

На правах рукописи



Бригаднов Сергей Игоревич

**АВТОМАТИЗАЦИЯ СТРУКТУРНО-  
ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРОЕКТНЫХ  
РЕШЕНИЙ И ОБУЧЕНИЯ ПРОЕКТИРОВЩИКА  
ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ СРЕДСТВАМИ  
САПР КОМПАС**

Специальность: 05.13.12 – Системы автоматизации  
проектирования (промышленность)

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Ульяновск – 2018

Работа выполнена на кафедре «Вычислительная техника»  
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет»

Научный руководитель – **Афанасьев Александр Николаевич**,  
доктор технических наук, доцент, профессор  
кафедры «Вычислительная техника»  
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный  
технический университет»

Официальные оппоненты:

**Аверченков Андрей Владимирович**,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой  
«Компьютерные технологии и системы» ФГБОУ  
ВО «Брянский государственный технический  
университет»

**Камалов Леонид Евгеньевич**,  
кандидат технических наук,  
руководитель направления по работе с ключевыми  
клиентами РЦ «АСКОН-Волга»

Ведущая организация – **ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»**

Защита состоится «24» октября 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, д. 32 (ауд. 211, Главный корпус).

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

Автореферат разослан «8» августа 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д212.277.01,  
доктор технических наук, профессор



Смирнов В. И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Процессу производства изделий машиностроения присущи следующие особенности: большая номенклатура производимых деталей, которая постоянно обновляется; длительный срок производства и работы продукции, начиная от проектирования и заканчивая обслуживанием уже готовой машины; наличие как серийного, так и уникального производства и т. д. Оптимизация данных процессов и объединение их в единый комплекс позволят контролировать все этапы производства, а также повысить производительность, улучшить качество проектирования и изготовления машиностроительных изделий, снизить себестоимость продукции, контролировать эффективность использования инвестиций и обеспечить высокую скорость выпуска новых продуктов.

Обеспечение конкурентоспособности современных промышленных и проектных предприятий (организаций) определяется степенью информатизации производственного процесса, в первую очередь использованием САПР, позволяющих повысить качество проектных решений, сократить сроки проектирования и ресурсы. При этом важными задачами являются оценка и возможность повторного использования проектных решений, эффективность решения которых позволяет улучшить характеристики объектов проектирования, сократить время, затрачиваемое на разработку документации, преобразование данных и поиск информации об изделиях.

САПР КОМПАС-3D представляет собой профессиональную систему трехмерного моделирования, ставшую стандартом для многих отечественных промышленных предприятий, особенно оборонно-промышленного комплекса, за счет удачного сочетания простоты освоения и работы с мощными функциональными возможностями твердотельного и поверхностного моделирования, которые решают большинство основных задач проектирования. Система состоит из комплекса инструментов для работы со сложными проектными решениями, содержащими большое количество элементов. Наличие в составе специализированных приложений и библиотек стандартных элементов, а также расчетных модулей и средств визуализации повышают эффективность работы конструкторов и проектировщиков машиностроительных изделий.

В практике проектной деятельности по разработке 3D-моделей машиностроительных объектов достаточно часто встречается ситуация, связанная с выполнением операций проектировщиком, являющихся «лишними» и которых можно избежать. В результате усложняется дерево проектных решений, а при автоматизированной разработке программы для станков с числовым программным управлением (ЧПУ) увеличивается ее сложность.

Задачи промышленного конструирования требуют наличия определенных компетенций у проектировщика, которые сложно приобрести с использованием классических подходов к обучению. Поэтому создание эффективных методов и средств обучения проектировщика автоматизированному проектированию является необходимым условием для решения и выполнения промышленных задач в области автоматизированного проектирования машиностроительных объектов. Российскими и зарубежными учеными, внесшими большой вклад в область разработки автоматизированных обучающих систем, интегрированных с САПР, являются Норенков И.П., Сабоннадьер Ж.К., Кулон Ж.Л., Курейчик В.В. и др.

Таким образом, **актуальной задачей** в области автоматизированного проектирования машиностроительных объектов является структурно-параметрический анализ проектного решения с целью выявления неоптимальных последовательностей проектных операций, автоматического перестроения и классификации 3D-моделей машиностроительных объектов для повторного использования в процессах проектирования, а также формирования соответствующих рекомендаций проектировщику.

Разрабатываемые методы и алгоритмы должны обеспечить приобретение необходимых компетенций проектировщику для успешной проектной деятельности в области автоматизированного проектирования, повышение эффективности обучения. Система анализа проектных решений должна повысить качество проектных решений, выполненных в САПР КОМПАС-3D, за счет уменьшения сложности получаемых программ для станков с ЧПУ.

**Целью диссертационной работы** является повышение качества проектных решений при конструировании трехмерных объектов в САПР КОМПАС-3D.

**Задачи диссертационного исследования.**

1. Провести обзор подходов построения систем анализа проектных решений машиностроительных изделий.
2. Провести анализ моделей, методов и средств обучения автоматизированному проектированию машиностроительных объектов с использованием САПР.
3. Разработать метод структурно-параметрического анализа проектных решений на основе последовательности проектных операций, выполненных в САПР КОМПАС-3D.
4. Разработать модели автоматизированной системы обучения: компетенций, алгоритм формирования траектории обучения, концептуальную модель АОС.

5. Реализовать предложенные модели, методы и алгоритмы в виде программного комплекса для ЭВМ.

**Объектом исследования** является организация проектной деятельности при автоматизированном проектировании машиностроительных изделий в среде САПР КОМПАС на основе анализа дерева построения проектных решений.

**Предметом исследования** являются модели, методы и средства анализа проектных решений, выполненных в САПР КОМПАС-3D.

**Методы исследования** основаны на использовании положений и методов теории автоматизированного проектирования, разработки автоматизированных обучающих систем, графов, классификации, объектно-ориентированного программирования, организации систем.

**На научную новизну претендуют:**

1. Метод структурно-параметрического анализа проектных решений на основе последовательности проектных операций, отличающийся анализом дерева модели проектного решения и анализом операций объектов трехмерного моделирования, выполненных в среде САПР КОМПАС-3D. Метод позволяет перестроить дерево модели проектного решения и классифицировать изделия машиностроительных объектов.

2. Метод автоматизированной генерации правил для анализа проектных решений на основе уже имеющихся фактов и правил, отличающийся анализом зависимости между операциями твердотельного моделирования в САПР КОМПАС-3D и позволяющий формировать новые правила для анализа проектных решений.

3. Ассоциативно-ориентированная модель компетенций проектировщика, отличающаяся установлением взаимосвязей между знаниями, умениями и навыками, связанными с предметной областью автоматизированного проектирования машиностроительных объектов, и позволяющая сформировать последовательность освоения компетенций и адаптировать процесс обучения автоматизированному проектированию в САПР КОМПАС-3D.

4. Алгоритм формирования персонифицированной траектории обучения, отличающийся использованием ассоциативно-ориентированной модели компетенций проектировщика и позволяющий повысить эффективность и качество обучения.

**Практическая ценность** полученных результатов состоит в разработке наукоемкого программного комплекса, включающего следующие компоненты.

1. Архитектуру автоматизированной системы анализа проектных решений и обучения проектировщика.

2. Алгоритм поиска не оптимально выполненных проектных операций, замены их на операции с меньшим количеством действий и перестроения 3D-модели проектного решения в САПР КОМПАС-3D, позволяющий уменьшить количество объектов в дереве проектного решения и уменьшить сложность получаемых управляющих программ для станков с ЧПУ.

3. Алгоритм классификации изделий машиностроительных объектов, позволяющий повторно использовать 3D-модели машиностроительных изделий, выполненных в САПР КОМПАС-3D, и сократить время проектной деятельности проектировщика при конструировании трехмерных объектов в САПР на 11%.

4. Алгоритм автоматизированной генерации правил для анализа проектных решений, позволяющий сформировать новые правила для анализа проектных решений машиностроительных изделий.

5. Базу данных для хранения проектных решений на базе NoSQL, выполненных в САПР КОМПАС-3D, со списком параметров 3D-модели изделий на основе разработанных моделей в методе структурно-параметрического анализа проектных решений.

6. WEB-ориентированную систему обучения автоматизированному проектированию машиностроительных объектов в САПР КОМПАС-3D на основе разработанных модели компетенций проектировщика, модели предметной области, модели обучаемого проектировщика и алгоритма формирования адаптивной траектории обучения, позволяющей повысить эффективность и качество обучения проектировщика.

**На защиту выносятся следующие научные положения:**

1. Совокупность взаимосвязанных моделей, методов анализа проектных решений САПР и обучения проектировщика, позволяющих повысить качество проектных решений при конструировании трехмерных машиностроительных объектов САПР, включающих анализ проектных операций проектировщика, автоматическое перестроение проектного решения САПР, классификацию машиностроительных изделий, формирование рекомендаций проектировщику, формирование персонифицированной траектории обучения.

2. Программный комплекс анализа проектных решений САПР и обучения проектировщика, позволяющий сократить время проектной деятельности при конструировании трехмерных объектов в САПР, повысить качество проектных решений и сократить время обучения проектировщика.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Разработанные программные средства внедрены в практику работы АО «Ульяновский механический завод» (г. Ульяновск) и учебный процесс Ульяновского государственного технического университета (г. Ульяновск).

**Апробация работы.** Основные положения по теме диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих всероссийских и международных конференциях: Российской научно-методической конференции «Актуальные вопросы инженерного образования: содержание, технологии, качество», г. Казань, 2014; Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, студентов и молодых ученых «Информатика и вычислительная техника» (ИВТ-2014, ИВТ-2016, ИВТ-2017), г. Ульяновск, 2014 - 2017; Всероссийской школе-семинаре аспирантов, студентов и молодых ученых «Информатика, моделирование, автоматизация проектирования» (ИМАП-2015, ИМАП-2016, ИМАП-2017), г. Ульяновск, 2015 - 2017; Международной научно-практической конференции «Электронное обучение в непрерывном образовании» (ЭОНО-2015, ЭОНО-2016, ЭОНО-2017, ЭОНО-2018), г. Ульяновск, 2015 - 2018; Международной конференции «INTERACTIVE SYSTEMS: Problems of Human - Computer Interaction Collection of scientific papers», г. Ульяновск, 2015, 2017; Молодежном инновационном форуме Приволжского федерального округа, г. Ульяновск, 2016; Конкурсе научно-технического творчества молодежи (НТТМ), г. Ульяновск, 2016; Научно-технической конференции «Вузовская наука в современных условиях», г. Ульяновск, 2016; Международной молодежной конференции «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта» (CAD/CAM/PDM-2016), г. Москва, 2016; Научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава УлГТУ (ППС-2016, ППС-2018), г. Ульяновск, 2016, 2018; Научно-методической конференции «Современные технологии учебного процесса в вузе», г. Ульяновск, 2016; Второй Международной Российско-Тихоокеанской конференции по компьютерным технологиям и приложениям, г. Владивосток, 2017.

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 20 работ, в том числе 3 статьи в российских рецензируемых научных журналах. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация изложена на 213 страницах машинописного текста, содержит 54 рисунка, 11 таблиц, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 170 наименований на 19 страницах и 3 приложений на 18 страницах.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность проблемы исследования, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, перечислены полученные в диссертации новые результаты, их научная и практическая

ценность, представлены положения, выносимые на защиту, и описана структура диссертации.

**В первой главе** проводится анализ предметной области исследований.

Рассмотрены различные методы параметрического анализа и оптимизации проектных решений машиностроительных объектов. В системах автоматизированного проектирования представлены различные подсистемы анализа, например: прочностной анализ, включающий статический расчет, расчет устойчивости, расчет собственных частот и формы собственных колебаний, расчет стационарной теплопроводности и термоупругости; анализ динамического поведения машин и механизмов; подсистема КОМПАС-Эксперт, включающая проверки на соответствие стандартам оформления (расстояние между размерными линиями, размещение текста, наличие пересечений у размерной линии, стили линий и засечек и т. п.), соответствие ограничительным перечням предприятия (разрешенное значение шероховатости, качества, резьб и т. п.), соответствие правилам работы в КОМПАС (ручной ввод размеров, привязка обозначения позиции к спецификации, использование объекта «осевая», а не линии со стилем «осевая» и т. п.); расчет размерных цепей и пружин; оптимизация зубчатого зацепления; подбор электродвигателей, редукторов и муфт. При этом в САПР отсутствует анализ действий проектировщиков.

Проведен обзор систем анализа проектных решений и широко применяемых на производстве САПР: NX, CATIA V5, Creo, Autodesk Inventor, SOLIDWORKS 3D CAD, CADfix, CADIQ, 3DTransVidia, Heidelberg CAx Quality Manager, SOLIDWORKS Design Checker, DesignQA, GeometryQA, PrescientQA, iCHECK IT, Knowledge Advisor, Knowledge Expert, ModelCHECK, NX Check-Mate, Q-Checker. Рассмотренные инструменты включают в себя анализ трехмерных моделей, сборок и чертежей, связанных с конкретным программным обеспечением САПР. Основными недостатками данных систем анализа проектных решений является отсутствие функций по определению неоптимальных последовательностей проектных операций, отсутствие возможности автоматического перестроения трехмерной модели машиностроительного изделия на основе анализа дерева модели проектного решения.

Рассмотрены различные существующие профессиональные стандарты, связанные с компетенциями проектировщика и его проектной деятельностью. Выделены следующие компетенции проектировщика: знание общих сведений о САПР; знание предметной области автоматизированного проектирования; знание общих принципов моделирования; умение создавать рабочий чертеж; умение создавать сборочную единицу; умение создавать сборку изделия; умение создавать компонент в контексте сборки; умение создавать сборочный чертеж



сборочной единицы; умение создавать сборочный чертеж изделия; умение создавать спецификации; навыки твердотельного моделирования в САПР; навыки добавления стандартных изделий; навыки использования тел вращения; использование методик проектирования в САПР; навыки коллективной работы над проектным решением; умеет использовать элементы по сечениям; умеет использовать пользовательские библиотеки трехмерных моделей; навыки построения листовых деталей; способен построить трехмерную модель по плоскому чертежу; навыки построения кинематических компонентов и пространственных кривых.

Проведен анализ адаптивных автоматизированных обучающих систем, позволяющих персонализировать процесс обучения. Большой вклад в область разработки адаптивных автоматизированных обучающих систем внесли G. Weber, A. Möllenberg, K. Warendorf, K. Kabassi, M. Virvou, C. Tan, J. Vassileva, Е.Р. Пантелеев, Л.В. Зайцева, Г.В. Рыбина, I.P. Goldstein, A. Klasnja-Milicevic, R. Harrington, D.A. Loffredo и другие.

Адаптивные методы позволяют повысить эффективность и качество обучения, а также сократить время процесса обучения за счет отслеживания траектории обучения обучаемого, изменяя последовательность предоставления теоретического учебного материала и практических заданий. Используются следующие механизмы адаптации: на основе правил, адаптивная аннотация и сортировка ссылок, экспертная система на основе инструкций и шаблонов, адаптивная гипермедиа, рекомендательные системы, авторский алгоритм.

Анализ показал, что адаптивные АОС не учитывают компетенции проектировщика, отсутствует оценка эффективности его проектной деятельности и обучения.

**Во второй главе** разработаны новый метод структурно-параметрического анализа проектных решений, выполненных в САПР КОМПАС; классификация правил анализа проектных решений; разработана обобщенная схема автоматизированной системы анализа проектных решений и обучения проектировщика, описаны основные компоненты системы.

Сущность метода заключается в поиске неоптимально выполненных проектировщиком проектных операций на основе анализа дерева модели проектного решения и анализа операций объектов трехмерного моделирования, построенных в среде САПР КОМПАС-3D. Метод позволяет перестроить дерево модели проектного решения и классифицировать изделия машиностроительных объектов. Анализ последовательности проектных операций объектов трехмерного моделирования, выполненных в среде САПР КОМПАС-3D, осуществляется на основе правил. Правило для анализа проектных операций состоит из следующих

компонентов: тип операции, текстовое описание правила, условие срабатывания правила. Если для последовательности проектных операций найдено правило, формируется соответствующая рекомендация проектировщику.

Разработан ряд моделей, составляющих научную основу метода структурно-параметрического анализа.

Исходными данными для анализа проектных решений САПР КОМПАС-3D является последовательность выполняемых проектных операций проектировщиком, модель которой имеет следующий вид:

$$P\_PrO = (Operations, TypesOperation, ParamsOp, F\_list),$$

где  $Operations = \{op_i | i = 1..k\}$  – множество проектных операций,

$TypesOperation = \{o3d_i | i = 0..159\}$  – множество типов операций в САПР КОМПАС (например,  $o3d\_fillet = 34$  – операция «скругление»;  $o3d\_chamfer = 33$  – операция «фаска»),

$ParamsOp = \{pr_i | i = 1..PR\}$  – множество параметров операций со значением,

$F\_list = Operations \times TypesOperation \times ParamsOp \rightarrow l\_op$  – функция формирования последовательности проектных операций проектировщика при работе с САПР КОМПАС-3D.

Модель операции имеет следующий вид:

$$Operation = (id, type, params, F\_xml),$$

где  $id$  – номер операции в последовательности операций,

$type \in TypesOperation$  – тип операции,

$params \in ParamsOp$  – список параметров операции со значением,

$F\_xml = number \times type \times params \rightarrow l\_xml$  – функция формирования XML-описания проектного решения, выполненного в САПР КОМПАС-3D.

На основе предложенной модели операций генерируется XML-описание проектного решения, содержащее историю построения трехмерного твердотельного машиностроительного изделия в виде взаимосвязанных проектных операций проектирования в САПР КОМПАС-3D и их параметров со значением.

Модель исходных данных для автоматизированного перестроения объекта трехмерного моделирования имеет следующий вид:

$$RebuildModel = (Details, l\_op, l\_xml, Rules, F\_opN, F\_opt, F\_rxml, F\_robj3D),$$

где  $Details = \{dt_i | i = 1..k\}$  – множество деталей, входящих в трехмерную модель изделия САПР КОМПАС,

$l\_op$  – последовательность проектных операций,

$l\_xml$  – XML-описание проектного решения САПР КОМПАС-3D,

$Rules = \{r_i | i = 1..k\}$  – множество правил для поиска неоптимальных проектных операций и их замены на операции с меньшим количеством действий.

$F_{opN} = Details \times l_{op} \times l_{xml} \rightarrow op_N \subset Operation$  – функция формирования множества неоптимальных проектных операций, выполненных проектировщиком, для каждой трехмерной модели, входящей в сборку машиностроительного изделия,

$F_{opt} = op_N \times Rules \rightarrow l_{opOpt}$  – функция формирования оптимальной последовательности проектных операций,

$F_{rxml} = Details \times l_{opOpt} \rightarrow l_{rxml}$  – функция формирования XML-описания для перестроения трехмерного машиностроительного объекта в САПР КОМПАС--3D,

$F_{robj3D} = l_{opOpt} \times l_{rxml} \rightarrow r_{project}$  – функция перестроения дерева модели проектного решения САПР КОМПАС-3D на основе оптимальной последовательности проектных операций и их XML-описания.

Такие преобразования модели на основе множества неоптимальных проектных операций и правил для поиска и замены их на последовательность с меньшим количеством действий позволяют сформировать оптимальную последовательность проектных операций трехмерной твердотельной модели машиностроительного объекта в САПР КОМПАС-3D.

Модель деталей, входящих в трехмерную модель изделия САПР КОМПАС-3D, имеет следующий вид:

$$Details = (id, l_{op}, attribute, material, F_{class}),$$

где  $id$  – множество уникальных идентификаторов детали,

$l_{op}$  – последовательность проектных операций проектировщика для построения детали в САПР КОМПАС-3D,

$attribute$  – множество переменных и параметров трехмерной модели,

$material$  – множество материалов для изготовления детали (например, «Сталь 10 ГОСТ 1050-88»),

$F_{class} = l_{op} \times attribute \rightarrow class$  – функция определения класса изделия машиностроительного объекта, выполненного в САПР КОМПАС-3D (например, «Кольцо», «Втулка», «Фланец» и т. д.).

Такое представление модели позволяет классифицировать трехмерный твердотельный машиностроительный объект, выполненный в САПР КОМПАС-3D, с целью повторного использования в процессе конструирования.

Модель переменных и параметров трехмерной модели имеет следующий вид:

$$attribute = (name, value, note, F_{aList}),$$

где  $name$  – множество обозначений переменной или параметра трехмерной модели,

$value$  – множество значений переменной или параметра трехмерной модели,

*note* – множество текстовых описаний переменной или параметра трехмерной модели (например, « $d = 24$  – диаметр посадочной поверхности корпуса»),

$F\_aList = name \times value \times note \rightarrow l\_param$  – функция формирования списка параметров 3D-объекта, спроектированного в САПР КОМПАС-3D.

На основе предложенной модели формируется список параметров трехмерного твердотельного машиностроительного объекта, выполненного в САПР КОМПАС-3D, для определения класса изделия.

Модель правила имеет следующий вид:

$$Rules = (template, result),$$

где  $template = \{tpl_i | i = 1..k\}$  – формула логики первого порядка для поиска неоптимальных операций в последовательности проектных операций,

$result = \{res_i | i = 1..n\}$ ,  $res = (type, params)$  – множество оптимальных проектных операций (тип операции, параметр операции со значением), где тип операции – константа, а параметр операции со значением – формула логики первого порядка.

Зададим алфавит символов для формул логики первого порядка:

- предметные переменные:  $OP = \{opt \in TypesOperation\}$  – множество типов операций в САПР;
- символы логических операций:  $\wedge, \vee, \rightarrow, \leftrightarrow$ ;
- термы:
  - $type = Operations \rightarrow TypesOperation$  – получение типа проектной операции;
  - $optParam = ParamsOp \times type \rightarrow pr$  – получение параметра проектной операции со значением.

Рассмотрим пример формирования оптимального множества проектных операций при выполнении операции «Скругление», являющейся базовой операцией при создании 3D-объектов, подготовленных в САПР КОМПАС-3D. При наличии данной операции во множестве проектных операций запускается поиск правила по базе, в результате чего находится правило «Не используйте операцию «Скругление» для каждого ребра в отдельности, параметры для которых одинаковы». Шаблон данного правила имеет следующий вид:

$$type(opt1) = \text{Скругление} \wedge type(opt1) = \text{Скругление} \wedge optParam(opt1, \text{Признак продолжения скругления по касательным ребрам}) = optParam(opt1, \text{Признак продолжения скругления по касательным ребрам}) \wedge optParam(opt2, \text{Радиус второго скругления}) = optParam(opt2, \text{Радиус второго скругления}).$$

Шаблон правила в общем виде имеет следующую структуру:

$$TPL = (id, type, txt, action),$$

где  $id$  – множество идентификаторов правил,  
 $type \in TypesOperation$  – множество типов проектных операций,  
 $txt$  – множество описаний правил,  
 $action$  – множество условий срабатывания правил.

Модель исходных данных для классификации изделия машиностроительных объектов имеет следующий вид:

$$ClassDetails = (detail, l\_op, ClassTemplates, F\_class),$$

где  $detail \in Details$  – множество деталей, входящих в трехмерную модель изделия (сборку) САПР КОМПАС,

$l\_op$  – последовательность проектных операций проектировщика для построения детали в САПР КОМПАС-3D,

$ClassTemplates = \{ctpl_i | i = 1..k\}$  – множество шаблонов построения дерева модели проектных решений для определенного класса изделия,

$F\_class = detail \times l\_op \times ClassTemplates \rightarrow class$  – функция определения класса изделия машиностроительного.

Предложенная модель позволяет классифицировать трехмерный машиностроительный объект на основе имеющегося множества шаблонов построения трехмерных моделей, присущих определенным классам изделий.

Алгоритм формирования последовательности оптимальных проектных операций состоит из следующих пунктов.

1. Начало работы проектировщика с проектом.
2. Генерация проектных операций (исходные данные – текстовое XML-описание проектного решения, выполненного в САПР КОМПАС-3D).
3. Формирование последовательности проектных операций.
4. Поиск правила в базе правил (которому соответствует последовательность проектных операций). Если правило не найдено, переход к пункту 9.
5. Формирование оптимальной последовательности проектных операций.
6. Формирование рекомендации проектировщику по замене неоптимальных операций на основе последовательностей оптимальных и неоптимальных проектных операций.
7. Замена множества неоптимальных проектных операций на последовательность с меньшим количеством действий.
8. Перестроение проектного решения на основе последовательности из пункта 7.
9. Сохранение проектного решения и отображение его в САПР КОМПАС-3D.
10. Завершение работы проектировщика с проектом.

Алгоритм классификации изделий машиностроительных объектов состоит из следующих пунктов.

1. Начало работы проектировщика.
2. Поиск проектного решения в базе изделий, если такое проектное решение уже существует, тогда переход к пункту 8.
3. Генерация проектных операций (исходные данные – текстовое XML-описание проектного решения, выполненного в САПР КОМПАС-3D).
4. Формирование последовательности проектных операций.
5. Формирование списка переменных и параметров изделия.
6. Поиск шаблона построения дерева модели, который соответствует последовательности проектных операций. Если найден шаблон, переход к пункту 8.
7. Анализ структуры проектного решения. Использование модулей анализа классов изделий на основе последовательности проектных операций для построения дерева трехмерной модели проектного решения, выполненного в САПР КОМПАС-3D, и списка параметров для присвоения класса машиностроительному объекту.
8. Присвоение класса изделия машиностроительному объекту.
9. Завершение работы проектировщика.

Разработан метод автоматизированной генерации правил для анализа проектных решений, который заключается в автоматическом заполнении шаблонов правил анализа проектных решений, выполненных в САПР КОМПАС-3D, на основе определения зависимостей между проектными операциями проектировщика. Метод позволяет автоматизированно формировать новые правила для анализа проектных решений на основе уже имеющихся фактов и правил. Полученные правила пополняют базу правил анализа проектных решений и используются в методе структурно-параметрического анализа. Корректность сгенерированных правил проверяет эксперт. Шаблоны правил заполняются в результате поэлементного анализа последовательности проектных операций при построении трехмерного объекта в САПР КОМПАС-3D.

Разработан ряд моделей, составляющих научную основу метода автоматизированной генерации правил для анализа проектных решений.

Модель шаблона имеет следующую структуру:

$$TMP = (id, type, initial, derivatives, pararms, Fc, Fa),$$

где  $id$  – множество идентификаторов правил,

$type \in TypesOperation$  – множество типов операций,

$initial$  – множество исходных объектов для выполнения проектной операции,

*derivatives* – множество производных объектов после выполнения проектной операции,

$params \in ParamsOp$  – множество параметров операции со значением,

$Fc = initial \times derivatives \rightarrow condition$  – функция формирования условия выполнения правила анализа проектного решения,

$Fa = condition \times type \rightarrow action$  – функция, определяющая действия при срабатывании правила.

Модель сформированного нового правила для анализа проектных решений имеет следующий вид:

$$NR = (id, type, txt\_c, txt\_a),$$

где *id* – множество идентификаторов правил,

$type \in TypesOperation$  – множество типов операций,

*txt\_c* – множество описаний условий срабатывания правил,

*txt\_a* – множество рекомендуемых действий при срабатывании правил, например: замена неоптимальных действий проектировщика на оптимальную последовательность проектных операций.

Алгоритм автоматизированной генерации правил состоит из 11 пунктов и представлен ниже.

1. Запуск проектного решения, выполненного в САПР КОМПАС-3D, на анализ.
2. Анализ истории построения трехмерного машиностроительного объекта. Формируется последовательность проектных операций построения трехмерной модели – XML-описание истории построения.
3. Формирование шаблона правила для анализа, содержащего следующие компоненты:
  - объект анализа;
  - тип проектной операции (*type*);
  - исходные объекты проектной операции (*initial*);
  - производные объекты проектной операции (*derivatives*);
  - параметры проектной операции (*params*).
4. Автоматическое определение взаимосвязей между проектными операциями в результате использования метода структурно-параметрического анализа.
5. Автоматическое извлечение параметров проектных операций.
6. Автоматическое заполнение компонентов шаблона правила для анализа.
7. Анализ исходных (*initial*) и производных (*derivatives*) объектов проектных операций. Формирование условия для срабатывания правила (*condition*).

8. Анализ сформированного условия (*condition*) и типа проектных операций для формирования действий (*action*) при срабатывании правила.
9. Формирование шаблона нового правила для анализа на основе шагов 7 и 8.
10. Проверка сгенерированного нового правила на корректность экспертом.
11. Занесение нового правила в базу правил анализа проектных решений, выполненных в САПР КОМПАС-3D.

Разработана схема автоматизированной системы анализа проектных решений и обучения (рисунок 1).

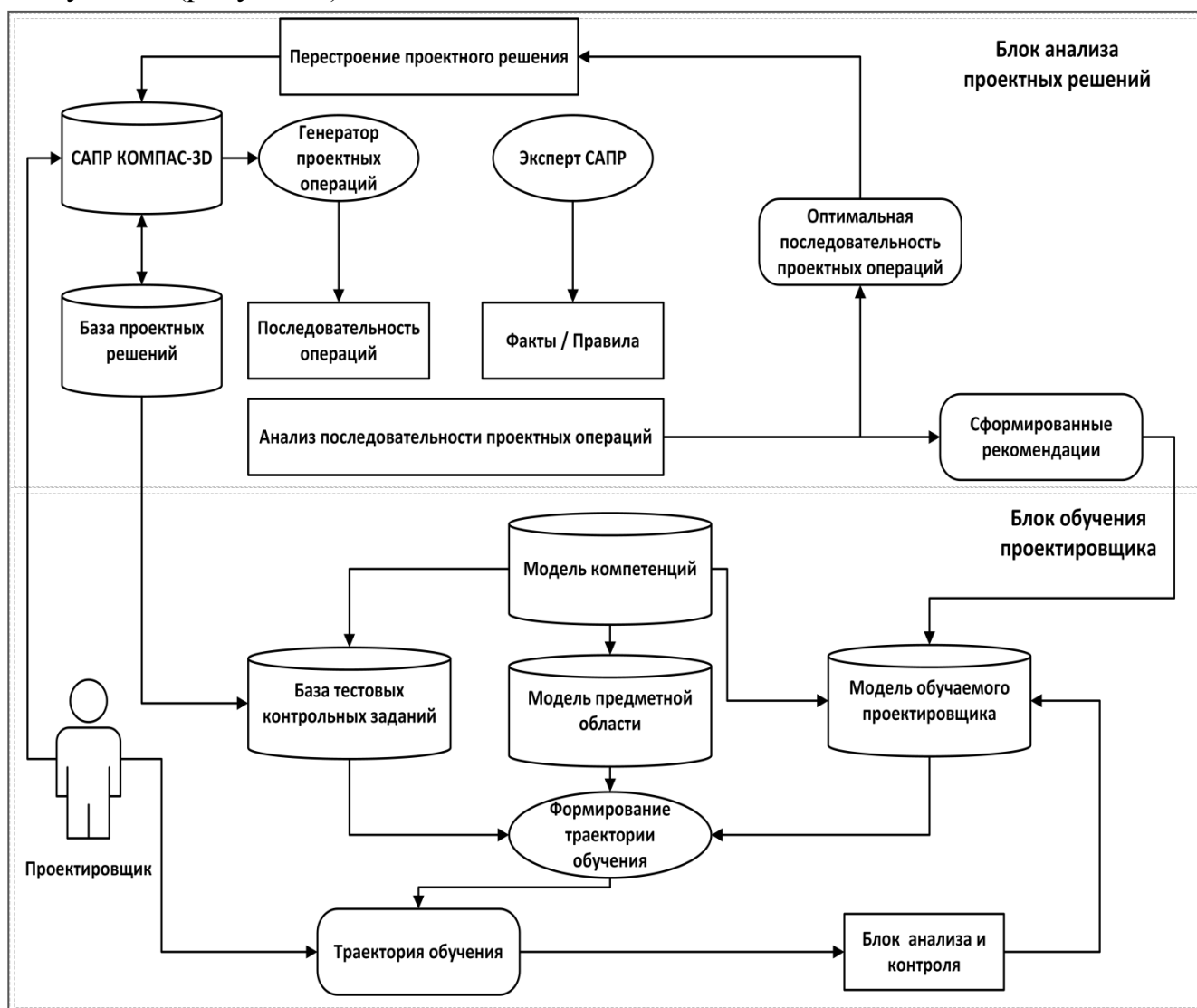


Рис. 1 Схема автоматизированной системы анализа проектных решений и обучения проектировщика

**В третьей главе** разработано математическое обеспечение автоматизированной системы обучения: модель компетенций, модель предметной области, алгоритм формирования персонализированной траектории обучения.

В разработанной модели компетенций было выделено 3 блока (класса) основных компетенций в области автоматизированного проектирования



трехмерных объектов (компетенции проектировщика): К1 – знание теории, К2 – умения проектировщика в области САПР, К3 – навыки проектировщика в области САПР.

Выделены следующие категории проектировщика трехмерных твердотельных машиностроительных изделий, выполненных в САПР КОМПАС-3D:

- без категории (молодой специалист);
- инженер-конструктор 3 категории;
- инженер-конструктор 2 категории;
- инженер-конструктор 1 категории;
- ведущий инженер-конструктор.

Модель компетенций представляется в виде графа

$$G(V, D),$$

в котором  $V$  – множество вершин,

$D$  – множество дуг.

Множество  $V$  состоит из множеств вершин  $V^F$  присваивания,  $V^R$  распараллеливания и  $V^L$  соединения. Множество  $D$  состоит из множеств дуг  $D^P$  разветвления,  $D^R$  распараллеливания и  $D^L$  соединения, т. е.  $D = D^P \cup D^R \cup D^L$ .

Выделены следующие типы вершин:

- распараллеливания;
- соединения;
- присваивания.

Вершины распараллеливания позволяют осваивать обучаемому проектировщику несколько компетенций одновременно. Освоение компетенций происходит независимо друг от друга с различным интервалом времени. Вершины соединения позволяют осваивать обучаемому проектировщику новую компетенцию только тогда, когда были освоены все предшествующие компетенции. Вершины присваивания позволяют обучаемому проектировщику последовательно осваивать компетенции одну за другой.

В предметной области выделены следующие классы:

- дидактическая единица (ДЕ);
- учебный материал (УМ) – набор сгруппированных по какому-либо признаку дидактических единиц;
- тестовые задания (ТЗ) – группирует теоретические вопросы для отдельно выбранной ДЕ;
- контрольное задание (КЗ) – группирует знания, умения и навыки по ряду ДЕ;

- тема изучения – группирует набор УМ, ТЗ и КЗ.

Алгоритм формирования персонифицированной траектории обучения автоматизированному проектированию состоит из следующих шагов.

1. Формирование входных контрольных заданий (КЗ): теоретический тест, практические задачи.
2. Выполнение проектировщиком входных КЗ.
3. Анализ текущего уровня освоения обучаемым проектировщиком компетенций (группы компетенций).
4. Формирование цели обучения.
5. Формирование учебного материала (УМ).
6. Изучение УМ проектировщиком.
7. Формирование выходных КЗ.
8. Выполнение проектировщиком практического задания.
9. Анализ степени освоения проектировщиком предложенного УМ. Если цель обучения достигнута, переход к шагу 15.
10. Выбор дидактических единиц (ДЕ), необходимых для дальнейшего изучения.
11. Формирование вспомогательного УМ и контрольных КЗ.
12. Изучение проектировщиком вспомогательного УМ.
13. Выполнение проектировщиком контрольных КЗ.
14. Анализ контрольных КЗ. Если компетенции проектировщика не удовлетворяют цели обучения, переход к шагу 10.
15. Завершение обучения проектировщика. Корректировка цели обучения.

**В четвертой главе** разработана компонентная архитектура системы анализа проектных решений и обучения проектировщика. Реализация программно-информационного обеспечения выполнена с помощью Web-сервера Apache HTTP Server, MySQL, NoSQL LiteDB и Java Platform, Microsoft.NET, Ruby. Разработана система, обеспечивающая управление анализом проектных решений, позволяет классифицировать изделия машиностроительных объектов, а также имеет возможность просмотра рекомендаций. Интерфейс программы поддерживает следующие режимы работы:

- 1) построение дерева модели – автоматизированное создание справочника к сборке/детали, который содержит дерево построения трехмерной модели и описание проектных операций;
- 2) анализ проектного решения – запуск анализа проектного решения с составлением рекомендаций по каждой детали, перестроение проектного решения на основе сформированных рекомендаций;

3) анализ изделий – состоит из различных модулей анализа определенных классов изделий;

4) поиск по базе данных изделий машиностроительных объектов.

Пример поиска по базе данных изделий и отображение проектного решения для повторного использования показаны на рисунке 2.

	Диаметр внутренний	Диаметр наружный	Ширина кольца	Угол выреза	Материал	Прочее
gs_GOST_26576_911.m3d	73,5	84,2	22,3	-	Сталь 65С2ВА ГОСТ 14959-79	+
gs_GOST_26576_911.m3d	60	84,2	22,3	-	Сталь 10 ГОСТ 1050-88	-
						сн = 1 //Высота ребра нару
						св = 1 //Высота ребра внут
						сг = 1,6 //Высота ребра фэ
						р = 1,5 //Шаг резьбы
						Gd = 10 //Диаметр резьбы
						B4 = 7,9 //Расстояние до р
						r1 = 0,4 //Радиус скруглени
						r2 = 1,6 //Высота фаски
						H = 1,6 //Эксцентриситет
						B2 = 15,9 //Ширина концен
						d2 = 73,5 //Диаметр эксцен
rings_GOST_13940_2893_911.m3d	20,5	-	1,9	-	Сталь 60С2А ГОСТ 14959-79	+
rings_GOST_13941_911.m3d	328	331	10,5	3,5	Сталь 60С2А ГОСТ 14959-79	+
rings_GOST_24559-81_911.m3d	121,5	-	-	-	Сталь 65С2ВА ГОСТ 14959-79	+
rings_GOST_13943_911.m3d	22,1	25,9	-	-	Сталь 60С2А ГОСТ 14959-79	+
rings_GOST_13942_911.m3d	45,8	53	-	-	Сталь 60С2А ГОСТ 14959-79	+
_1101.m3d	48	-	-	-	Сталь 10 ГОСТ 1050-88	+

Рис. 2 Пример работы режима «Поиск в базе изделий»

Предложена теоретическая оценка эффективности деятельности проектировщика при использовании системы классификации машиностроительных объектов. В среднем сокращение времени проектной деятельности проектировщика в САПР КОМПАС-3D при использовании системы классификации изделий составляет 11% и зависит от точности поиска в системе и степени покрытия электронного каталога машиностроительных изделий предприятия.

Предложена теоретическая оценка эффективности и качества обучения проектировщика при использовании разработанной модели компетенций и алгоритма формирования персонализированной траектории обучения. Результат

обучения в равен 87% от поставленной цели обучения, что значительно выше результатов обучения в системах Moodle (33%) и IDEA(44%).

**В заключении** сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

В работе все поставленные цели и задачи достигнуты, получены следующие результаты.

1. Предложен новый метод структурно-параметрического анализа проектных решений на основе последовательности проектных операций, отличающийся анализом дерева модели проектного решения и анализом операций объектов трехмерного моделирования. Метод позволяет сократить время проектной деятельности проектировщика в САПР КОМПАС-3D в среднем на 11% за счет классификации и повторного использования изделий машиностроительных объектов.

2. Предложен новый метод автоматизированной генерации правил для анализа проектных решений на основе уже имеющихся фактов и правил, отличающийся анализом зависимости между операциями твердотельного моделирования в САПР КОМПАС-3D и позволяющий формировать новые правила для анализа проектных решений.

3. Предложена ассоциативно-ориентированная модель компетенций проектировщика, отличающаяся установлением взаимосвязей между знаниями, умениями и навыками, связанных с предметной областью автоматизированного проектирования машиностроительных объектов, и позволяющая сформировать последовательность освоения компетенций и адаптировать процесс обучения автоматизированному проектированию в САПР КОМПАС-3D.

4. Предложен алгоритм формирования персонафицированной траектории обучения, отличающийся использованием ассоциативно-ориентированной модели компетенций проектировщика и позволяющий повысить эффективность и качество обучения.

5. Разработана и реализована архитектура автоматизированной системы анализа проектных решений САПР и обучения проектировщика с поддержкой персонафицированного обучения практическим задачам и освоения компетенций проектировщиком, позволяющая оптимизировать проектные решения с целью сохранения и повторного использования.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

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

1. Бригаднов, С.И. Разработка базы проектных решений машиностроительных объектов [Текст] / С. И. Бригаднов, М. Е. Уханова, И. С. Ионова, А. Г. Игонин // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2017. – № 12. – С. 79-85.

2. Афанасьев, А.Н. Разработка автоматизированной системы анализа проектных решений в САПР КОМПАС-3D [Текст] / А. Н. Афанасьев, С. И. Бригаднов, Д. С. Канев // Автоматизация процессов управления. – 2018. – № 1(51). – С. 108-117.

3. Афанасьев, А.Н. Методы и средства комплексной системы анализа проектных решений и обучения проектировщика [Текст] / А. Н. Афанасьев, С. И. Бригаднов // Автоматизация процессов управления. – 2018. – № 2(52). – С. 50-57.

**в иных изданиях:**

4. Бригаднов С.И. Разработка средств интеграции LMS Moodle и САПР КОМПАС // Вестник КГЭУ. Казань. – 2014. – С. 301-306.

5. Бригаднов С.И. Интеграция пакетов САПР и технологической платформы обучения // Информатика и вычислительная техника: сборник научных трудов 6-й Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, студентов и молодых ученых. ИВТ 2014. – Ульяновск, 2014. – С. 85-87.

6. Афанасьев А.Н. Разработка RV-грамматики для диаграммного языка BPMN / А.Н. Афанасьев, С.Ю.Кириллов, С.И. Бригаднов // Сборник научных трудов VII Всероссийской школы-семинара аспирантов, студентов и молодых ученых. ИМАП-2015. – Ульяновск, 2015. – С. 68-75.

7. Афанасьев А.Н. Метод генерации тестов для тренировки анализаторов диаграммных языков / А.Н. Афанасьев, Д.Г. Брагин, С.И. Бригаднов // Сборник научных трудов VII Всероссийской школы-семинара аспирантов, студентов и молодых ученых. ИМАП-2015. – Ульяновск, 2015. – С. 239-244.

8. Бригаднов С.И. Разработка системы корпоративного обучения САПР на базе платформы MOODLE // Электронное обучение в непрерывном образовании. – Ульяновск, 2015. – Т. 1, № 1(2). – С. 34-37.

9. Бригаднов С.И. Разработка системы корпоративного обучения САПР на базе платформы MOODLE // Вузовская наука в современных условиях: сборник материалов 50-й научно-технической конференции (25 января – 30 января 2016 года) Часть 3. – Ульяновск, 2016. – С. 295-297.

10. Бригаднов С.И. Методы и модели адаптации к учащимся в системах компьютерного обучения // Электронное обучение в непрерывном образовании. – Ульяновск, 2016. – № 1(3). – С. 165-169.

11. Афанасьев А.Н. Рекомендательная система для САПР КОМПАС / А.Н. Афанасьев, С.И. Бригаднов // Системы проектирования, технологической

подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM - 2016) труды XVI-й Международной молодежной конференции. – М., 2016. – С. 33-36.

12. Бригаднов С.И. Исследование моделей обучаемого в персонафицированных автоматизированных системах обучения // VIII Всероссийская школа-семинар аспирантов, студентов и молодых ученых. ИМАП-2016 (Россия, г. Ульяновск, 25-26 октября 2016 г.): сборник научных трудов. – Ульяновск, 2016. – С. 81-86.

13. Бригаднов С.И. Разработка рекомендательной системы САПР КОМПАС-3D // VIII Всероссийская научно-техническая конференция аспирантов, студентов и молодых ученых. ИВТ-2016 (Россия, г. Ульяновск. 24-26 мая 2016 г.): сборник научных трудов. – Ульяновск, 2016. – С. 68-73.

14. Бригаднов С.И. Анализ особенностей организации автоматизированных обучающих систем (АОС) // Современные технологии учебного процесса в вузе. Тезисы докладов научно-методической конференции 25 – 30 января 2016 года. – Ульяновск, 2016. – С. 109-111.

15. Бригаднов С.И. Разработка пользовательского интерфейса рекомендательной системы для САПР КОМПАС-3D // IV Международная научно-практическая конференция «Электронное обучение в непрерывном образовании 2017», г. Ульяновск. – Ульяновск, 2017. – С. 48-53.

16. Бригаднов С.И. Рекомендательная система САПР КОМПАС-3D с интуитивно-понятным пользовательским интерфейсом // IX Всероссийская научно-техническая конференция аспирантов, студентов и молодых ученых. ИВТ-2017. – Ульяновск, 2017. – С. 57-60.

17. Brigadnov S.I. Development of associative-oriented models of competencies and trainees in automated training systems // INTERACTIVE SYSTEMS: Problems of Human - Computer Interaction Collection of scientific papers. 2017. – P. 185-189.

18. Бригаднов С.И. Анализ экспертных систем // Сборник научных трудов IX Всероссийской школы-семинара аспирантов, студентов и молодых ученых. ИМАП-2017. – Ульяновск, 2017. – С. 93-100.

19. Бригаднов С.И. Разработка комплексной автоматизированной интеллектуальной системы анализа проектных решений и обучения проектировщика // V Международная научно-практическая конференция «Электронное обучение в непрерывном образовании 2018», г. Ульяновск. – Ульяновск, 2018. – С. 136-142.

20. Бригаднов С.И. Разработка компонентов программного обеспечения интеллектуальной системы проектирования и обучения / В.А Гульшин, Н.Н. Войт, С.И. Бочков, М.Е. Уханова, Д.С. Канев // V Международная научно-практическая

конференция «Электронное обучение в непрерывном образовании 2018», г. Ульяновск. – Ульяновск, 2018. – С. 168-176.

**свидетельства:**

21. Свидетельство № 2018615540 Российская Федерация. Компьютеризированная система структурно-параметрического анализа и классификации изделий к машиностроительным САПР: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / Афанасьев А.Н., Войт Н.Н., Канев Д.С., Бригаднов С.И., Уханова М.Е., Ионова И.С.; заявитель и правообладатель Ульян. гос. техн. ун-т. – № 2018612813; заявл. 21.03.2018; зарегистр. 10.05.2018.

22. Свидетельство № 2018615611 Российская Федерация. Рекомендательная система структурно-параметрического анализа проектной деятельности проектировщика к машиностроительным САПР (КОМПАС-3D): свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / Афанасьев А.Н., Войт Н.Н., Канев Д.С., Бригаднов С.И., Уханова М.Е., Ионова И.С.; заявитель и правообладатель Ульян. гос. техн. ун-т. – № 2018612664; заявл. 21.03.2018; зарегистр. 11.05.2018.

**Принятые сокращения и обозначения**

АОС – автоматизированная обучающая система

ДЕ – дидактическая единица

УМ – учебный материал

КЗ – контрольные задания

ЧПУ – числовое программное управление

Бригаднов Сергей Игоревич

Автоматизация структурно-параметрического анализа проектных решений и обучения проектировщика изделий машиностроения средствами САПР КОМПАС

Автореферат

Подписано в печать 02.08.2018. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 1,39. Тираж 100 экз. Заказ 595

ИПК «Венец» УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, Северный Венец, д. 32.