

*На правах рукописи*



Цыганков Денис Эдуардович

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА  
КОНСТРУКТИВНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ УЗЛОВ  
РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ  
ПРОЦЕССНОЙ МОДЕЛИ ПРОЕКТНОЙ  
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

Специальность: **05.13.12** – Системы автоматизации  
проектирования (промышленность)

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Ульяновск – 2018

Работа выполнена на кафедре «**Прикладная математика и информатика**»  
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Похилько Александр Федорович**,  
кандидат технических наук, доцент, доцент ка-  
федры «Прикладная математика и информатика»  
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный тех-  
нический университет»

Официальные оппоненты: **Аверченков Андрей Владимирович**,  
доктор технических наук, профессор, заведую-  
щий кафедрой «Компьютерные технологии и си-  
стемы» ФГБОУ ВО «Брянский государственный  
технический университет»

**Канев Дмитрий Сергеевич**,  
кандидат технических наук, старший разработчик  
ООО «Облачный ритейл»

Ведущая организация: **Федеральный научно-производственный центр  
АО «Научно-производственное объединение  
«Марс» (ФНПЦ АО «НПО «Марс»)**

Защита состоится «19» декабря 2018 г. в «12» часов «00» минут на за-  
седании диссертационного совета Д212.277.01 при ФГБОУ ВО «Ульяновский  
государственный технический университет» по адресу 432027, г. Ульяновск, ул.  
Северный Венец, 32 (ауд. 211, Главный корпус).

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

Автореферат разослан «17» октября 2018 г.

Отзывы и замечания по автореферату (в двух экземплярах), заверенные  
печатью, просим направлять в адрес университета: 432027, г. Ульяновск, ул. Се-  
верный Венец, 32, ученому секретарю диссертационного совета Д212.277.01.

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

 Смирнов Виталий Иванович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Сегодня, в преддверии 4-й промышленной революции (*англ. Industry 4.0*) информационные технологии, пронизывая практически все сферы производственной деятельности современных предприятий, играют ключевую роль в развитии промышленного комплекса, в том числе оборонного. Без применения новейших информационных технологий в нынешних реалиях невозможно обеспечить конкурентоспособность изготавливаемой продукции, определяющей темпы ее реализации и вносящей вклад в конкурентоспособность всего предприятия.

Применительно к предприятиям машиностроительной отрасли основные характеристики продукции формируются на стадии ее разработки, т.е. качество изделия как основной компонент его конкурентоспособности определяется решениями, принимаемыми в процессе проектирования, повышение эффективности которого достигается применением систем автоматизированного проектирования (САПР). Одним из этапов процесса проектирования является *конструкторское проектирование*, на выходе которого формируется проектное решение – материализация принципиальных схем, обеспечивающих требуемую функциональность. САПР, предназначенными для решения задач конструкторского проектирования, являются *CAD-системы*.

Процесс конструкторского проектирования состоит из проектных операций, разделяемых на два класса: *рутинных*, автоматизация которых реализована с самого появления САПР, и *творческих*, автоматизация которых в полной мере остается нереализуемой и в настоящее время. При этом именно в творческих операциях сконцентрирована инженерная деятельность – разработка проектного решения, удовлетворяющего техническому заданию по различным показателям функциональности, надежности, технологичности, эргономичности, эстетичности и другим критериям.

Проектное решение полностью описывается комплектом *конструкторской документации (КД)*, тенденция перехода которой от 2D-чертежей на бумажных носителях к электронным 3D-моделям ярко выражена в настоящее время и уже задала основное направление дальнейшего развития САПР.

Электронные 3D-модели, отображая геометрическую и структурную информацию о проектном решении (уровня «*Деталь*» и «*Сборочная единица*» соответственно), хранят в себе способ ее формирования в виде последовательности проектных операций, называемой термином «*Дерево построения*». Каждая из проектных операций, при этом, описывается набором параметров, значения которых определяют атрибуты формируемого геометрического элемента. Так, если сформированная 3D-геометрия отображает экземпляр проектного решения, то в дереве ее построения содержатся данные (ограничения), ассоциированные с геометрической моделью, регламентирующие процесс модифицирования последней уже после ее создания.

Каждый компонент радиотехнических изделий (уровней «*Деталь*» и «*Сборочная единица*») при отношении к изделию более высокого уровня («*Блок*», «*Шкаф*» и др.) имеет фиксированное **смысловое содержание**, заключающееся

в его конструктивном исполнении и функциональном назначении. Сохранение исходного смыслового содержания проектного решения в процессе его модификации (повторного использования) достигается в САД-системах **ограничениями** в виде параметрических или геометрических зависимостей.

Во всех современных САПР модификация 3D-геометрии реализуется двумя принципиально различающимися подходами: параметрическим моделированием на основе дерева построения и прямым геометрическим моделированием. Однако при таких подходах могут учитываться только параметрические или геометрические зависимости (ограничения) соответственно, которые не могут быть переданы из одного подхода в другой, а также воспроизведены при совмещении обоих подходов в т.н. «синхронной» технологии. Как следствие, в процессе модификации проектного решения не могут быть учтены все возможные конфигурации, соответствующие его исходному смысловому содержанию. В результате этого модифицируемое решение требует обязательной «ручной» доработки, что, в конечном счете, сводится к увеличению затрачиваемых временных ресурсов и повышению интеллектуальной нагрузки на пользователя в процессах разработки новой и изменения уже выпущенной КД.

Значительный вклад в теорию и практику автоматизации проектной деятельности с использованием САПР внесли российский ученые *Норенков И.П., Курейчик В.М., Курейчик В.В., Камаев В.А., Евгеньев Г.Б., Соснин П.И., Кучуганов В.Н., Лячек Ю.Т., Боргест Н.М., Борисов А.Н., Ямникова О.А.* и др. Работу с САД-системами в процессах конструирования подробно описывают *Большаков В.П., Малюх В.Н., Яблочников Е.И.* и др. Способы информационного представления изделия на этапе конструкторского проектирования рассматривают *Базров Б.М., Багаев Д.В., Вичугова А.А.* и др. Автоматизацию конструирования в САПР сложных радиотехнических изделий рассматривает *Лухачев М.В.* Повышением эффективности процесса проектирования в контексте применения САД-систем занимаются зарубежные ученые *Stjepandić J., Helm R., Skarka W., Cunningham J.J., Bondar S., Chang K., Hamilton P., Pratt M.J.* и др.

Возрастающая роль 3D-моделей в условиях современного производства требует повышения уровня автоматизации во всех аспектах конструкторской деятельности. Этому, в свою очередь, препятствует отсутствие механизмов автоматизированной модификации проектных решений, обеспечивающих вариативность в рамках одного класса, определяемого смысловым содержанием проектного решения, и подразумевающего как структурное, так и геометрическое различие. Решение данной проблемы способствует повышению эффективности автоматизированного проектирования в задачах повторного использования полученных ранее проектных решений и, следовательно, является актуальной научно-технической задачей.

**Целью** диссертационной работы является повышение качества проектных решений и снижение затрачиваемых на их формирование временных ресурсов за счет включения средств конструктивно-функциональной поддержки в процессы проектирования механических узлов радиотехнических изделий.

Поставленная цель достигается выполнением следующих **задач**:

1. Выделение данных, задающих смысловое содержание проектного решения (его информационное описание по признакам конструктивного исполнения и функционального назначения) и их отображение в рамках 3D-модели;
2. Анализ известных подходов к построению редактируемой 3D-модели в САД-системах в контексте установления параметрических и геометрических ограничений, а также достижения их фиксации и воспроизведения;
3. Разработка метода отображения конструктивно-функциональной информации о проектируемом изделии в стандартном инструментарии САПР;
4. Выбор способа обобщения и унификации проектных решений (их фрагментов) в САПР по признакам конструктивно-функциональной специфики;
5. Формирование метода поддержки проектирования в САД-системе, обеспечивающего модификацию проектных решений в рамках единого класса, определяемого общей конструктивно-функциональной спецификой, и подразумевающего как структурную, так и геометрическую вариативность;
6. Разработка комплекса программных средств, реализующего предлагаемый метод конструктивно-функциональной поддержки проектирования в САПР и его апробация на типовых задачах конструкторского проектирования;
7. Оценка эффективности практического применения средств конструктивно-функциональной поддержки проектирования в сравнении с известными подходами к автоматизации проектной деятельности в САПР.

**Объектом диссертационного исследования** является автоматизация формирования проектных решений в процессах конструкторского проектирования механических узлов радиотехнических изделий.

**Предметом диссертационного исследования** являются модели и средства автоматизированного формирования проектных решений, обеспечивающие сохранение конструктивно-функциональной специфики в процессе их модификации и повторного использования.

**Методы исследования.** В диссертационной работе применяются методы классификации, теории множеств, теории графов, системного подхода, основ общей теории автоматизированного проектирования, а также объектно-ориентированного подхода (при создании комплекса программных средств).

**Основанием для выполнения** диссертационной работы является участие диссертанта в ряде НИОКР, среди которых:

- грант РФФИ № 16-47-732138 *«Разработка моделей, методов и средств информационной поддержки технологий Concurrent Engineering на основе интегрированного представления процесса в интеллектуальной базе знаний САПР»* (исполнитель);
- госбюджетная НИР 07-03.01.10 *«Интеллектуальные инструментальные средства автоматизации проектной деятельности в распределенной производственной среде»* (ответственный исполнитель);
- гранты по программе «У.М.Н.И.К»: № 1695ГУ1/2014 и № 6422ГУ2/2015 *«Разработка сервиса internet-мастерская»* (руководитель).

**Научная новизна** результатов диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Предложен новый метод информационного представления проектных решений в соответствии с модульным принципом, отличающийся критерием конструктивно-функциональной целостности, заключающемся в представлении изделия системой типовых конструктивно-функциональных элементов, позволяющем отображать его смысловое содержание в заданной предметной области;

2. Впервые предложена процессная модель проектной деятельности в виде обобщенного дерева конструирования – последовательности композиций базовых проектных операций САД-системы, отличающаяся системой геометрических и математических ограничений, обеспечивающих построение класса проектных решений по конфигурируемым конструктивно-функциональным элементам, относящихся к заданной предметной области;

3. Представлен новый метод отображения конструкторской структуры изделия в САД-системе, отличающийся биекцией между конструктивно-функциональными элементами, составляющими его структуру, и макрооперациями, составляющими процесс построения его 3D-модели, позволяющий фиксировать, отображать и воспроизводить смысловое содержание проектного решения;

4. Впервые представлен метод конструктивно-функционального проектирования в САПР, отличающийся сохранением конструктивно-функциональной целостности проектного решения в процессах его формирования вновь и повторного использования, и основанный на процессной модели проектной деятельности, генерирующей экземпляры проектных решений, отличающихся геометрически и структурно, но обобщенных по их смысловому содержанию.

**Практическую ценность** диссертационной работы составляет комплекс программных средств, реализующий конструктивно-функциональную поддержку проектирования в САПР деталей и узлов – компонентов радиотехнических изделий, применение которого в процессе конструкторского проектирования обеспечивает следующие положительные эффекты:

- Снижение временных и трудовых ресурсов, затрачиваемых на формирование вновь и/или повторное использование (модификацию) проектного решения относительно известных и наиболее широко используемых подходов к автоматизации проектной деятельности в САПР;

- Исключение ошибок (в геометрии и структуре), возникающих в процессах модификации и повторного использования проектных решений в САПР;

- Возможность систематизации, накопления и унификации проектных решений как на уровне деталей и узлов, так и их конструктивно-функциональных элементов для повторного использования;

- Исключение выхода за рамки заданного класса проектных решений (определяющих конструктивное исполнение и функциональное назначение) в процессе его разработки вновь и повторного использования (модификации).

Практическая ценность результатов диссертационной работы подтверждается их использованием в производственном процессе АО «Ульяновский меха-

нический завод» и учебном процессе ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» в соответствии с актами внедрения.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Представление проектных решений в САПР в виде иерархической системы конструктивно-функциональных элементов обеспечивает фиксацию и отображение его смыслового содержания в заданной предметной области;

2. Процессная модель проектной деятельности в виде последовательности композиций базовых операций позволяет задавать класс проектных решений с единым смысловым содержанием, с возможностью выбора конфигурируемого экземпляра, исключая выход за установленные рамки заданного класса;

3. Применение метода конструктивно-функциональной поддержки проектирования в САПР является эффективным по показателям временных затрат и интеллектуальной нагрузки на пользователя;

4. Разработанный комплекс программных средств как компонента системы конструкторского проектирования механических деталей и узлов радиотехнических изделий в полной мере реализует все теоретические положения конструктивно-функциональной поддержки проектной деятельности в САПР.

**Достоверность научных положений и выводов** обусловлена адекватностью и непротиворечивостью применяемых моделей и методов и подтверждена экспериментальными данными, полученными в ходе испытаний разработанного комплекса программных средств, а также результатами практического использования предложенных в диссертационной работе методов и средств в соответствии с актами об их внедрении. Кроме того достоверность подтверждена получением на разработанные программы для ЭВМ и базу данных свидетельств о государственной регистрации.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Результаты диссертационной работы реализованы в виде методов конструктивно-функциональной поддержки проектирования в САПР деталей и узлов – компонентов радиотехнических изделий, обеспечивающих повышение эффективности проектной деятельности на этапе конструкторского проектирования. Разработан комплекс программных средств, реализующий предложенные методы; на его компоненты: программы для ЭВМ и базу данных получены свидетельства о государственной регистрации

Результаты диссертационной работы внедрены в производственный процесс АО «Ульяновский механический завод» в виде комплекса программных средств автоматизации проектной деятельности, повышающего эффективность процессов разработки деталей и сборочных единиц и оформления на них КД. Результаты используются в проектной деятельности в масштабах предприятия.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на **37** конференциях, среди которых: III Всероссийская научно-техническая конференция «*Теоретические и практические аспекты развития отечественного авиастроения*» (г. Ульяновск, 2014 г.), Международная научно-техническая конференция «*Информационные системы*

*и технологии (ИСТ-2015)»* (г. Нижний Новгород, 2015 г.), 22<sup>nd</sup> ISPE International Conference on Concurrent Engineering (CE2015) (Нидерланды, г. Делфт, 2015 г.), Международный конгресс по интеллектуальным системам и информационным технологиям «*IS & IT'15*» (пос. Дивноморское, 2015 г.), Международная научно-техническая конференция «*Перспективные информационные технологии (ПИТ-2016)*» (г. Самара, 2016 г.), XIX Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «*Современные проблемы радиоэлектроники*» (г. Красноярск, 2016 г.), 8-я Всероссийская научно-техническая конференция аспирантов, студентов и молодых ученых «*Информатика и вычислительная техника (ИВТ-2016)*» (г. Ульяновск, 2016 г.), 23<sup>rd</sup> ISPE International Conference on Transdisciplinary Engineering (TE2016) (Бразилия, г. Куритиба, 2016 г.), V Ульяновский молодежный инновационный форум (г. Ульяновск, 2016 г.), VIII Всероссийская школа-семинар аспирантов, студентов и молодых ученых «*Информатика, моделирование, автоматизация проектирования (ИМАП-2016)*» (г. Ульяновск, 2016 г.), Международная научно-техническая конференция «*Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения (INTERMATIC-2016)*» (г. Москва, 2016 г.), XIX Всероссийская научно-практическая конференция «*Актуальные проблемы машиностроения*» (г. Самара, 2017 г.), IV Всероссийская научно-практическая конференция «*Прикладные информационные системы (ПИС-2017)*» (г. Ульяновск, 2017 г.), 27<sup>th</sup> International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2017) (Италия, г. Модена, 2017 г.), 24<sup>th</sup> ISPE International Conference on Transdisciplinary Engineering (TE2017), (Сингапур, г. Наньян, 2017 г.), XII International conference «*Interactive Systems: Problems of Human - Computer Interaction*» (г. Ульяновск, 2017 г.), X Юбилейная Всероссийская научно-практическая конференция (с участием стран СНГ) «*Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем*», (г. Ульяновск, 2017 г.), IX Всероссийская школа-семинар аспирантов, студентов и молодых ученых «*Информатика, моделирование, автоматизация проектирования (ИМАП-2017)*» (г. Ульяновск, 2017 г.), Первая Всероссийская научно-практическая конференция «*Нечеткие системы и мягкие вычисления. Промышленные применения (FTI-2017)*» (г. Ульяновск, 2017 г.), II Научно-техническая конференция «*Математическое моделирование, инженерные расчеты и программное обеспечение для решения задач ВКО*» (г. Москва, 2017 г.), Всероссийская научно-техническая конференция «*Расплетинские чтения – 2018*», (г. Москва, 2018 г.) и др.

Основные положения и результаты диссертационной работы были отображены в достижениях диссертанта при его участии во Всероссийских конкурсах «**Инженер года**» по версии «*Инженерное искусство молодых*»:

- в 2015 году – в номинации «*Техника военного и специального назначения*»;
- в 2017 году – в номинации «*Информатика, информационные сети, вычислительная техника*»;

По итогам обоих конкурса диссертант был признан победителем и награжден дипломом и медалью «*Лауреат Всероссийского конкурса «Инженер года»*».

**Публикации.** По результатам диссертационной работы опубликовано **38** печатных работ. Основные научные положения представлены в виде **6** публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, **4** публикаций, индексируемых в базе Scopus и **1** публикации, индексируемой в базе Web of Science. Печатные работы также включают **2** свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и **1** свидетельство о государственной регистрации базы данных. Перечень основных публикаций представлен в конце автореферата.

**Личный вклад.** Все научные результаты, представленные в диссертационной работе и сформулированные в положениях, выносимых на защиту, получены автором лично. Ряд публикаций подготовлен совместно с соавторами, при этом вклад диссертанта был определяющим.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников, а также 7 приложений. Основной текст диссертации изложен на 178 страницах машинописного текста, содержит 64 рисунка и 7 таблиц. Библиография включает 253 наименования на 30 страницах. Объем приложений составляет 40 страниц. Общий объем диссертационной работы – 248 страниц.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** представлена основная информация о диссертационной работе. Обоснована актуальность темы. Обозначены цель и задачи работы, определены научная новизна и практическая ценность результатов диссертационного исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту. Дано краткое содержание диссертационной работы.

**В первой главе** производится обзор существующих методов и средств автоматизации конструкторского проектирования в жизненном цикле изделия, особое внимание в котором уделяется проблеме достижения структурной и геометрической вариативности проектных решений.

На этапе конструкторского проектирования изделие полностью описывается структурой, регламентируемой ГОСТ Р 53394-2017, в соответствии с которым разделяется на *функциональную (ФСИ)* и *конструкторскую (КСИ)* структуры изделия. Проектное решение представляет собой *конструкцию* – экземпляр материализации КСИ, описываемый комплектом *конструкторской документации (КД)*, который в современных САПР отображается в виде 3D-модели. Смысловое содержание проектного решения закладывается в ФСИ и КСИ и впоследствии фиксируется в КД.

Во всех современных САД-системах, основанных на технологии «*Feature-based modeling*», построение 3D-модели реализуется посредством *базовых проектных операций (БО)* – простейших операций, предоставляемых функционалом используемой САПР, обеспечивающих построение *конструктивного элемента геометрии (КЭГ)*, набор которых составляет 3D-модель. Эквивалентом

КЭГ в иностранной литературе является «*фичерс*» (англ. *feature*). Сформированная 3D-модель полностью описывается деревом построения – иерархической структурой, отображающей последовательность БО, участвующих в построении 3D-геометрии.

Установлено, что отображение КСИ в 3D-модели способствует фиксации и воспроизведению конструктивно-функциональной информации о проектном решении, при этом единственной структурой, в которой это может быть реализовано, является *дерево построения 3D-модели*; тогда предлагаемое отображение имеет вид:

$$\text{Дер}(\text{Мод}_{\text{Изо}}^{3D}) = \{ \text{КЭГ}_k \left| \sum_{j=1}^p \text{КЭГ}_j \rightarrow \text{КЭ}_i \right. \}, k = \overline{1, m}, i = \overline{1, n},$$

где  $\text{Дер}(\text{Мод}_{\text{Изо}}^{3D})$  – это дерево построения 3D-модели изделия  $\text{Мод}_{\text{Изо}}^{3D}$ ,  $\text{КЭГ}_k$  –  $k$ -й  $\text{КЭГ} \in \text{Мод}_{\text{Изо}}^{3D}$ ,  $\text{КЭ}_i$  –  $i$ -й конструктивный элемент (составной элемент конструкции) проектируемого изделия.

Рассмотренные подходы к такому отображению либо не обеспечивают полноту конструктивно-функциональной информации, либо труднореализуемы по временным затратам и интеллектуальной нагрузке на конструктора.

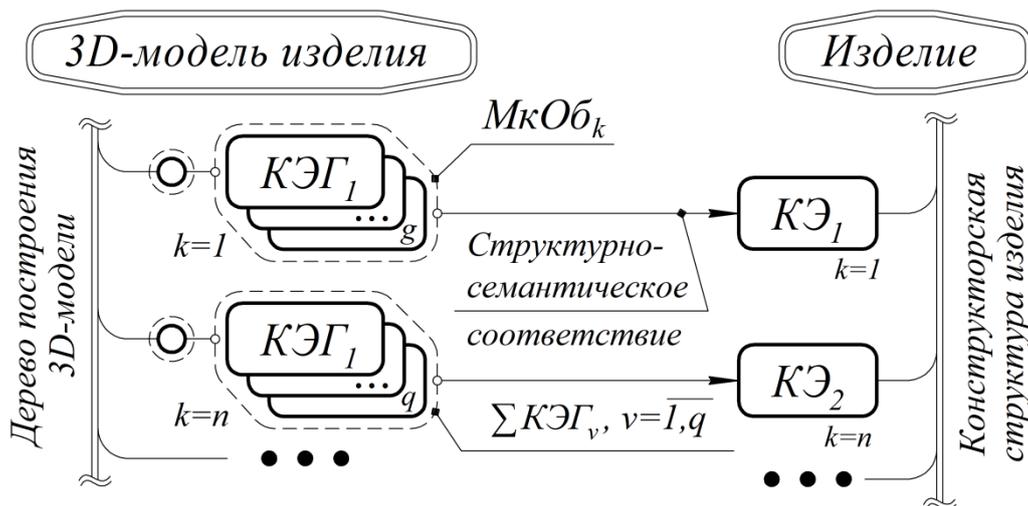
Произведен сравнительный анализ известных и наиболее широко используемых подходов к автоматизированному конструированию в САПР, по результатам которого сделан вывод о том, что они, реализуя принципиально различающиеся алгоритмы построения 3D-модели, не способны в полной мере автоматизировать процесс конструкторского проектирования.

По итогам обзора, проведенного в первой главе, сформированы требования к модели представления информации о проектных решениях в САПР, а именно:

- Отображение КСИ проектируемого изделия в виде иерархической структуры, описывающей 3D-модель непосредственно (в САД-системе);
- Оперирование структурными единицами конструкции, обладающими физическим смыслом в предметной области проектируемого изделия, при построении и последующем редактировании (модификации) 3D-геометрии;
- Обеспечение модифицируемости проектных решений в предварительно заданных рамках класса, определяемого конструктивно-функциональной спецификой.

**Во второй главе** описывается последовательность разработки метода конструктивно-функциональной поддержки проектирования в САД-системе, обеспечивающего модификацию проектных решений в рамках единого класса, определяемого общей конструктивно-функциональной спецификой, и подразумевающего как структурное, так и геометрическое различие.

Предложен метод отображения конструкторской структуры изделия в дереве построения его 3D-модели, основанный на поэлементном и взаимно однозначном соответствии каждому структурному элементу конструкции ( $\text{КЭ}_k$ ) некоторой *композиции*  $\text{КЭГ}$ , рассматриваемой в составе 3D-модели как целостный макрообъект ( $\text{МкОб}_k$ ). Данный метод обозначен как метод структурного соответствия; он представлен на рисунке 1.



**Рисунок 1** – Структурное соответствие между КСИ и деревом построения 3D-модели

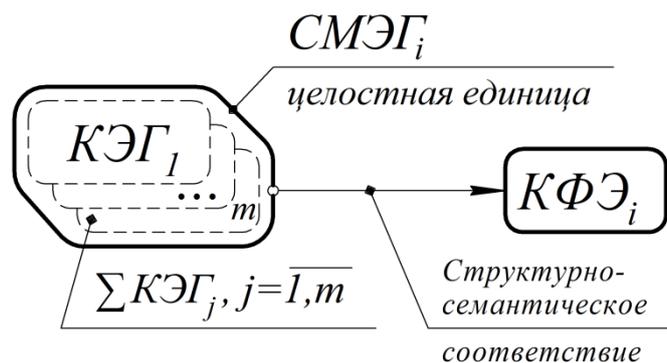
Согласно методу структурного соответствия отображение КСИ в дереве построения 3D-модели описывается следующим образом:

$$\text{Дер}(\text{Мод}_{\text{Изд}}^{3D}) = \{ \text{MкОб}_k \mid \text{MкОб}_k \rightarrow \text{КЭ}_k \}, k = \overline{1, m},$$

где  $\text{MкОб}_k$  –  $k$ -й макрообъект, представляющий собой композицию КЭГ, соответствующую одному структурному элементу конструкции изделия.

Такой макрообъект ( $\text{MкОб}_k$ ), обозначается «Смысловой макроэлемент геометрии (СМЭГ)» (рисунок 2), его критерии:

- целостность, т.е. входящие в его состав абстрактный набор КЭГ недоступен для взаимодействия с пользователем;
- смысловое содержание, заключаемое в отображении структурного элемента изделия и конструктивно-функциональной информации о нем;
- конфигурирование, обеспечивающее структурную и геометрическую вариативность в заданном классе при сохранении смысловой целостности.



**Рисунок 2** – Отображение КФЭ семантическим макроэлементом геометрии (СМЭГ)

СМЭГ обладает признаками как 3D-модели (в плане своей внутренней структуры), так и КЭГ (в плане своего поведения и определения).

Впервые предложен метод системного представления радиотехнического изделия (уровней «Деталь» / «Узел») в соответствии с модульным принципом, в рамках которой впервые введен конструктивно-функциональный элемент (КФЭ), отличающийся фиксированным смысловым содержанием, позволяющем описывать конструкцию изделия в терминах предметной области.

Конструкторская структура изделия описывается в виде системы КФЭ:

$$\text{Изд}_q = \{ \text{КФЭ}_i, \text{Св}_{i,j}^{\text{КФЭ}} \}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n},$$

где  $\text{КФЭ}_i$  –  $i$ -й конструктивно-функциональный элемент,  $\text{Св}_{i,j}^{\text{Св}}$  – взаимосвязи между  $i$ -м и  $j$ -м КФЭ.

Впервые предложена модель *семантической макрооперации (СМО)* (рисунок 3) как основной процедуры проектирования в САПР, формируемой путем обобщения базовых операций САД-системы.

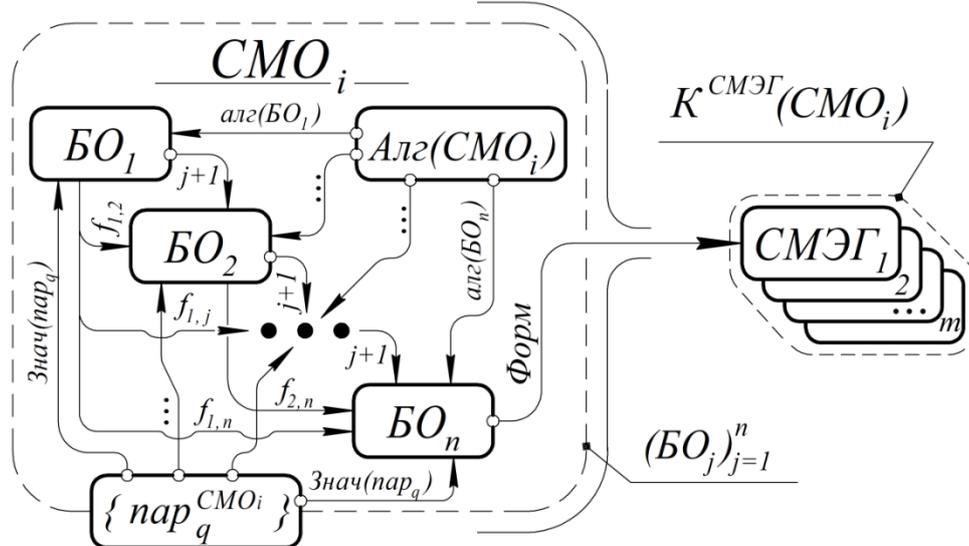


Рисунок 3 – Структура семантической макрооперации (СМО)

СМО состоит из набора последовательностей БО, обеспечивающего построения класса СМЭГ, соответствующих набору КФЭ. Такая последовательность БО, формирующая экземпляр класса подобных по конструктивно-функциональным признакам СМЭГ, обозначается термином «маршрут конструирования (МК)». Экземпляр МК определяется значениями параметров СМО.

Последовательность СМО в процессе формирования проектного решения фиксируется в конструкторском дереве построения (рисунок 4) – иерархической структуре, устанавливающей взаимосвязь между последовательностью СМО  $Проц(Мод_{Изд}^{3D})$  и системой формируемых СМЭГ  $Стр(Мод_{Изд}^{3D})$ .

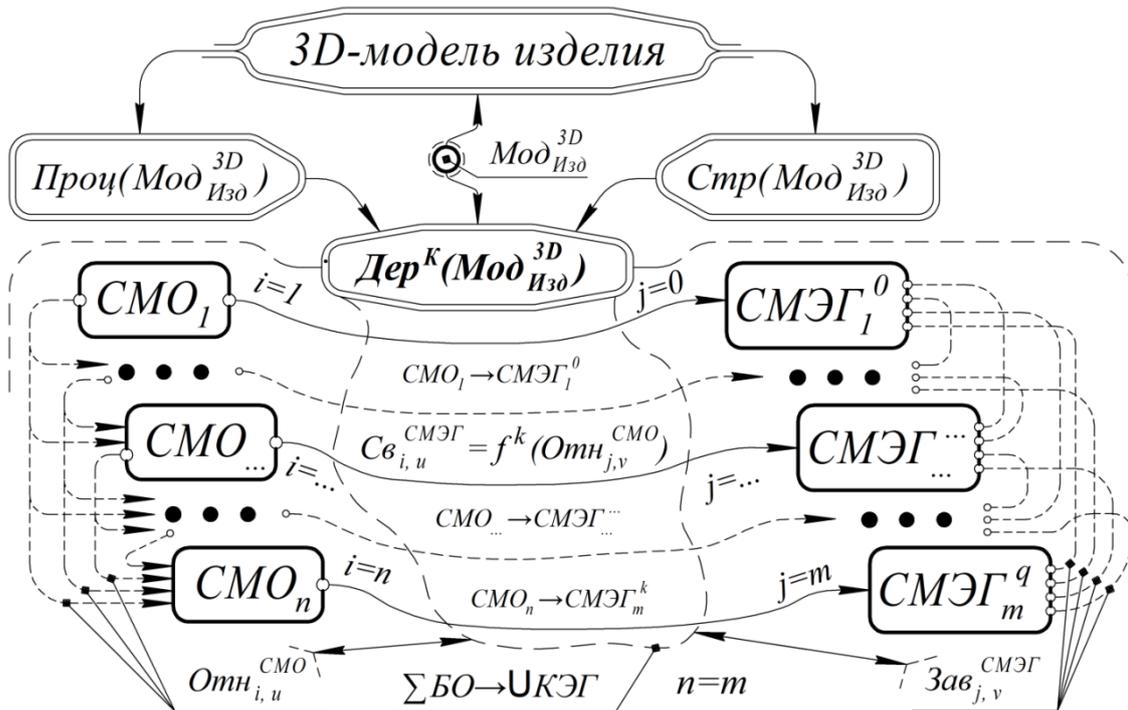


Рисунок 4 – Конструкторское дерево построения 3D-модели как последовательность СМО

Процесс проектирования в САД-системе, таким образом, сводится к оперированию СМО (посредством задания значений входных параметров), а конструкторское дерево построения 3D-модели в виде последовательности СМО  $Проц(Мод_{Изд}^{3D})$  отображает информацию о конструкторской структуре проектируемого изделия  $Стр^K(Мод_{Изд}^{3D})$ , что представлено на рисунке 5.

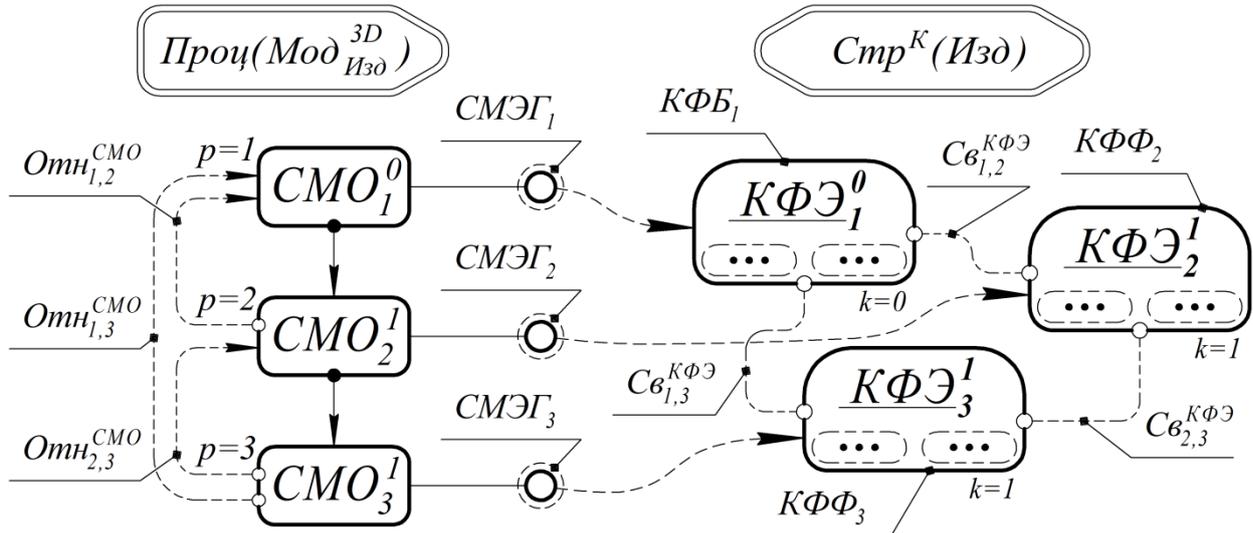


Рисунок 5 – Отображение КСИ конструкторским деревом построения 3D-модели

Процессная модель проектной деятельности в виде обобщенного дерева конструирования в САПР (рисунок 6) содержит в себе совокупность МК, определяющих каждый из входящих в 3D-модель СМЭГ как в плане его геометрии, так и в плане его структуры.

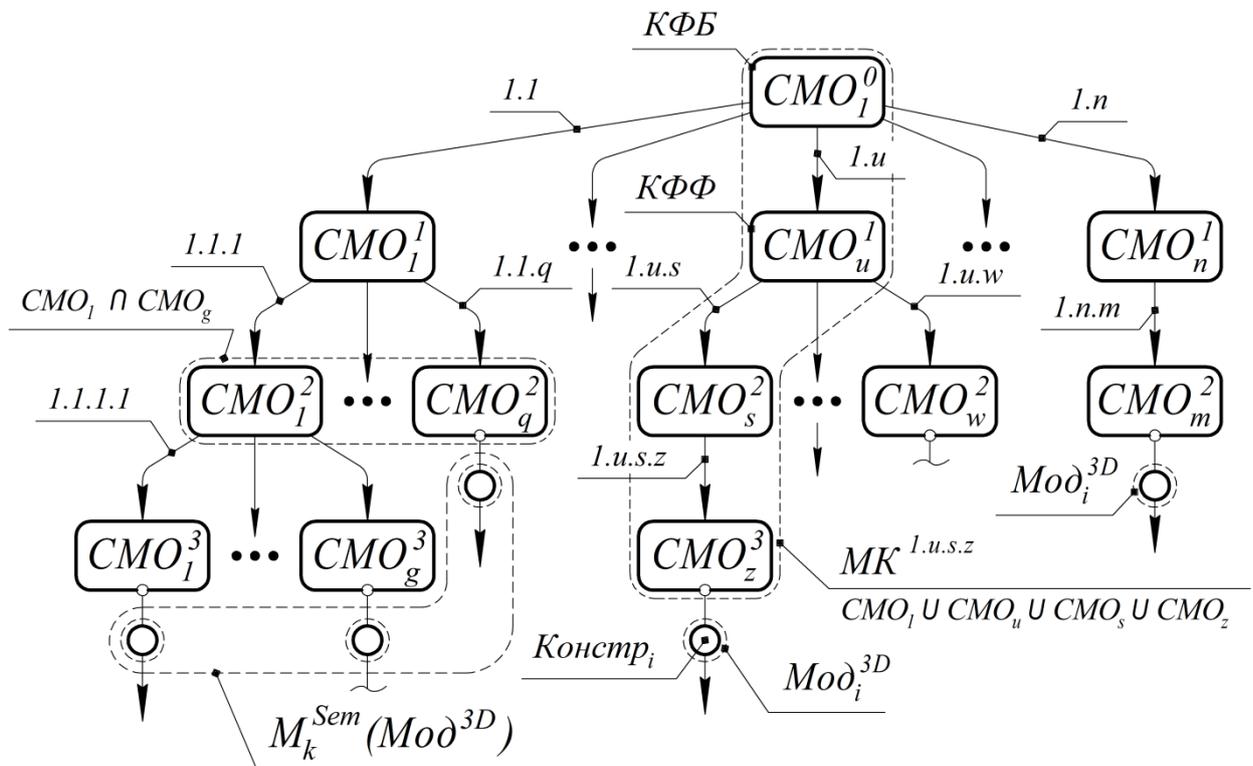


Рисунок 6 – Процессная модель проектной деятельности в САПР в виде обобщенного дерева конструирования

Отображение КФЭ посредством СМЭГ согласно рисункам 2 и 5 позволяет визуализировать внутреннюю (конструкторскую) структуру проектного решения в виде 3D-модели и, следовательно, его смысловое содержание. Путем изменения значений входных данных к СМО реализуется модификация конструкции за счет изменения отдельных КФЭ, взаимосвязи между которыми обеспечивают перестраивание всех зависимых СМЭГ, что, в свою очередь, обеспечивает геометрическую и структурную вариативность проектного решения в заданных рамках при фиксации его смыслового содержания.

Разработанный метод конструктивно-функциональной поддержки этапа конструкторского проектирования в САД-системе реализует:

- ▶ Отображение конструкторской структуры проектируемого изделия в конструкторском дереве построения 3D-модели в САД-системе;
- ▶ Оперирование параметрами СМО, обладающими конструкторским смыслом, посредством отображения КФЭ при построении и редактировании 3D-геометрии;
- ▶ Обеспечение конструктивно-функциональной целостности проектного решения, отображаемого 3D-моделью в виде системы СМЭГ;
- ▶ Повторное использование проектных решений на основе процессной модели проектной деятельности, обеспечивающее сохранение смыслового содержания, исключая выход за рамки, определяющие текущий класс изделий.

**В третьей главе** рассматривается комплекс программных средств, реализующий предлагаемый метод конструктивно-функциональной поддержки проектирования механических узлов радиотехнических изделий в САПР.

Разработана библиотека конструктивно-функциональных элементов, имеющая признаки библиотеки шаблонов и специализированной библиотеки, содержащая в себе процессы построения СМЭГ в виде СМО. Работа с библиотекой КФЭ (создание и модификация элементов) требует от пользователя навыков геометрического 3D-моделирования и знаний предметной области проектируемых изделий, исключая потребность в программировании. На библиотеку конструктивно-функциональных элементов получено свидетельство о государственной регистрации базы данных.

Разработан модуль управления конструкторской структурой изделия в виде надстройки к САПР «Компас-3D», позволяющий отображать и управлять конструктивно-функциональной конфигурацией проектного решения. Применение модуля управления КСИ задает модульный принцип процесса проектирования в САД-системе. В рамках диссертационного исследования разработаны два программных решения, реализующих предлагаемый метод проектирования радиотехнических изделий двух классов: микрополосковых модулей СВЧ и коаксиальных соединителей и переходов соответственно. На оба программных средства получены свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Конструктивно-функциональное представление проектного решения в разработанном комплексе программных средств представлено на рисунке 7.

**В четвертой главе** проводится анализ эффективности практического применения средств конструктивно-функциональной поддержки проектирования в САПР относительно следующих подходов к автоматизации конструкторской деятельности:

- Традиционное параметрическое моделирование (ТПМ),
- Конструирование по базе знаний (КБЗ),
- Компоновочная геометрия (КПГ),
- Функционально-адаптированное проектирование (ФАП),
- Прямое вариационное моделирование (ПВМ).

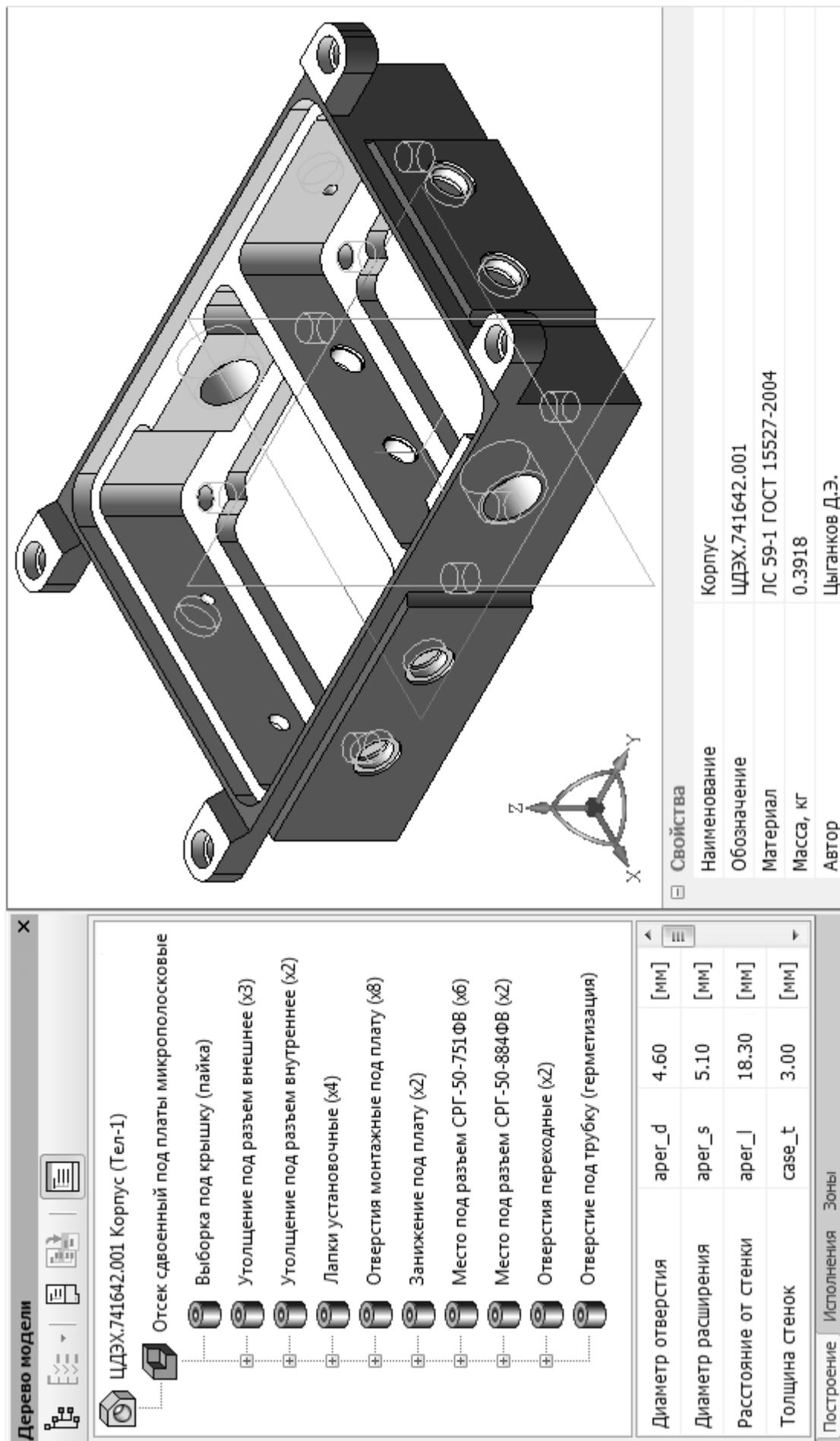
Исследование состояло из двух частей, отличающихся уровнем проектируемых изделий: первая часть посвящена изделиям уровня «*Деталь*», вторая – изделиям уровня «*Сборочная единица*». Каждая часть, в свою очередь, состояла из двух задач: формирование нового и модификация уже сформированного проектного решения.

В решении каждой задачи было проведено от 30 до 60 экспериментов, по полученным данным которых сформированы графики-зависимости эффективности разработанного метода конструктивно-функционального проектирования в САД-системе:

- для изделий уровня «*Деталь*» – зависимость затрачиваемых временных ресурсов от уровня его геометрической сложности – количества геометрических элементов в составе 3D-модели детали;
- для изделий уровня «*Сборочная единица*» – зависимость затрачиваемых временных ресурсов от уровня его структурной сложности – количества компонент в составе сборочной 3D-модели.

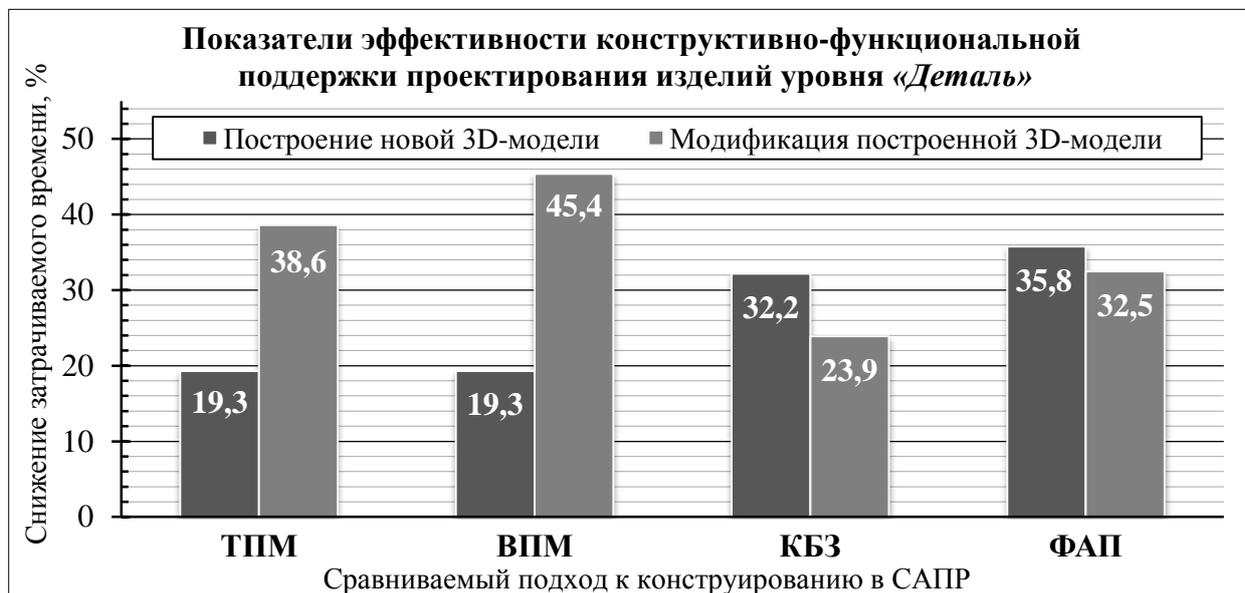
По сформированным графикам-зависимостям сделаны выводы относительно эффективности практического применения конструктивно-функциональной поддержки проектирования в САД-системе:

- ▶ При проектировании изделий уровня «*Деталь*» предлагаемый метод является эффективным только при работе с 3D-моделями, обладающими высоким уровнем геометрической сложности;
- ▶ При проектировании изделий уровня «*Сборочная единица*» предлагаемый метод является эффективным при работе с 3D-моделями любой структурной сложности.



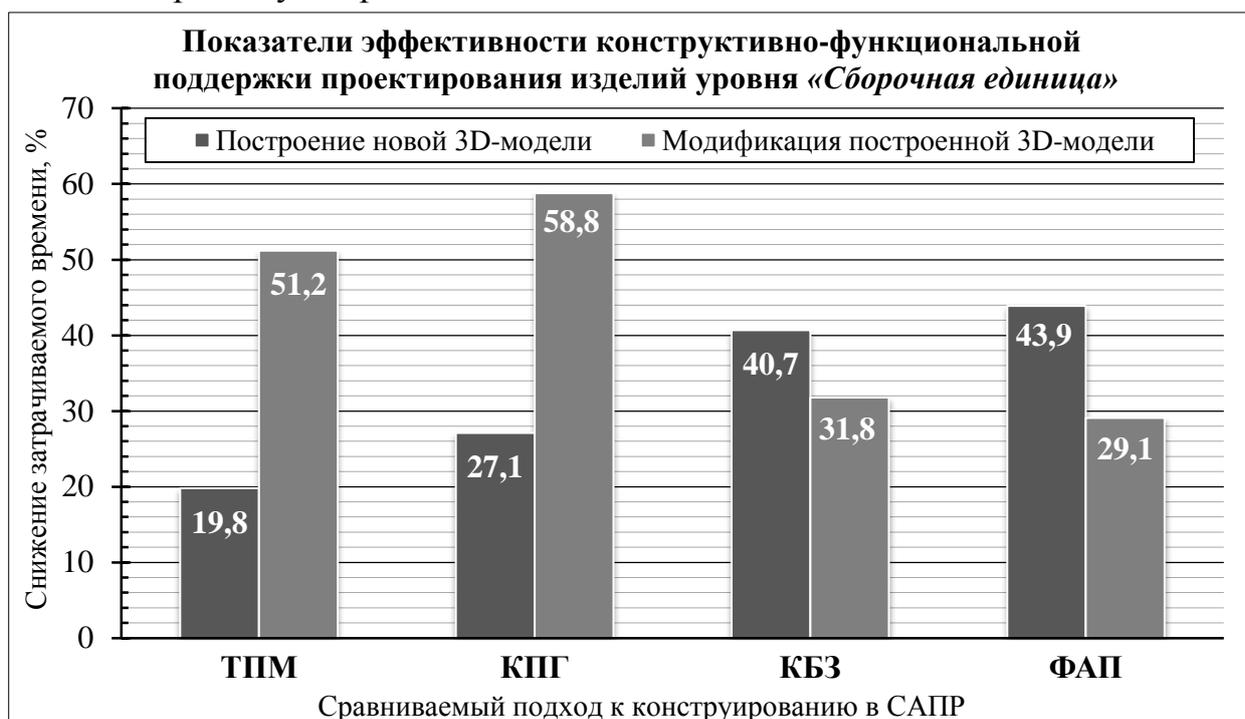
**Рисунок 7** – Представление проектного решения (изделия уровня «Деталь» – корпуса микрораскоскового модуля СВЧ) в виде системы конструктивно-функциональных элементов в разработанном комплексе программных средств

Рассчитаны средние значения показателей эффективности конструктивно-функциональной поддержки проектирования в САД-системе относительно сравниваемых подходов; соответствующие гистограммы представлена на рисунке 8 (для изделий уровня «Деталь») и рисунке 9 (для изделий уровня «Сборочная единица»).



**Рисунок 8** – Эффективность конструктивно-функциональной поддержки проектирования изделий уровня «Деталь» относительно рассматриваемых подходов

С учетом того, что основным подходом, на сегодняшний день наиболее широко используемым на производстве, является именно традиционное параметрическое моделирование, итоговые показатели эффективности предлагаемого метода конструктивно-функциональной поддержки проектирования в полной мере могут определяться относительно этого подхода.



**Рисунок 9** – Эффективность конструктивно-функциональной поддержки проектирования изделий уровня «Сборочная единица» относительно рассматриваемых подходов

Полученные результаты исследования подтверждают практическую ценность конструктивно-функциональной поддержки этапа конструкторского проектирования в САД-системе.

**В заключении** отражены основные полученные результаты; сформулированы выводы по диссертационной работе.

**В приложениях** представлены экранные изображения процесса работы с реализованным комплексом программных средств (в решении различных задач), фрагменты исходного кода разработанных программных средств, акт внедрения результатов диссертационного исследования, свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и базы данных, а также дипломы победителя Всероссийского конкурса «Инженер года».

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

**1.** Выделены данные, задающие смысловое содержание проектного решения, на основе которых предложен новый метод информационного представления проектного решения, отличающийся критерием конструктивно-функциональной целостности, и позволяющий отображать его смысловое содержание в заданной предметной области в рамках электронной 3D-модели;

**2.** Проведен сравнительный анализ подходов к построению редактируемой 3D-модели в САПР в контексте установления параметрических и геометрических ограничений, а также достижения их фиксации и воспроизведения, по результатам которого были выделены ключевые преимущества двух подходов: прямого геометрического моделирования и конструирования по базе знаний, впоследствии учтенные в предлагаемом методе конструктивно-функционального проектирования в САПР.

**3.** Разработан новый метод отображения конструкторской структуры изделия в рамках стандартного инструментария САД-системы, отличающийся биекцией между системой конструктивно-функциональных элементов, составляющих его структуру, и последовательностью семантических макроопераций, участвующих в построения его 3D-модели и отображаемых в дереве ее построения, позволяющий фиксировать и воспроизводить смысловое содержание проектного решения;

**4.** Выбран способ обобщения и унификации проектных решений в САПР по признакам конструктивно-функциональной специфики, заключающийся в комбинации специализированной библиотеки и библиотеки шаблонов, способный обеспечить обобщение проектных решений (и их фрагментов) по критерию смыслового содержания и реализовать модульный принцип процесса проектирования в САПР;

**5.** Впервые представлен метод конструктивно-функциональной поддержки проектирования в САПР, основанный на процессной модели проектной деятельности, обеспечивающий вариативность проектных решений в задачах

формирования новой и модификации сформированной 3D-модели в рамках единого класса, определяемого общей конструктивно-функциональной спецификой, и подразумевающего как структурное, так и геометрическое различие;

6. Разработан комплекс программных средств в виде библиотеки конструктивно-функциональных элементов и модуля управления конструкторской структурой изделия, апробация которого на типовых задачах показала, что он в полной мере реализует предлагаемый метод конструктивно-функциональной поддержки проектирования в САПР; на программные средства – компоненты данного комплекса получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и базы данных;

7. Проведена оценка эффективности метода конструктивно-функциональной поддержки проектирования в САД-системе механических узлов радиотехнических изделий путем сравнения с известными подходами автоматизированного проектирования в САПР, полученные результаты которой позволяют сделать вывод об относительной эффективности – сокращении затрачиваемых временных ресурсов:

- при проектировании изделий уровня «Деталь»:
  - в задачах формирования новой 3D-модели – на **19,3%**;
  - в задачах модификации уже построенной 3D-модели – на **38,6%**;
- при проектировании изделий уровня «Сборочная единица»:
  - в задачах формирования новой сборочной 3D-модели – на **19,8%**;
  - в задачах модификации построенной сборочной 3D-модели – на **51,2%**.

Кроме того, учет возможных конфигураций проектируемого изделия за счет применения модульного принципа и исключение выхода за рамки класса, определяемого конструктивно-функциональной спецификой, нивелирующее необходимость ручной доработки, позволяют сделать вывод о повышении качества проектных решений в задачах формирования вновь и их повторного использования.

**Цель диссертационной работы**, заключаемая в повышении качества проектных решений и снижении затрачиваемых на их формирование временных ресурсов за счет включения средств конструктивно-функциональной поддержки в процессы проектирования механических узлов радиотехнических изделий, – достигнута.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ:*

1. Похилько, А.Ф. Проектирование составных радиотехнических устройств на основе информационно-логических связей компонент / А.Ф. Похилько, Д.Э. Цыганков // Радиотехника. – 2014. – № 7. – С. 130-132.

2. Цыганков, Д.Э. Представление процесса проектирования на базе обобщения элементарных операций до уровня семантических единиц / Д.Э. Цыганков, А.Ф. Похилько // Автоматизация процессов управления. – 2015. – № 3 (41). – С. 81-88.

3. *Похилько, А.Ф.* Процессная модель построения 3D-образа сборочной единицы на основе структурно-семантического объединения проектных процедур / *А.Ф. Похилько, Д.Э. Цыганков* // Радиотехника. – 2016. – № 9. – С. 84-87.

4. *Похилько, А.Ф.* Отображение функциональной структуры проектируемого изделия в дереве построения его 3D-модели / *А.Ф. Похилько, Д.Э. Цыганков* // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2017. – Т. 19, № 1 (2). – С. 424-427.

5. *Цыганков, Д.Э.* Технология структурно-семантического 3D-моделирования в комплексном процессе конструирования / *Д.Э. Цыганков* // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». – 2017. – № 4. – С. 91-97.

6. *Цыганков, Д.Э.* Структурно-семантическое представление конструкторских решений в САПР / *Д.Э. Цыганков, А.Ф. Похилько* // Радиотехника. – 2018. – № 6. – С. 80-83.

#### **Публикации в зарубежных изданиях, индексируемых в Scopus:**

7. *Tsygankov D., Pokhilko A., Sidorichev A. et al.* The Design Process Structural & Logical Representation in the Concurrent Engineering Infocommunication Environment, Transdisciplinary Lifecycle Analysis of Systems – Proceedings of the 22<sup>nd</sup> ISPE International Conference on Concurrent Engineering, IOS Press, Amsterdam, 2015, pp. 595-602.

8. *Tsygankov D., Pokhilko A., Sidorichev A., Ryabov S.* The Design Process Data Representation Based on Semantic Features Generalization, Transdisciplinary Engineering: Crossing Boundaries – Proceedings of the 23<sup>rd</sup> ISPE International Conference on Transdisciplinary Engineering, IOS Press, Amsterdam, 2016, pp. 127-132.

9. *Tsygankov D., Pokhilko A., Gorbachev I.* CAD-system Basic Operations Semantic Generalization to the Designed Product Construction Conformity, Transdisciplinary Engineering: A Paradigm Shift: Proceedings of the 24<sup>th</sup> ISPE International Conference on Transdisciplinary Engineering, IOS Press, Amsterdam, 2017, pp. 603-610.

10. *Tsygankov D., Pokhilko A., Gorbachev I.,* The Designed Product Construction Information Semantic Representation in a CAD-System, Transdisciplinary Engineering Methods for Social Innovation of Industry 4.0 – Proceedings of the 25<sup>th</sup> ISPE International Conference on Transdisciplinary Engineering, IOS Press, Amsterdam, 2018, pp. 1092-1101.

#### **Публикации в зарубежных изданиях, индексируемых в Web of Science:**

11. *Tsygankov D., Pokhilko A.* The Product Design Information Imaging at the Construction Stage in 3D-model Creation Tree, Procedia Manufacturing, Vol. 11, 2017, pp. 2069-2076.

#### **Публикации в иных изданиях:**

12. *Цыганков, Д.Э.* Представление класса радиотехнических устройств в виде системы структурно и логически связанных проектных процедур / *Д.Э.*

*Цыганков, И.В. Горбачев, А.Ф. Похилько* // Современные проблемы радиоэлектроники: сборник научных трудов / науч. ред. С.П. Панько. – Красноярск : СФУ, 2014. – С. 478-483.

**13.** *Похилько, А.Ф.* Автоматизация построения классов сборочных моделей технических объектов / *А.Ф. Похилько, Д.Э. Цыганков* // Труды Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «IS&IT'14». – Москва : Физматлит, 2014. – Т. 2. – С. 76-77.

**14.** *Цыганков, Д.Э.* Обобщенная модель формализации процесса проектирования класса технических объектов / *Д.Э. Цыганков, А.Ф. Похилько* // Информационные системы и технологии (ИСТ-2015): материалы XXI Международной научно-технической конференции. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2015 – С. 186.

**15.** *Цыганков, Д.Э.* Экспортирование проектных операций из библиотек Open CASCADE Technology / *Д.Э. Цыганков, А.Ф. Похилько* // Информатика и вычислительная техника : сборник научных трудов VII Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, студентов и молодых ученых ИВТ-2015 / под ред. В.Н. Негоды. – Ульяновск : УлГТУ, 2015. – С. 556-558.

**16.** *Цыганков, Д.Э.* Структурно-семантическое представление проектных процедур в проектировании радиоэлектронных устройств / *Д.Э. Цыганков, А.С. Ванютин* // Расплетинские чтения – 2016 : аннотированный сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции / под ред. Н.Э. Ненартовича. – М. : ПАО «НПО «Алмаз», 2016. – С. 106.

**17.** *Цыганков, Д.Э.* Декомпозиция электронной модели изделия до уровня структурно-функциональных элементов / *Д.Э. Цыганков, А.Ф. Похилько* // Информатика, моделирование, автоматизация проектирования (ИМАП-2016) : сборник научных трудов / под ред. А.Н. Афанасьева. – Ульяновск: УлГТУ, 2016. – С. 225-228.

**18.** *Цыганков, Д.Э.* Представление проектируемого изделия системой структурно-функциональных элементов / *Д.Э. Цыганков, А.Ф. Похилько* // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем : сборник научных трудов. – Ульяновск: УлГТУ, 2016. – С. 250-252.

**19.** *Цыганков, Д.Э.* Повышение информативности 3D-модели изделия на основе конструктивно-функционального представления дерева построения в САД-системе [Электрон. ресурс] / *Д.Э. Цыганков* // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2017. – Т. 39. – С. 1646-1650. – URL: <http://e-koncept.ru/2017//970656.htm>.

**20.** *Похилько, А.Ф.* Воспроизведение конструкторской структуры изделия по дереву построения его 3D-модели / *А.Ф. Похилько, Д.Э. Цыганков* // Нечеткие системы и мягкие вычисления. Промышленные применения : сборник научных трудов IV Всероссийской научно-практической мультikonференции с междунар. участием «Прикладные информационные системы (ПИС-2017)» / отв. за вып. И.А. Тимина. – Ульяновск : УлГТУ, 2017. – С. 42-46.

**21.** *Цыганков, Д.Э.* Формирование структуры изделия на базе смысловых макроопераций в САД-системе / *Д.Э. Цыганков, А.Ф. Похилько* // Информа-

тика и вычислительная техника (ИВТ-2017) : сборник научных трудов IX Всероссийской научно-технической конференция аспирантов, студентов и молодых ученых / под ред. *В.Н. Негоды*. – Ульяновск : УлГТУ, 2017. – С. 221-224.

**22.** *Похилько, А.Ф.* Семантическое представление 3D-модели изделия на этапе конструирования в САД-системе / *А.Ф. Похилько, Д.Э. Цыганков* // Труды конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «IS&IT'17». – Т. 1. – Таганрог : Издательство Ступина С.А., 2017. – С. 166-172.

**23.** *Tsygankov, D.* Designed Product 3D-model Semantic Representation in a CAD / *D. Tsygankov, A. Pokhilko* // Interactive Systems : Problems of Human - Computer Interaction. – Collection of scientific papers. – Ulyanovsk : USTU, 2017. – pp. 255-259.

**24.** *Цыганков, Д.Э.* Отображение конструктивно-функциональной структуры изделия в САД-системе / *Д.Э. Цыганков, А.Ф. Похилько* // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем : сборник научных трудов X Юбилейной Всероссийской научно-практической конференции (с участием стран СНГ), посвященной 60-летию УлГТУ. – Ульяновск : УлГТУ, 2017. – С. 173-175.

**25.** *Цыганков, Д.Э.* Конструкторское построение 3D-модели изделия в САД-системе / *Д.Э. Цыганков, А.Ф. Похилько* // Информатика, моделирование, автоматизация проектирования (ИМАП-2017) : сборник научных трудов IX Всероссийской школы-семинара аспирантов, студентов и молодых ученых / под ред. *А.Н. Афанасьева*. – Ульяновск : УлГТУ, 2017. – С. 177-181.

**26.** *Похилько, А.Ф.* Повышение информативности 3D-модели на основе структурно-семантического представления / *А.Ф. Похилько, Д.Э. Цыганков* // Нечеткие системы и мягкие вычисления. Промышленные применения (FTI-2017) : сборник научных трудов Первой Всероссийской научно-практической конференции. – Ульяновск : УлГТУ, 2017. – С. 90-96.

**27.** *Цыганков, Д.Э.* Концепция конструктивно-функционального элемента при отображении структуры изделия в дереве построения 3D-модели / *Д.Э. Цыганков, А.Ф. Похилько* // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения : материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC – 2017» / под ред. *А.С. Сигова*. – Москва : МИРЭА, 2017. – С. 867-869.

**28.** *Цыганков, Д.Э.* Технология прямого семантического 3D-моделирования в комплексном процессе конструирования / *Д.Э. Цыганков* // Математическое моделирование, инженерные расчеты и программное обеспечение для решения задач воздушно-космической обороны : сборник тезисов докладов научно-технической конференции. – Москва : НОЦ ВКО «Алмаз-Антей» им. академика В.П. Ефремова, 2017. – С. 96-97.

**29.** *Цыганков, Д.Э.* Отображение конструкторской структуры проектируемого изделия в дереве построения его 3D-модели / *Д.Э. Цыганков, А.Ф. Похилько* // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники : материалы 20-й Всероссийской научной школы-семинара. – Ульяновск : УлГТУ, 2017. – С. 90-91.

**30.** *Цыганков, Д.Э.* Интеграция 3D-модели с информацией о конструкторской структуре проектируемого изделия / *Д.Э. Цыганков, А.Ф. Похилько* // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2018) : труды Международной научно-технической конференции / под ред. *С.А. Прохорова*. – Самара : Издательство Самарского научного центра РАН, 2018. – С. 1151-1154.

***Свидетельства о государственной регистрации объектов интеллектуальной собственности:***

**31.** Свидетельство №2018611065 Российская Федерация. Система конструкторского проектирования соединителей радиочастотных коаксиальных : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / *Д.Э. Цыганков, А.Ф. Похилько* ; заявитель и правообладатель Ульянов. гос. техн. ун-т. – № 2017662499 ; заявл. 01.12.2017 ; зарегистр. 23.01.2018 ; опублик. 23.01.2018, Бюл. № 2. – 1 с.

**32.** Свидетельство №2018613882 Российская Федерация. Модуль семантического конструирования микрополосковых СВЧ устройств : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / *Д.Э. Цыганков, А.Ф. Похилько* ; заявитель и правообладатель Ульянов. гос. техн. ун-т. – № 2018611257 ; заявл. 09.02.2018 ; зарегистр. 26.03.2018 ; опублик. 26.03.2018, Бюл. № 4. – 1 с.

**33.** Свидетельство №2018620481 Российская Федерация. Библиотека семантически обобщаемых базовых операций САД-системы : свидетельство о государственной регистрации базы данных / *Д.Э. Цыганков, К.А. Федорова, А.Ф. Похилько* ; заявитель и правообладатель Ульянов. гос. техн. ун-т. – № 2018620157 ; заявл. 09.02.2018 ; зарегистр. 26.03.2018 ; опублик. 26.03.2018, Бюл. № 4. – 1 с.

## **СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

БО – базовая операция САД-системы;  
КБЗ – конструирование по базе знаний;  
КД – конструкторская документация;  
КПГ – компоновочная геометрия;  
КСИ – конструкторская структура изделия;  
КФЭ – конструктивно-функциональный элемент;  
КЭГ – конструктивный элемент геометрии;  
МК – маршрут конструирования;  
ПВМ – прямое вариационное моделирование;  
СМО – семантическая макрооперация;  
СМЭГ – семантический макроэлемент геометрии;  
ТПМ – традиционное параметрическое моделирование;  
ФАП – функционально-адаптированное проектирование;  
ФСИ – функциональная структура изделия.

Цыганков Денис Эдуардович

Методы и средства конструктивно-функционального проектирования  
механических узлов радиотехнических изделий на основе  
процессной модели проектной деятельности

Автореферат

Подписано в печать 15.10.18. Формат 60x84/16

Усл. печ. л. 1,39

Тираж 100 экз. Заказ 795

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