвлений, что будет представлять собой постановку задачи $Z(P_i)$. Далее представим модель прецедента сборки узла трубопровода в виде набора специализированных моделей:

- **текстовая модель P^T** , в данном случае, будет содержать запрос на проектирование детали: «*спроектировать сборку трубопровода 12345.7564.010.000*».

- **логическая модель P^L** , конкретизирующая типовые модели в виде формулы логики предикатов, записанной на языке постановки задач P^T ;

Рассмотрим модель P^T описанную выше в виде логической модели, основанной на логике предикатов. Основные элементы построения представлены в таблице 1.

$Assembly = Det_i \cup Det_j \cup \{[Atrib]\}$

%раскрытие детали %

$Det_i = Tube \cup \{[Atrib]\}$

$Tube = G(L, D_1, D_2)$

Таблица 1

Библиотека элементов детали

№ п/п	Наименование	Обозначение	Представление	Примечание
1.	Det	Деталь	Комплексный элемент	
2.	Atrib	Атрибуты	Комплексный элемент	
3.	Tube	Труба	$G(L, D_1, D_2)$	
4.	L	длина	const	
5.	D_1	внутренний диаметр	const	
6.	D_2	наружный диаметр	const	
7.	S	Толщина стенки	$= D_1 - D_2$	

- **графическая модель прецедента P^G** , представляющая материализацию узла трубопровода в скелетном представлении, в виде ЭМД и КД (рис. 5).

- **вопросно-ответная модель прецедента P^{QA}** для задачи $Z(P_i)$, содержащая список вопросов и ответов:

Q1. Диаметр постоянный?

A1. Да.

Q2. Какое количество деталей собирается в узел?

A2. 2.

Q3. Есть ответвления?

A3. Нет.

Q4. Есть прямой участок?

A4. Да.

Q5. Есть участок с загибом в одной плоскости?

A5. Да.

Q6. Есть участок с загибом в двух плоскостях?

A6. Нет.

.....

Q15. Нужно оформление чертежа?

A15. Да

- модель P^I , представляющая вложенное в прецедент поведение в форме исходного кода его программы;

Ниже рассмотрим часть исходного кода исполнения задачи $Z(P_i)$ написанного в вопросно-ответной среде WIQA:

```
DD_CreateLine("Polyline", "ShapeName=1", "X=100", "Y=100", "X=300", "Y=100")
```

```
DD_Create ("Ellipse", "ShapeName=O1", "X=100", "Y=100", "Diametr=50")
```

```
DD_CreateLine("Polyline", "ShapeName=1", "X=300", "Y=300", "X=400", "Y=300")
```

- модель P^E , выводящая на исполняемый код программы, реализующей образец прецедента:

```
det_number_i1; connection_type_i1; Di1; Pi1; Pi2; Pi3; $
```

```
det_number_i2; connection_type_i2; Pi4; Pi5; Pi6. $
```

```
det_number_j1; connection_type_j1; Dj1; Pj1; Pj2; Pj3; $
```

```
det_number_j2; connection_type_j2; Pj4; Pj5; Pj6.
```

- интегральная модель прецедента P^S в виде его схемы, интегрирующей все специализированные модели прецедента в единое целое для узла трубопровода из двух деталей приведена на рисунке 5.

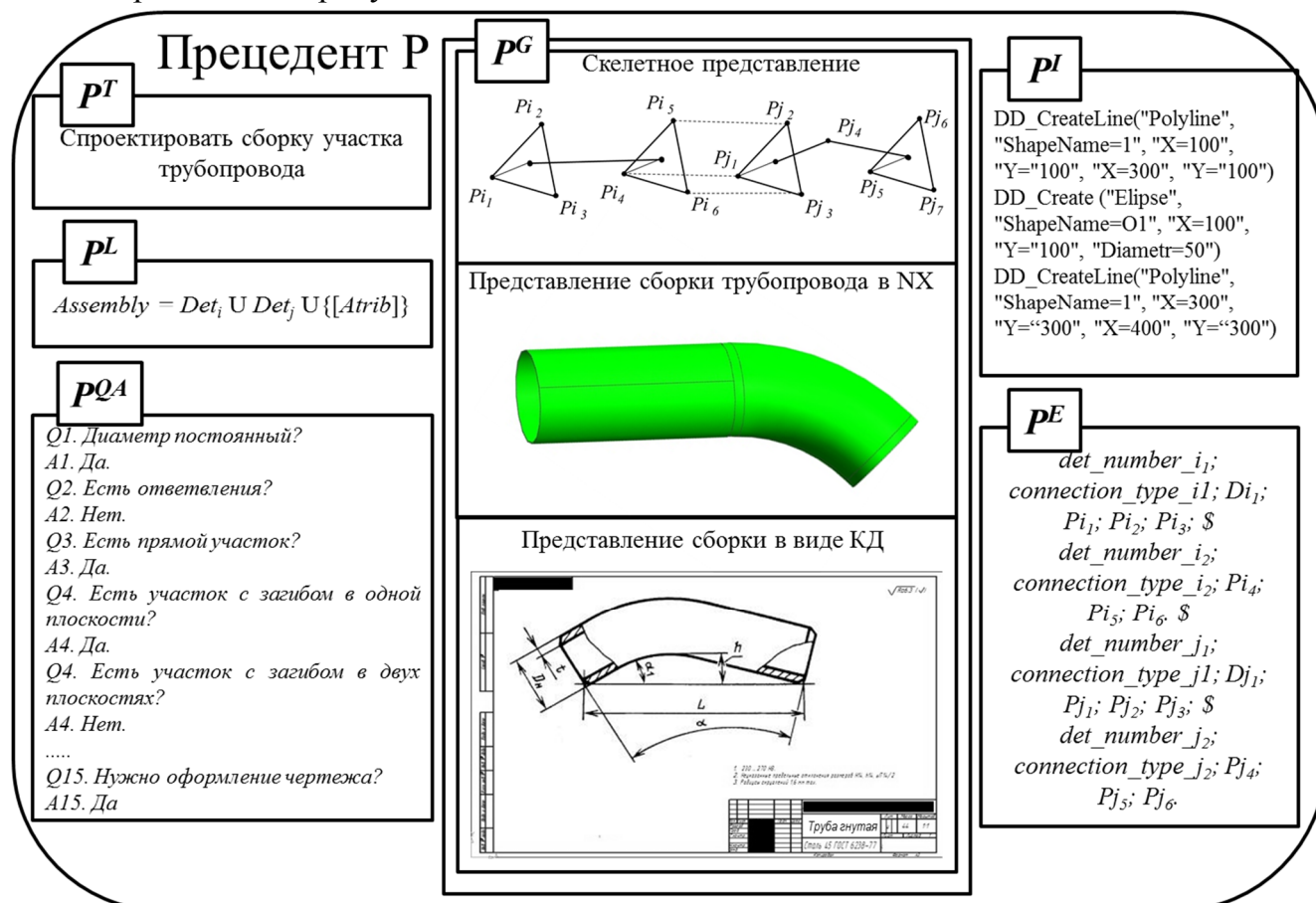


Рис. 5 Интегральная схема образца прецедента сборки узла трубопровода

узла, СТО или сварочного робота. Такие преобразования рассматриваются сначала для простого случая, когда учитываются только линейные преобразования

Так, например, для каждой i -ой детали трубопровода определена ее собственная СК,

$$X_i = X_0 + A_i$$

связанную с МГ следующим линейным преобразованием: $Y_i = Y_0 + B_i$, где X_0, Y_0, Z_0 –

$$Z_i = Z_0 + C_i$$

координаты i -ой детали в абсолютной СК самолета; X_i, Y_i, Z_i – координаты начала i -ой детали; A_i, B_i, C_i – величины линейных смещений начала координат абсолютной системы и начала координат i -ой детали.

Такая связь СК для одной из деталей трубопровода с абсолютной СК самолета может быть выражена матрицей $T_{oi}(A_i, B_i, C_i)$ размерностью 3×1 , представляющей собой вектор положения начала детали трубопровода относительно абсолютной СК. Так как деталь связана с деталями сборки узла на ее концах, то в этой СК можно представить координаты соединения, например, с СК j -ой детали в виде $T_{ij}(A_j, B_j, C_j)$.

На практике только линейных преобразований недостаточно, поэтому следует учитывать еще и пространственный поворот. Тогда матрица перехода из базовой СК в СК детали трубопровода, оснастки или сварочного робота с учетом линейных и угловых смещений в общем виде запишется: $R^{SK} = \begin{bmatrix} M & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, где T – матрица линейных преобразований, M – матрица поворота размерностью 3×3 . Данная матрица задает поворот базовой СК относительно СК объекта с помощью направляющих косинусов.

Результирующая матрица преобразования, связывающая СК с учетом поворота в развернутом виде будет иметь вид:

$$R^{SK} = \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\theta & \cos\varphi\sin\psi\sin\theta - \sin\varphi\cos\psi & \cos\varphi\sin\theta\cos\psi - \sin\varphi\sin\psi & A \\ \sin\varphi\cos\theta & \sin\varphi\sin\psi\sin\theta + \cos\varphi\cos\psi & \sin\varphi\sin\theta\cos\psi - \cos\varphi\sin\psi & B \\ -\sin\varphi & \cos\theta\sin\psi & \cos\theta\cos\psi & C \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Кроме согласования СК детали и оснастки так же требуется производить согласование с СК робота. Матрицу перехода для сварочного робота с учетом поворота СК можно записать в виде: $R_{ni}^R = \begin{bmatrix} M_i^R & T_i^R \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, где M_i^R – матрица поворота для СК сварочного робота относительно СК оснастки; T_i^R – матрица перехода для СК сварочного робота относительно СК оснастки.

Теперь с учетом расположения робота относительно оснастки можно записать пересчет точек сварки из СК оснастки в СК робота: $W_n^{Rij} = R_{ni}^R \times W_n^{ij}$, где W_n^{ij} – точка сварки i -ой и j -ой деталей в СК оснастки; W_n^{Rij} – точка сварки в СК робота.

Здесь матрицы W_n^{ij} и W_n^{Rij} имеют вид:

$$\begin{bmatrix} X_1^{ij} & \dots & X_k^{ij} & A^{ij} \\ Y_1^{ij} & \dots & Y_k^{ij} & B^{ij} \\ Z_1^{ij} & \dots & Z_k^{ij} & C^{ij} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

При отклонении положения СК оснастки и сварочного робота будут смещаться точки сварки, что может привести к возникновению погрешностей, т.к. запрограммированная траектория движения манипулятора выполняется в СК сварочного робота.

Поэтому в производственном процессе, после установки оснастки и при настройке сварочного робота необходимо ввести поправочные коэффициенты для точек сварки ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) или произвести их пересчет по формуле: $W_{nk}^{Rij} = R_{kij}^R \times W_n^{Rij}$, где W_{nk}^{Rij} – точка сварки

i -ой и j -ой деталей в СК сварочного робота после корректировки; $R_{kij}^R = \begin{bmatrix} M_{kij}^R & T_{kij}^R \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ -

матрица перехода, учитывающая погрешность позиционирования оснастки относительно сварочного робота.

Общая схема увязки СК, отражающая взаимосвязь деталей, узлов, оснастки, сварочного робота и точек сварки на различных этапах ЖЦ ЛА приведена на рисунке 7.

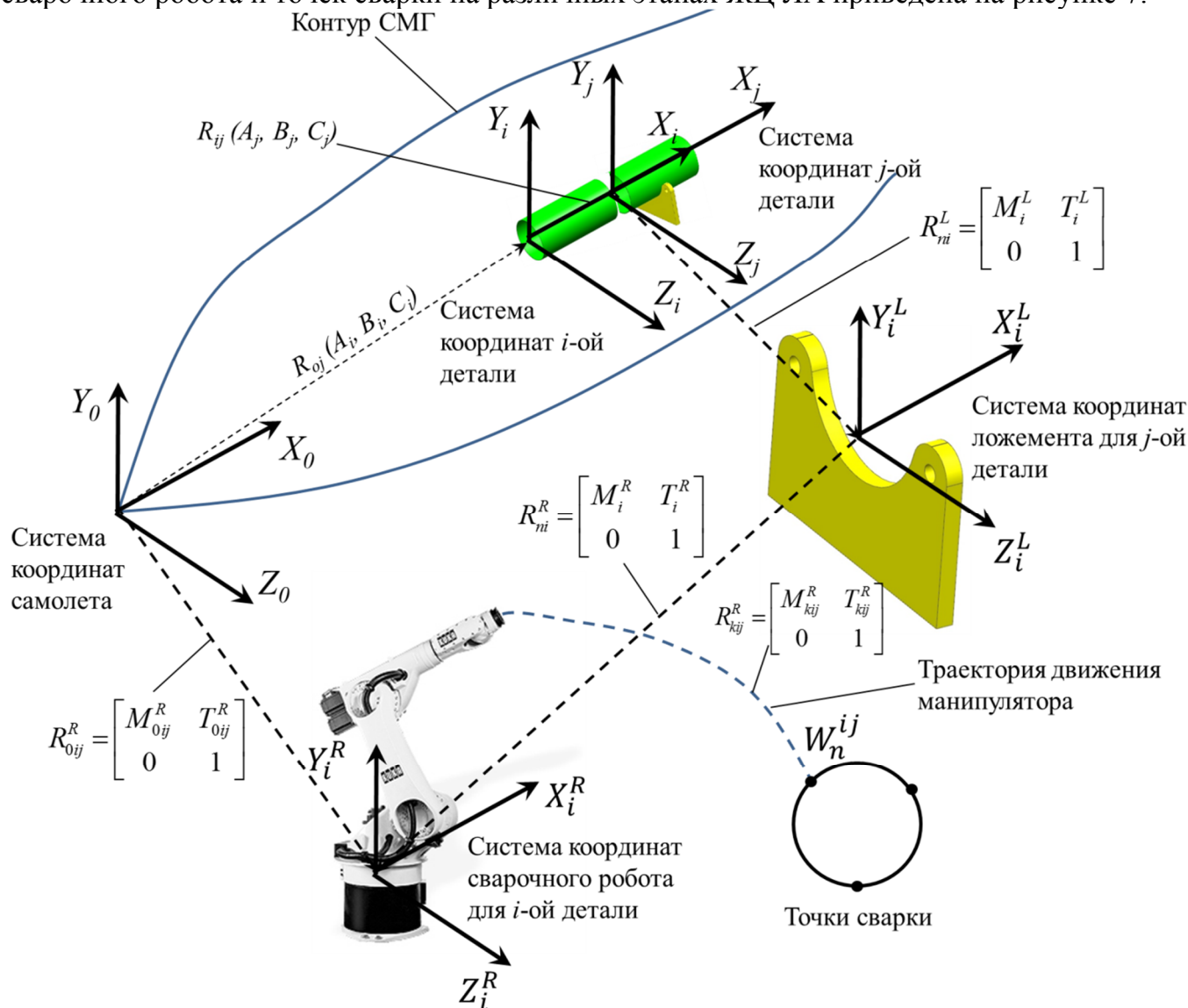


Рис. 7 Общая схема увязки СК

Приведенная выше связь СК позволяет при помощи матричных вычислений производить согласование между деталями, оснасткой, промышленным роботом, точками сварки с переходом выхода на координаты в СМГ самолета и возможностью производить корректировки траектории движения сварочного робота из-за отклонений взаимного расположения сварочного робота и оснастки.

Третья глава завершается основными выводами, в которых отражены основные позитивные эффекты для научной новизны.

В четвертой главе описываются основные составляющие эффекта от использования результатов работы.

Разработан компонентный и архитектурный состав проектируемой с учетом интеграции инструментально-моделирующей среды WIQA с существующими системами авиастроительного предприятия, позволяющий повысить уровень автоматизации рабочих

мест пользователей, участвующих в процессах подготовки производства трубопроводов систем ЛА за счет возможности работы в реальном времени с прикладной онтологией.

На базе инструментально-моделирующей среды WIQA реализована прикладная онтология и рекомендации по ее разработке для деталей и сборок трубопроводов (узлов) самолета, а также для ТО, необходимого для их сборки в условиях использования роботизированной сварки, что позволяет повысить эффективность принятия технических решений за счет повторного использования профессионального опыта и возможности проведения концептуальных экспериментов с моделями прецедентов. Пример такой материализации прецедентов в инструментально-моделирующей среде WIQA приведен на рисунке 8.

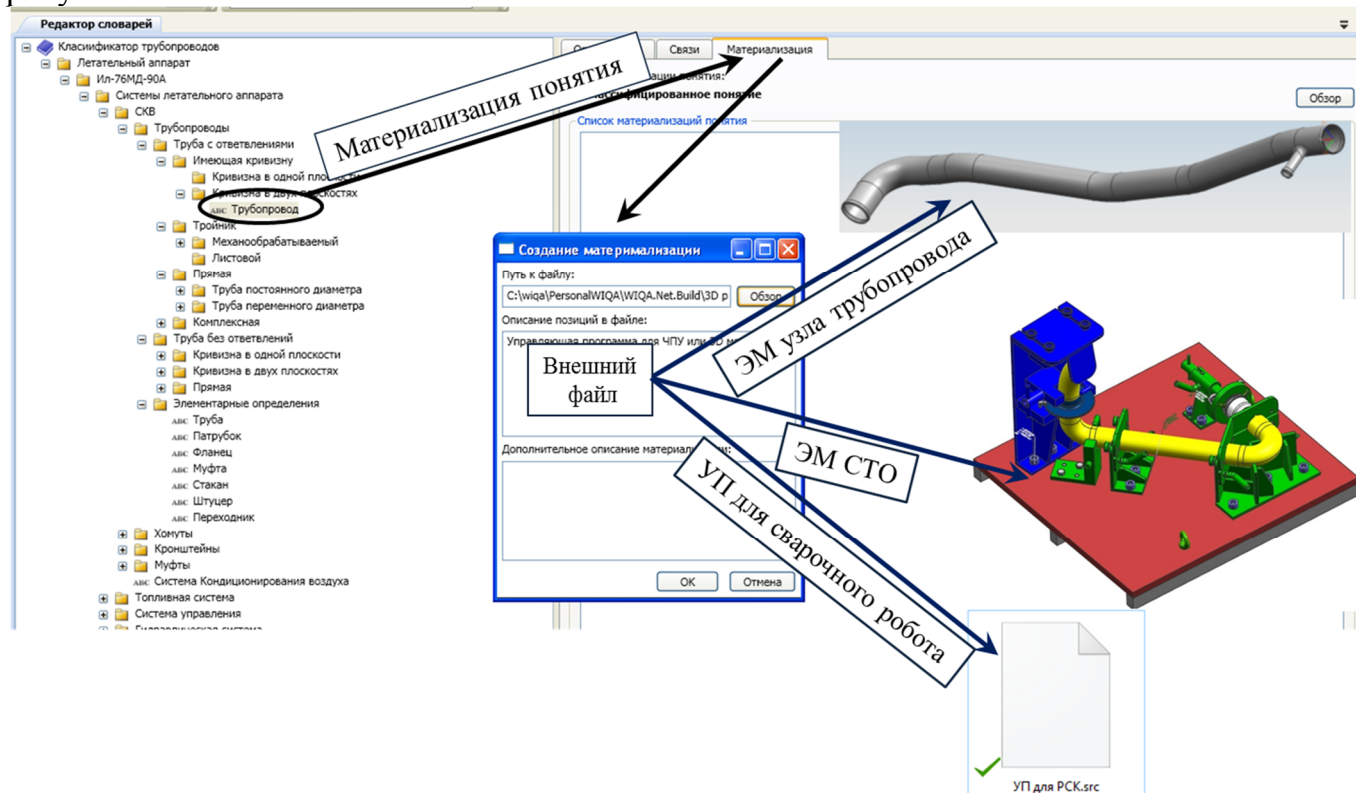


Рис. 8 Материализация прецедентов в WIQA

Разработаны рекомендации по согласованию СК деталей узлов, СТО и сварочного робота на разных этапах ЖЦ с использованием современных измерительных средств, применяемых на авиастроительных предприятиях, в том числе и с учетом возникновения погрешности позиционирования оснастки относительно робота.

В качестве первого эксперимента приведен пример корректировки данной погрешности за счет пересчета точек сварки для стыка двух деталей с использованием поправочных коэффициентов, которые найдены с помощью отклонений реперных узлов на оснастке от теоретически заданных на ЭМ для трех точек сварки первого стыка:

$$\Delta R^W = \begin{bmatrix} -0,0176 & -0,0184 & -0,0183 \\ -0,0271 & -0,0265 & -0,0265 \\ -0,0179 & -0,0179 & -0,0179 \end{bmatrix}$$

Для повышения эффективности процессов КТПП разработаны рекомендации по проектированию СТО для сборки узлов трубопроводов сваркой с использованием САПР Siemens NX в рамках использования инструментально-моделирующей среды WIQA, что позволяет выделить типовые операции и выбрать оптимальный способ проектирования СТО по трудоемкости, а также рекомендации по разработке УП с использованием САПР FreeCAD в рамках использования инструментально-моделирующей среды WIQA,

позволяющие выбирать оптимальные траектории движения сварочного манипулятора при выполнении технологических операций.

Также для повышения эффективности проектирования разработаны прикладные модули для системы Siemens NX, позволяющие автоматизировать процесс проектирования ложеента, что было отражено во втором эксперименте.

Целью которого рассматривался эффект снижения трудоемкости проектирования для решения задач подготовки производства, который характеризует техническую эффективность подготовки производства с точки зрения ее результативности, и достигается за счет:

- использования модулей, автоматизирующих часть проектно-конструкторских работ
- унификации успешных технических решений.

Было проведено сравнение трудоемкости проектирования СТО с использованием модулей для Siemens NX и без, представленное на рисунке 9.

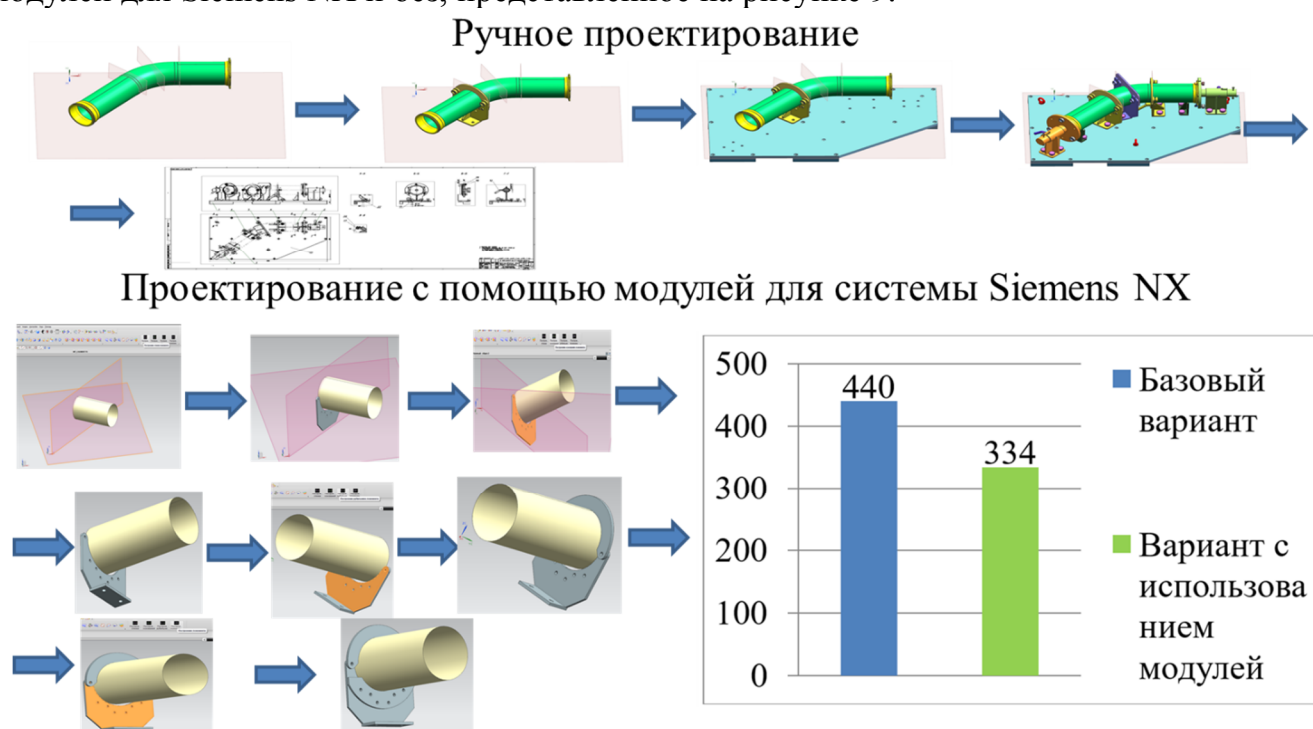


Рис. 9. Процесс проектирования ложеента в ручном и автоматизированном режимах

Практическая реализация этого эффекта выражается в значительном повышении качества КТПП, которое обеспечивает более высокий организационно-технический уровень производства, повышения эффективности процесса проектирования СТО для сборки трубопроводов на основе использования комплекса средств онтологической поддержки с учетом использования представленной методики работы с онтологией и словарями, влекущих за собой снижение трудоёмкости проектирования; представление электронных моделей трубопроводов и СТО в форме моделей прецедентов, удобных для повторного использования и аккумуляирования опыта, а также автоматизации части проектно-конструкторских работ по оформлению геометрии ложементов в CAD-системе посредством использования интегрированных модулей.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы.

В приложении представлены документы, подтверждающие практическое использование результатов диссертационного исследования в практике авиационного предприятия и в учебном процессе.

Основные результаты работы

Подводя обобщающий итог диссертационному исследованию и практическим разработкам, реализованным на базе результатов исследований, можно утверждать следующее:

Цель исследований, разработка геометрических моделей деталей и узлов трубопроводов ЛА, а также СТО, обеспечивающее прецедентно-ориентированное контролируемое накопление опыта технологической подготовки и связанные с этим позитивные эффекты – достигнута.

Практическую ценность работы составляет разработанный комплекс средств онтологической поддержки процесса проектирования, интегрированный в инструментально-технологическую среду WIQA и модули Siemens NX.

Получены новые научные результаты

1. **Система согласованных геометрических моделей** деталей металлических трубопроводов ЛА, их сборок и СТО, спецификации которых настроены на предварительную роботизированную сварку деталей, обеспечивающую требуемые технологические характеристики их позиционирования в рамках МГ ЛА.

2. **Расширение атрибутики «имён» нормативной идентификации** деталей трубопроводов, их сборок и средств оснастки, дополнительными составляющими, которые позволяют включить в представление деталей, сборок и средств оснастки их геометрические модели, связав их ассоциациями по смежности и сходству, способствующими улучшению характеристик поиска в системе имен.

3. **Метод прецедентно-ориентированной интеграции геометрических моделей** деталей и узлов трубопроводов ЛА, а также специализированных средств оснастки, обеспечивающий информационно-онтологическую поддержку проектно-технологического цикла создания трубопроводных систем.

4. **Метод согласования систем координат** деталей, сборок и СТО, обеспечивающий требуемые характеристики позиционирования деталей при сборке, в том числе с учетом и корректировкой погрешностей позиционирования СТО относительно положения сварочного промышленного робота при выполнении технологических операций.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах: **в российских рецензируемых научных журналах из перечня ВАК:**

1. Лебедев А.В., Баранников А.А., Гришин М.В., Павлов П.Ю., Рябов С.В., Чоракаев О.Э. Проблемы производства трубопроводов в современном авиастроении // В мире научных открытий, №4 (52). – Красноярск, 2014. – С. 71-82.
2. Павлов П.Ю. Автоматизации процесса сварки трубопроводов на авиастроительном предприятии с помощью роботизированных сварочных комплексов. // Известия Самарского научного центра РАН, том 16, №1 (5). – Самара, 2014. – С. 1521-1527.
3. Гришин М.В., Ларин С.Н., Лебедев А.В., Павлов П.Ю., Федоров А.А. Разработка классификатора технологической оснастки заготовительно-штамповочного производства // Известия Самарского научного центра РАН, том 16, №6 (2). – Самара, 2014. – С. 423-429.
4. Лебедев А.В., Кочергин В.И., Павлов П.Ю. Классификатор технологической оснастки как средство повышения эффективности процесса проектирования // Известия Самарского научного центра РАН. – Самара, 2015. – Т. 17. № 2 (4). – С. 811–816.
5. Павлов П.Ю., Соснин П.И. Концептуально-алгоритмическое программирование и моделирование в проектировании и изготовлении трубопроводных систем летательных аппаратов // Автоматизация процессов управления, – Ульяновск, ФНПЦ АО «НПО «Марс» 2016. – № 1 (43) 2016. – С. 97-105

6. Лебедев А.В., Павлов П.Ю., Соснин П.И. Онтологическая структуризация в параллельном инжиниринге проектирования сборочных приспособлений для летательных аппаратов // Известия Самарского научного центра РАН. – Самара. 2016. Т. 18. № 1 (2). – С. 373–377.
7. Гришин М.В., Павлов П.Ю., Плутахин В.В., Соснин П.И. Применение проектных онтологий в технологической подготовке авиационного производства. // Автоматизация процессов управления, Ульяновск, ФНПЦ АО «НПО «Марс» 2016, № 4 (46) 2016. – С. 47- 57.
8. Гришин М.В., Павлов П.Ю., Плутахин В.В. Разработка системы автоматизированного проектирования универсальных сварочных приспособлений в условиях авиационного производства // Известия Самарского научного центра РАН. – Самара. 2016. – Т. 18. № 4 (6). – С. 1294–1302.
9. Павлов П.Ю., Соснин П.И. Онтологическая поддержка технологической подготовки производства трубопроводов летательного аппарата. // Известия Самарского научного центра РАН. – Самара, 2017. – Т. 19. № 1. – С. 187–194.
10. Гришин М.В., Лебедев А.В., Михайлов С.А., Павлов П.Ю. Использование WAVE-технологий при проектировании сборочных приспособлений в авиации // Известия Самарского научного центра РАН. – Самара. 2017. – Т. 19. № 1(2). – С.334–340.
11. Гришин М.В., Лебедев А.В., Павлов П.Ю. Использование WAVE-технологий при проектировании технологического оснащения в авиации. // Известия Самарского научного центра РАН. – Самара. 2017. – Т. 19. № 4(2). – С.243–252.

Статьи в других изданиях

12. P. Sosnin, P. Pavlov. Precedent-Oriented Geometrical Modeling of the Parts and Assembly Units of an Aircraft Pipeline / IEEE 12th International Conference on Application of Information and Communication Technologies, Kazakhstan, Almaty, 17-19 October 2018, P. 240-244.
13. Павлов П.Ю., Санкин Ю.Н. Устойчивость фрезерной головки, носимой робототехническим устройством // Аналитическая механика, устойчивость и управление: Труды X Международной Четаевской конференции. Т. 3. Секция 3. Управление. Ч. II. Казань, 12-16 июня 2012 г. – Казань: КГТУ, 2012. – С. 319-327.
14. Павлов П.Ю., Лебедев А.В. Повышение производительности труда инженерных служб авиационного предприятия за счет оптимизации системы документооборота. // Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития. – Ульяновск: УлГУ, 2014. – С. 264–275.
15. Санкин Ю.Н., Павлов П.Ю. Автоматизация сварки трубопроводов на авиастроительном производстве с помощью роботизированных сварочных комплексов. // Молодежный инновационный форум Приволжского федерального округа (Ульяновск, УлГТУ), 13-15 мая 2015 года): Сборник аннотаций проектов. В 2 т. – Ульяновск: УлГТУ, 2015. – С. 266-270.
16. Павлов П.Ю. Соснин П.И. Роботизированные сварочные комплексы в сборке трубопроводов летательного аппарата // Информатика, моделирование, автоматизация проектирования (ИМАП-2016). VIII Всероссийская школа-семинар аспирантов, студентов и молодых ученых (Россия, г. Ульяновск, 25-26 октября 2016 г.): сборник научных трудов / под ред. А.Н. Афанасьева. – Ульяновск: УлГТУ, 2016. – С. 174-185.

Свидетельства о регистрации программного продукта

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018610044. Программа автоматизированного проектирования ложементов средств технологического оснащения для сборки трубопроводов // П.Ю. Павлов, А.А. Блюменштейн; правообладатель: ФГБОУ ВО «УлГУ»; заявл. 07.11.2017; зарегистр. 09.01.2018. – М.: Роспатент, 2018.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем: в [1] рассмотрены существующие проблемы производства трубопроводов систем ЛА и предложены пути их решения; в [2, 15, 16] предложено включение сварочных роботов в производственный цикл сборки трубопроводов систем ЛА; в [3, 4] рассмотрена разработка и использование классификаторов в процессах подготовки авиастроительного производства; в [5, 9] предложено использование инструментально-моделирующей среды WIQA в процессах КТПП и показаны методики работы с ней при разработке технологических процессов и технических заданий на проектирование; в [6, 7, 9] предложено включение проектных онтологий в процессы подготовки авиастроительного производства; в [8] предложена разработка САПР для проектирования универсальных сварочных приспособлений для сборки трубопроводов; в [6, 10, 11] предложены способы реализации параллельного инжиниринга на основе совместного использования строительной геометрии при проектировании технологического оснащения для авиационного производства; в [17] реализован модуль автоматизации проектирования ложементов для СТО, используемого для сборки трубопроводов; в [12] представлены скелетные геометрические и текстовые модели деталей и узлов трубопроводов.

Принятые сокращения и обозначения

ЖЦ –	жизненный цикл
КД –	конструкторская документация
КТПП –	технологическая подготовка производства
ЛА –	летательный аппарат
МГ –	мастер-геометрия
САПР –	система автоматизированного проектирования
СК –	система координат
СМГ –	строительная мастер геометрия
СТО –	специальное технологическое оснащение
ТЗ –	техническое задание
ТО –	технологическое оснащение
ТП –	технологический процесс
УП –	управляющая программа
QA –	Question-Answer
WIQA –	Working In Questions and Answers

Павлов Павел Юрьевич

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПРЕЦЕДЕНТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СБОРКИ УЗЛОВ
ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 08.10.2018. Формат 60×84/16.
Усл. печ. п. 1,16. Уч.-изд. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ 829.
ИПК «Венец» УлГТУ. 432027, Ульяновск, ул. Сев. Венец, 32.