МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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)

Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент, **Похилько Александр Федорович**

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
Глава 1 Обзор методов и средств автоматизации и интеллектуализации	
конструкторского проектирования	. 18
1.1 Этап конструкторского проектирования в жизненном цикле изделия	
и его автоматизация	. 18
1.1.1 Изделие как объект производства: основные термины	. 18
1.1.2 Механические узлы радиотехнических изделий	. 19
1.1.3 Проектирование и конструирование в составе ЖЦИ	. 20
1.1.4 Автоматизация конструкторской деятельности. CAD-системы	. 22
1.2 Системное представление проектируемого изделия	. 23
1.2.1 Функциональная структура изделия	. 23
1.2.2 Конструкторская структура изделия	26
1.2.3 Взаимосвязь функциональной и конструкторской структур.	
Конструкция изделия	. 29
1.3 Электронная геометрическая модель изделия. 3D-модель	. 31
1.3.1 Определение и состав электронной геометрической модели	. 31
1.3.2 Представление проектируемого изделия 3D-моделью	. 32
1.3.3 Формирование и представление 3D-модели в CAD-системах.	
Понятие конструктивного элемента геометрии	. 33
1.3.4 Системное описание структуры 3D-модели в CAD-системе	35
1.4 Базовая операция – основное проектное действие в САД-системе	38
1.4.1 Понятие базовой операции CAD-системы	38
1.4.2 Процессная модель базовой операции	39
1.5 Отображение конструкции проектируемого изделия 3D-моделью	. 44
1.5.1 Информативность 3D-модели	. 45
1.5.2 Принцип объектно-ориентированного соответствия	. 45
1.5.3 Принцип геометрического соответствия	. 47
1.5.4 Принцип технологического соответствия	. 49

1.5.5 Анализ рассмотренных принципов	. 50
1.6 Подходы к построению модифицируемой 3D-модели изделия	. 52
1.6.1 Традиционный подход к модификации	. 53
1.6.2 Технология параметризации в задачах модификации	. 53
1.6.3 Технология функционально адаптивного представления	. 55
1.6.4 Компоновочная геометрия	. 56
1.6.5 Конструирование по базе знаний	. 57
1.6.6 Технологии прямого моделирования	. 58
1.6.7 Синхронная технология и ее аналоги	. 59
1.6.8 Сравнительный анализ рассмотренных технологий	. 60
1.7 Унификация конструкторских решений в САД-системах	. 64
1.7.1 Способы обобщения конструкторских решений	. 65
1.7.2 Сравнительный анализ рассмотренных способов	. 66
1.8 Выводы и рекомендации по Главе 1	. 68
Глава 2 Методы конструктивно-функциональной поддержки этапа	
конструкторского проектирования	. 70
2.1 Отображение конструкторской структуры изделия в дереве	
построения 3D-модели в CAD-системе	. 70
2.1.1 Принцип структурного соответствия	. 70
2.1.2 Семантический макроэлемент геометрии: критерии и состав	. 72
2.2 Концепция конструктивно-функционального элемента изделия	. 74
2.2.1 Конструктивно-функциональный элемент: определение и	
критерии	. 75
2.2.2 Конструкторская структура изделия как система КФЭ	. 76
2.2.3 Разновидности конструктивно-функциональных элементов	. 78
2.3 Семантическая макрооперация как проектное действие в САД-	
системе с конструкторским смыслом	. 81
2.3.1 Определение и свойства семантической макрооперации	. 81
2.3.2 Алгоритм семантической макрооперации. Понятие	
конструкторского маршрута	. 83

2.3.3 Процессная модель семантической макрооперации	85
2.4 Конструкторское дерево построения 3D-модели	91
2.4.1 Статическое описание конструкторской 3D-модели	91
2.4.2 Динамическое описание конструкторской 3D-модели	93
2.4.3 Взаимосвязь статического и динамического описаний	
3D-модели	94
2.4.4 Задание конструктивной концепции	96
2.4.5 Отображение конструкторской структуры изделия	99
2.4.6 Обобщенное дерево конструирования	. 103
2.5 Выводы и рекомендации по Главе 2	. 109
Глава 3 Программные средства реализации методов конструктивно-	
функциональной поддержки этапа конструкторского проектирования	. 111
3.1 Разработка библиотеки конструктивно-функциональных элементов	. 113
3.1.1 Основные сведения о БКФЭ	. 113
3.1.2 Представление семантической макрооперации в БКФЭ	. 115
3.1.3 Структура и состав БКФЭ	. 117
3.1.4 Порядок работы с БКФЭ	. 122
3.2 Разработка модуля управления конструкторской структурой изделия	. 127
3.2.1 Представление конструкторской структуры изделия в МУКСИ.	. 127
3.2.2 Структура МУКСИ и состав отображаемой информации	. 129
3.2.3 Функционал, предоставляемый МУКСИ	. 131
3.2.4 Порядок работы с МУКСИ	. 132
3.3 Конструктивно-функциональное проектирование в САПР с	
использованием МУКСИ и БКФЭ	. 139
3.3.1 Проектирование изделий уровня «Деталь»	. 139
3.3.2 Проектирование изделий уровня «Сборочная единица»	. 142
3.4 Выводы и рекомендации по Главе 3	. 146
Глава 4 Оценка эффективности конструктивно-функциональной поддержки	
этапа конструкторского проектирования	. 147
4.1 Конструкторское проектирование изделий уровня «Деталь»	. 147

4.1.1 Исходные данные к экспериментам	. 148
4.1.2 Формирование новой 3D-модели	. 149
4.1.3 Модификация сформированной 3D-модели	. 151
4.2 Конструкторское проектирование изделий уровня	
«Сборочная единица»	. 155
4.2.1 Исходные данные к экспериментам	. 155
4.2.2 Формирование новой сборочной 3D-модели	. 157
4.2.3 Модификация сформированной сборочной 3D-модели	. 159
4.3 Анализ результатов исследования	. 163
4.3.1 Эффективность конструкторского проектирования изделий	
уровня «Деталь»	. 164
4.3.2 Эффективность конструкторского проектирования изделий	
уровня «Сборочная единица»	. 168
4.3.3 Итоговая оценка эффективности	. 172
4.4 Выводы и рекомендации по Главе 4	. 174
Заключение	. 175
Список сокращений и условных обозначений	. 177
Список используемой литературы	. 179
Приложение А Формирование проектного решения с использованием	
комплекса программных средств	. 209
Приложение Б Отображение проектного решения с использованием	
комплекса программных средств	. 219
Приложение В Модификация проектного решения с использованием	
комплекса программных средств	. 225
Приложение Г Фрагменты исходного комплекса программных средств	. 229
Приложение Д Акт внедрения результатов диссертационного исследования	. 243
Приложение Е Свидетельства о государственной регистрации программ для	
ЭВМ и базы данных	. 244
Приложение Ж Дипломы лауреата Всероссийского конкурса	
«Инженер года»	. 247

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня, в преддверии 4-й промышленной революции (англ. Industry 4.0) информационные технологии, пронизывая практически все сферы производственной деятельности современных предприятий [169], играют ключевую роль в развитии промышленного комплекса, в том числе и оборонного [17, 54, 100], что определяет необходимость проработки стратегий их развития как федеральном [192], так и на региональном [37] уровнях.

Без применения новейших информационных технологий в нынешних реалиях невозможно обеспечить конкурентоспособность изготавливаемой и выпускаемой продукции [42, 123], определяющей темпы ее реализации [74] и вносящей свой вклад в конкурентоспособность всего предприятия [44, 196].

Применительно к предприятиям машиностроительной отрасли основные характеристики продукции формируются на стадии ее разработки, т.е. качество изделия как основной компонент его конкурентоспособности [77] определяется решениями, принимаемыми в процессе проектирования [90], повышение эффективности которого достигается путем применения систем автоматизированного проектирования (САПР) [26]. Одним из этапов процесса проектирования является конструкторское проектирование, на выходе которого формируется проектное решение—экземпляр материализации принципиальных схем, обеспечивающих требуемую функциональность [174]. САПР, предназначенными для решения задач конструкторского проектирования, являются *CAD-системы* [26].

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 [79]. При этом именно в творческих операциях сконцентрирована инженерная деятельность — разработка конструкторского решения, удовлетворяющего техническому заданию по различным показателям функциональности, надежности, технологичности, эргономичности, эстетичности и другим критериям.

Проектное решение описывается комплектом конструкторской документации (КД) [174], тенденция перехода которой от 2D-чертежей на бумажных носителях к электронным 3D-моделям ярко выражена в настоящее время [91] и уже задала основное направление дальнейшего развития САПР [155].

3D-модели, отображая геометрическую и структурную информацию [123,226] о проектном решении (уровня «Деталь» и «Сборочная единица» соответственно), хранят в себе способ ее формирования, называемый термином «Дерево построения» [47]. 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 фиксируется конструктивная концепция [113], представляющая собой данные (ограничения), ассоциированные с геометрической моделью, регламентирующие процесс модифицирования последней после ее создания.

Каждый компонент механических узлов 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 САD-системах ограничениями в виде параметрических или геометрических зависимостей.

В современных САПР модификация 3D-геометрии реализуется двумя принципиально различающимися подходами: параметрическим моделированием на основе дерева построения и прямым геометрическим моделированием [199, 208]. 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 [207]. Как следствие, в процессе модификации проектного решения не могут быть учтены все его возможные конфигурации, соответствующие его смысловому содержанию (задаваемые одновре-

менно геометрическими и параметрическими ограничениями) [218]. 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., Евгенев Г.Б., Соснин П.И., Лячек Ю.Т., Кучуганов В.Н., Боргест Н.М., Ямникова О.А.* и др. Работу с САD-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 *Лихачев М.В.* Повышением эффективности процесса проектирования в контексте применения САD-систем занимаются зарубежные ученые *Stjepandić J., Helm R., Cunningham J.J., Skarka W., Bondar S., Chang K., Hamilton P., Pratt M.J.* и др.

Возрастающая роль 3D-моделей в условиях современного производства, обуславливаемая удобством и эффективностью воплощения и визуализации проектных решений, снижением временных затрат на подготовку КД, а также интеграцией с другими программными средствами в комплексном процессе проектирования [1], 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 (конструктивнофункциональным) 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.

Цель работы

Целью диссертационной работы является повышение 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.

Поставленная цель достигается выполнением следующих задач:

- 1. Выделение данных, задающих смысловое содержание проектного решения (его информационное описание в контексте конструктивного исполнения и функционального назначения), и их отображение в рамках электронной 3D-модели;
- **2.** Анализ известных подходов к построению редактируемой 3D-модели в САПР 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 рамках стандартного инструментария САПР;
- **4.** Выбор способа обобщения и унификации проектных решений в САПР по признакам их конструктивно-функциональной специфики;
- **5.** Формирование метода поддержки проектирования в CAD-системе, обеспечивающего модификацию проектных решений в рамках единого класса, определяемого общей конструктивно-функциональной спецификой, и подразумевающего как структурное, так и геометрическое различие;
- **6.** Разработка комплекса программных средств, реализующего предлагаемый метод конструктивно-функциональной поддержки проектирования в САПР и его апробация на типовых задачах проектирования узлов радиотехнических устройств;
- 7. Оценка эффективности практического применения метода конструктивнофункциональной поддержки проектирования в САПР.

Объект исследования

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

Предмет исследования

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

Методы исследования

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

Основания для выполнения

Основанием для выполнения диссертационной работы является участие диссертанта в различных 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

Научная новизна результатов диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Предложен новый метод системного представления проектных решений в САПР в соответствии с модульным принципом, отличающийся критерием конструктивно-функциональной целостности, заключающемся в представлении из-

делия 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 САD-системы, отличающаяся системой геометрических и математических зависимостей (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 дереве построения 3D-модели, отличающийся биекцией между конструктивнофункциональными 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 как геометрически, так и структурно, но при этом обобщенных по их смысловому содержанию.

Практическая ценность

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 в структуре), возникающих в процессах модификации и повторного использования конструкторских решений;
- Возможность накопления и унификации проектных решений как на уровне деталей и узлов, так и их конструктивно-функциональных элементов для повторного использования;
- Исключение выхода за рамки 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 механический завод».

Основные положения, выносимые на защиту:

- **1.** Представление проектных решений в САПР в виде иерархической системы конструктивно-функциональных элементов обеспечивает фиксацию, отображение и воспроизведение его смыслового содержания в заданной предметной области;
- 2. Процессная модель проектной деятельности в виде 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 полученных результатов

Достоверность научных положений и выводов обусловлена адекватностью и непротиворечивостью применяемых моделей и методов и подтверждена экспери-

ментальными данными, полученными в ходе испытаний разработанного комплекса программных средств, а также практическим использованием материалов диссертационной работы в соответствии с актами внедрения. 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 (Приложение E).

Основные 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, а также оформления на них конструкторской документации. Результаты используются в проектной деятельности в масштабах предприятия.
- в учебный процесс кафедры «Прикладная математика и информатика» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» в виде методов разработки и адаптации систем автоматизации проектирования.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на **37** конференциях, среди которых:

- о 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.;

- ∘ 22nd ISPE International Conference on Concurrent Engineering (CE2015), Ни-дерланды, г. Делфт, 2015 г.;
- о Международный конгресс по интеллектуальным системам и информационным технологиям «IS & IT 15», пос. Дивноморское, 2015 г.;
- о 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.;
- \circ 23rd ISPE International Conference on Transdisciplinary Engineering (TE2016), Бразилия, г. Куритиба, 2016 г.;
 - о 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.;
- XIX Всероссийская научно-практическая конференция *«Актуальные про- блемы машиностроения»*, г. Самара, 2017 г.;
- о Международная научно-техническая конференция *«Фундаментальные про- блемы радиоэлектронного приборостроения (Intermatic-2016)»* г. Москва, 2016 г.;
- о IV Всероссийская научно-практическая конференция «Прикладные информационные системы (ПИС-2017)», г. Ульяновск, 2017 г.;
- 0 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2017), Италия, г. Модена, 2017 г.;
- 0 24th ISPE International Conference on Transdisciplinary Engineering (ТЕ2017), Сингапур, г. Наньян, 2017 г.;
- X Юбилейная Всероссийская научно-практическая конференция (с участием стран СНГ) «Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем», г. Ульяновск, 2017 г.;

- XII International conference «Interactive Systems: Problems of Human Computer Interaction», г. Ульяновск, 2017 г.;
- о 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 воздушно-космической обороны», 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 автора 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 каждого конкурса диссертант был награжден дипломом лауреата (Приложение Ж) 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, а также 4 публикации, индексируемые в базе Scopus, и 1 публикация, индексируемая в базе Web of Science.

Печатные работы включают 33 статьи, 2 тезиса докладов, а также 2 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ и 1 свидетельство о государственной регистрации базы данных.

Личный вклад

Все научные результаты, представленные в диссертационной работе и сформулированные в положениях, выносимых на защиту, получены автором лично. Научному руководителю принадлежит формулировка решаемой проблемы и постановка цели исследования. Ряд публикаций подготовлен совместно с соавторами, при этом вклад диссертанта был определяющим.

Структура и объем диссертационной работы

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

Содержание диссертационной работы по главам

Во введении представлена основная информация о диссертационной работе. Обоснована актуальность темы. Обозначены цель и задачи работы, определены теоретическая значимость и практическая ценность исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрена специфика процесса конструкторского проектирования в жизненном цикле изделия, даны определения основным терминам, используемым в работе. Произведен сравнительный анализ методов информационного представления проектных решений и способов их формирования в современных САПР, по результатам которого выделены ключевые преимущества, впоследствии обобщенные в виде требований, предъявляемых к рекомендуемому методу представления проектных решений в САПР, обеспечивающему сохранение их конструктивно-функциональной целостности.

Во второй главе представлен процесс разработки методов конструктивнофункциональной поддержки проектирования в САПР, обеспечивающих сохранение конструктивно-функциональной целостности проектных решений. Введено понятие семантического макроэлемента геометрии, выделены его критерии и свойства. Введено понятие конструктивно-функционального элемента изделия, задана иерархия его типов. Описана процессная модель семантической макрооперации. Представлен метод структурного соответствия между изделием и его 3D-образом и метод представления конструкторской структуры изделия как системы конструктивно-функциональных элементов. Разработана процессная модель проектной деятельности в виде обобщенного дерева конструирования — структуры, описывающей класс проектных решений, отличающихся геометрически и структурно, но обобщенных по их смысловому содержанию. Произведена проверка соответствия сформированных методов требованиям, выделенным в первой главе.

В третьей главе рассмотрен процесс разработки комплекса программных средств – модуля управления конструкторской структурой изделия и библиотекой конструктивно-функциональных элементов, совместно реализующих методы конструктивно-функциональной поддержки проектной деятельности в САПР. Описан порядок работы с реализованными программными средствами в процессах конструкторской деятельности в САD-системе с различными деталями и узлами из состава радиотехнических изделий.

В четвертой главе экспериментально исследована эффективность предлагаемого метода конструктивно-функциональной поддержки проектной деятельности в САПР в решении различных инженерных задач относительно известных подходов. Приведены количественные показатели эффективности данного метода и сформулированы рекомендации ее практического применения.

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

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

ГЛАВА 1 ОБЗОР МЕТОДОВ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ КОНСТРУКТОРСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Непрекращающееся развитие информационных технологий и, как следствие, увеличение их роли в производственной деятельности предприятия определяют САD-системы в качестве обязательного инструмента инженера, твердо занимающего место на этапе проектирования [137], а электронные 3D-модели — заменой традиционной конструкторской документации на твердых копиях [100, 122].

В САD-системах выполняется наиболее творческая работа инженеров – конструкторское проектирование. В настоящей Главе производится обзор методов и средств конструкторского проектирования на современном уровне развития САD-систем с выделением их преимуществ и недостатков для последующего анализа.

Начинается Глава с основных сведений и определений об этапе конструкторского проектирования, его автоматизации и места в жизненном цикле изделия.

1.1 Этап конструкторского проектирования в жизненном цикле изделия и его автоматизация

Любое современное техническое устройство представляет собой результат комплексного знания, в связи с чем его разработка — это сложный и многоэтапный процесс [49, 132, 221, 228]. В рамках настоящего исследования под разработкой изделия понимается, прежде всего, процесс его проектирования, основные этапы которого рассматриваются в текущем разделе.

1.1.1 Изделие как объект производства: основные термины

Важнейшие термины определяются стандартами ГОСТ Р 56136-2014 [66], ГОСТ 2.101-2016 [57] и рекомендацией по стандартизации Р 50.1.031-2001 [165]:

Изделие – это любой предмет производства (или их набор), подлежащий изготовлению на предприятии (деталь, сборочная единица и др.) [57]. Изделие явля-

ется результатом производственного процесса [22, 96]. Состав и устройство изделия определяется конструкторской документацией [58].

Жизненный цикл изделия (ЖЦИ, ЖЦ) — совокупность явлений и процессов, повторяющаяся с периодичностью, определяемой временем существования типовой конструкции (экземпляра) изделия: от ее замысла до утилизации [66].

Стадия жизненного цикла — часть ЖЦИ, выделяемая по признакам характерных для нее явлений, процессов и конечных результатов [66].

Этап жизненного цикла — часть стадии ЖЦИ, выделяемая по признакам моментов контроля, в которых проверяются характеристики проектных решений типовой конструкции и (или) характеристики экземпляров изделий [66].

Деталь — неспецифицированное изделие, изготовленное из однородного материала, без применения сборочных операций [57]. Может быть компонентом изделия, входя в его состав непосредственно или через сборочную единицу [165].

Сборочная единица — специфицированное изделие, составные части которого подлежат соединению между собой сборочными операциями [57]. Детали и сборочные единицы часто обозначаются аббревиатурой «ДСЕ». В рекомендации [165] сборочная единица является обобщением терминов «Узел» и «Подузел».

Узел – часть изделия, состоящая из нескольких деталей и/или сборочных единиц, выполняющая в изделии самостоятельную функцию [165].

Подузел — часть узла, состоящая из нескольких деталей и/или сборочных единиц, не выполняющая самостоятельной функции [165].

Изделие финальное – изделие, не нуждающееся в дальнейшей переработке, предназначенное для применения по назначению и состоящее из конструктивно, функционально и информационно связанных составных частей [66, 165].

Составная часть (СЧ) — самостоятельная часть изделия, предназначенная для выполнения определенных технических функций в его составе [66].

1.1.2 Механические узлы радиотехнических изделий

Объектом исследования в настоящей диссертационной работе являются механические узлы радиотехнических изделий, основное отличие которых заключается в тесной взаимосвязи конструкции (учитывающей электромагнитные параметры) и функциональных характеристик, а также их описание преимущественно одной узкой предметной областью.

В настоящем исследовании рассматриваются механические узлы и входящие в их состав детали, относящиеся к следующим предметным областям:

- ◆ Устройства (модули) СВЧ микрополосковые;
- ◆ Соединители (переходы) радиочастотные коаксиальные.

Далее по тексту диссертационной работы в качестве примеров используются детали и узлы указанных предметных областей.

Основными регламентирующими нормативными документами для выделенных изделий: микрополосковых СВЧ устройств и коаксиальных соединителей и переходов являются ГОСТ 23221-78 [63] и ГОСТ 20265-83 [62] соответственно.

1.1.3 Проектирование и конструирование в составе ЖЦИ

Одной из основных стадий ЖЦИ традиционно [154] считается *проектирова*ние, под которым в наиболее широком смысле понимается процесс создания, преобразования и представления в установленной форме информационного образа предполагаемого (еще не существующего) объекта или процесса [137].

Проектирование в технике определено в работах [48, 132] как «комплекс мероприятий поиска технических решений (ТР), удовлетворяющих техническому заданию (ТЗ), их оптимизация и реализация в виде комплекта конструкторской документации (КД) и опытного образца, испытываемого на соответствие ТЗ».

Полный цикл проектирования зачастую [48, 132] обозначается аббревиатурой «*HИОКР*» — научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (англ. *Research & Development, R&D*). *HИОКР* — это целый комплекс мероприятий, предшествующий запуску изделия в производство: от научных исследований до производства опытных и мелкосерийных образцов [132].

НИОКР составляют две отдельные стадии ЖЦИ:

◆ *Научно-исследовательские работы* (*НИР*), задача которых – формирование набора исходных данных и определение возможности проведения ОКР, а резуль-

тат — получение информации, необходимой для создания нового изделия [48, 49]. Порядок проведения НИР регламентируется стандартом ГОСТ 15.101-98.

◆ Опытно-конструкторские работы (ОКР) — звено материализации полученных результатов предшествующих НИР, задача которого — формирование комплекта КД на выпускаемое изделие [48, 49]. Этапы ОКР регламентируются стандартом ГОСТ 15.001-88; основные из них структурно представлены на рисунке 1.1.

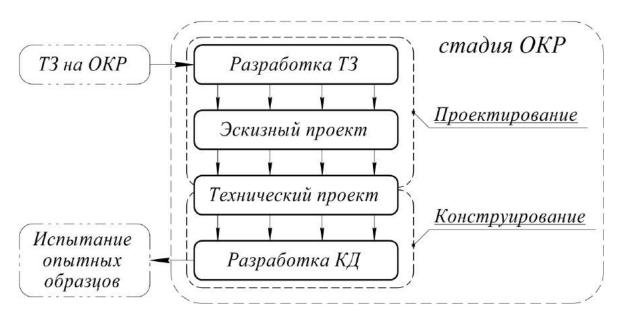


Рисунок 1.1 – Основные этапы опытно-конструкторских работ (ОКР)

Как показано на рисунке 1.1, ОКР можно разделить на два этапа:

- *Проектирование* (эскизное проектирование, ЭП), в ходе которого разрабатываются структурно-функциональные схемы изделия, определяющие его номинальный принцип действия (функциональность) [48, 59]. Данный этап является проектированием в «традиционном» смысле [132].
- **Конструирование** (техническое (конструкторское) проектирование, ТП), в ходе которого выявляются окончательные ТР, определяющие конструкцию изделия экземпляр материализации его структурно-функциональной схемы (полученной на предыдущем этапе), обеспечивающей набор требуемой функциональности [11, 60, 102].

Настоящее исследование посвящено именно *этапу конструирования*, содержащему, в общем случае [79], как *творческие*, так и *рутинные операции*; автоматизация последних из них в нынешних реалиях обязательна на производстве.

1.1.4 Автоматизация конструкторской деятельности. САД-системы

Автоматизация конструирования главной задачей ставит повышение эффективности деятельности инженеров и заключается в применении систем автоматизированного проектирования в качестве основного рабочего инструмента [27].

Наиболее полное определение системы автоматизированного проектирования представлено в стандарте ГОСТ 23501.101-87.

Система автоматизированного проектирования (САПР) — это организационно-техническая система, входящая в структуру проектной организации и осуществляет проектную деятельность при помощи комплекса средств автоматизированного проектирования (КСАП) [64]. Предметом приложения САПР являются этапы ОКР [132], которые были представлены на рисунке 1.1.

Цель САПР – это оптимизация использования труда проектировщиков, конструкторов и других специалистов для повышения эффективности процесса проектирования (сокращение временных затрат и трудоемкости) одновременно с улучшением качества результатов проектной деятельности [84].

Ключевым инструментом, обеспечивающим автоматизацию проектной деятельности, как отмечено в книге [132] и статье [151], являются *CAD-системы* (англ. *Computer-Aided Design*) — системы автоматизации конструкторского проектирования [137, 152], также определяемые в [183] как *«программные средства разработки КД»*. В соответствии с ГОСТ 15971-90 термин *«САD»* является англоязычным эквивалентом термина *«САПР»* [61, 145].

В настоящее время передовыми CAD-системами, наиболее популярными на производстве, являются: *Komnac-3D* (3AO «Аскон»); NX, Solid Edge (Siemens PLM Software); CATIA, SolidWorks (Dassault Systèmes); Creo (PTC); AutoCAD, Inventor (Autodesk); T-FLEX CAD (3AO «Топ Системы») и др. [134, 140, 183].

Основная функция САD-систем — формирование электронных геометрических моделей, которые, как отмечается в книге [121], определяют последующие стадии ЖЦ изделия, а следовательно, САD-системы затрагивают все этапы проектирования (как стадии ЖЦИ) [151]; именно в них формируется структура и конструкция изделия, детально рассматриваемые в следующем разделе.

1.2 Системное представление проектируемого изделия

Профессор Б.М. Базров в книге [16] отмечает, что *«любое машинострои-тельное изделие может рассматриваться как техническая система*, описываемая совокупностью элементов ...». В данном исследовании используется именно такой *«системный метод»* представления изделия как объекта производства.

Наиболее общее понятие *системы* дано в рекомендации по стандартизации [165], а также в ряде работ [40, 70,84,219], согласно которым *система* – это набор объектов и взаимосвязей между ними. Системное представление информативно при описании технических объектов: изделие рассматривается как система, полностью описываясь на стадии ОКР своей структурой [127, 133, 195].

Государственный стандарт Российской Федерации [56] определяет *структу-ру* изделия как *«совокупность составных частей и связей между ними, определяющих входимость составных частей»*; т.е. структура задает его внутреннее строение взаимосвязанным набором *структурных элементов* – системой вида:

$$Cmp(\mathit{U}3\partial) = \{Cmp.\mathcal{P}_i, Ce_{i,j}^{Cmp.\mathfrak{P}}\}, i = \overline{l,n}, j = \overline{l,m},$$
 (1.1)

где $Cmp(U3\partial)$ — структура изделия, $Cmp. \partial_i - i$ -тый структурный элемент, $Ce_{i,j}^{Cmp.9}$ — взаимосвязи между i-м и j-м $Cmp. \partial$.

Определение термина «*Структурный элемент*» зависит от трактовки понятия «*Структура изделия*». Национальный стандарт РФ [65] дифференцирует функциональную и конструкторскую структуры изделия, которым посвящены два последующих подраздела.

1.2.1 Функциональная структура изделия

Данный термин основан на понятии «*функция*», определяемом тем же стандартом [65], как «описание служебного назначения – того, что должно делать изделие (составная часть) при его применении (использовании)».

Пример функциональной структуры изделия, состоящей из восьми ФЭ, представлен на рисунке 1.2.

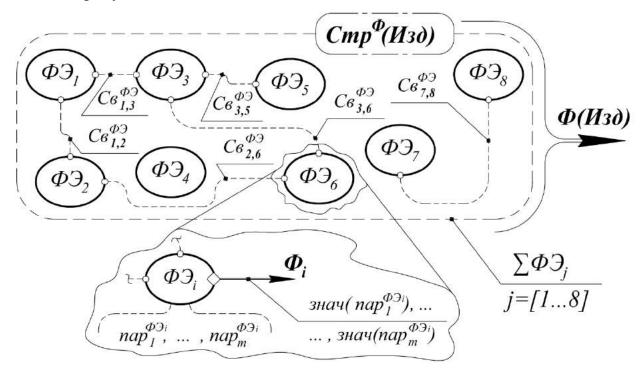


Рисунок 1.2 – Функциональная структура изделия (ФСИ)

На данном рисунке видно, что ФСИ представляет собой <u>систему</u> определенным образом взаимосвязанных ФЭ, являясь частным случаем общей структуры изделия согласно записи (1.1) и, следовательно, описывается следующем образом:

$$Cmp^{\Phi}(U3\partial) = \{\Phi \mathcal{P}_i, Ce_{i,i}^{\Phi \mathcal{P}}\}, i = \overline{I,n}, j = \overline{I,m},$$
 (1.2)

где $Cmp^{\Phi}(Ms\partial)$ — функциональная структура изделия, $\Phi \partial_i - i$ -ый функциональный элемент, определяемый как:

$$\Phi_i: Cmp. \mathcal{P}_i \to \Phi \mathcal{P}_i,$$
 (1.3)

где Φ_i – функция, выполняемая i-ым Cmp. Э в изделии, т.е. $\Phi \ni_i$ – это Cmp. \ni_i , обладающий определенной функциональностью Φ_i в изделии, следовательно, **крите- рием** $\Phi \ni_i$ является, прежде всего, строго заданная Φ_i .

Каждый *i*-ый $\Phi \ni_i \in Cmp^{\Phi}(\mathit{Изd})$ характеризуется собственным набором параметров $(nap_1^{\Phi \ni_i}, ..., nap_m^{\Phi \ni_i}) - \underline{\phi y h \kappa u u o h a napamem p o b}$, качественно и коли-

чественно описывающих его функционал, что видно на рисунке 1.2. Функция Φ_i , выполняемая i-ым Φ Э, определяется значениями данных параметров, т.е.:

$$\Phi \mathcal{P}_i : \sum_{j=1}^m$$
 знач $(nap_j^{\Phi \mathcal{P}_i}) \to \Phi_i$, $i = \overline{I,n}$, (1.4)

где знач $(nap_{j}^{\phi \ni_{i}})$ — значение j-го функционального параметра i-го ФЭ.

Номинальный функционал изделия достигается совместным «вкладом» каждого ФЭ в плане выполняемых им функций согласно выражению (1.3), т.е.:

$$\bigcup_{i=1}^{n} \Phi_{i} \to \Phi(U3\partial), \tag{1.5}$$

где $\Phi(Изд)$ — номинальная функциональность всего изделия, которая с учетом записи (1.4) принимает следующий вид:

$$\bigcup_{i=1}^{n} \left(\sum_{j=1}^{m} знач(nap_{j}^{\Phi \Theta_{i}}) \right) \to \Phi(U \circ \partial). \tag{1.6}$$

Следовательно, ФСИ, описываясь в соответствии с формулой (1.2), отображает как именно достигается $\Phi(U3\partial)$ заданным набором Φ Э:

$$Cmp^{\Phi}(\mathit{U3d}): \sum_{i=1}^{n} \Phi \mathcal{J}_{i}(nap_{1}^{\Phi \mathcal{J}_{i}}, ..., nap_{m}^{\Phi \mathcal{J}_{i}}) \xrightarrow{\Phi_{k}} \Phi(\mathit{U3d}), k = \overline{I,q}.$$
 (1.7)

Взаимосвязи $Ce_{i,j}^{\Phi \ni}$ в выражении (1.2), определяясь как функциональные зависимости, отображают функциональное взаимодействие $\Phi \ni$ на уровне проектируемого изделия (или его СЧ) для обеспечения $\Phi(U \bowtie \partial)$.

ФСИ, таким образом, описывает лишь *«идею»* изделия – номинальный принцип действия, достигаемый взаимодействием функциональных элементов структуры без подробностей их материализации, т.е. в абстрактной форме.

Разработка ФСИ — это задача САЕ-систем (англ. *Computer-Aided Engineering*) — систем инженерных расчетов, моделирования и анализа [9, 132]. Она выбирается и уточняется на этапе ЭП, отображая номинальную функциональность изделия и его основные свойства [48, 150]. ФСИ может представлять собой комплект принципиальных схем и, таким образом, являться не чем иным, как типичным ТЗ [95, 127] для последующего этапа ТП.

1.2.2 Конструкторская структура изделия

Конструкторская структура изделия (КСИ) — комбинированная структура, содержащая как функциональные, так и конструктивные элементы, а также отображающие их входимость связи («состоит из...», «входит в...»)» [65]. КСИ не является абстракцией (в отличие от ФСИ), т.к. она отображает информацию о материализации изделия за счет взаимосвязей между функциональными и конструктивными элементами.

Термин «Конструктивный элемент (КЭ)» определяется согласно [65] как «составная часть изделия, выполняющая в нем одну или несколько функций» и может представлять собой как самостоятельное материализованное изделие уровня «Деталь», либо быть его частью.

На рисунке 1.3 в качестве примера представлена КСИ, сформированная на основе ФСИ, ранее отображенной на рисунке 1.2.

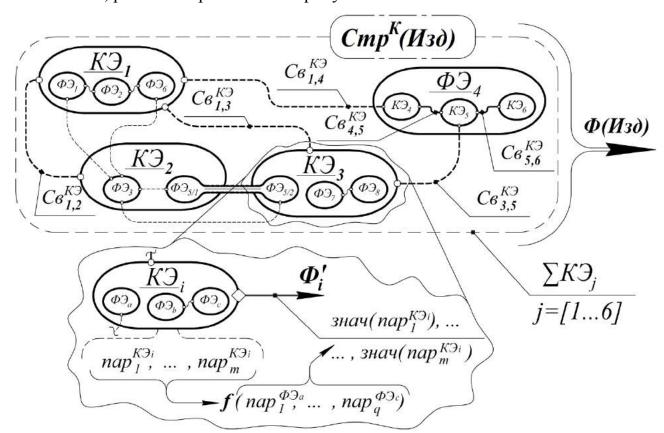


Рисунок 1.3 – Конструкторская структура изделия (КСИ)

Формальное описание КСИ согласно данному в начале настоящего подраздела определению, рисунку 1.3, а также формулам (1.1) и (1.2) принимает вид:

$$Cmp^{K}(U3\partial) = \{K\mathcal{G}_{i}, Ce_{i,j}^{K\mathcal{G}}\}, i = \overline{I,n}, j = \overline{I,n},$$
 (1.8)

где $Cmp^{K}(\mathcal{U}3\partial)$ — конструкторская структура изделия, $K\mathfrak{I}_{i}$ — i-ый конструктивный элемент, выполняющий (посредством $\Phi\mathfrak{I}$) набор функций, а значит:

$$Cmp^{K}(M3\partial): \begin{cases} \sum_{j=1}^{m(i)} \Phi \mathcal{I}_{j} \to K \mathcal{I}_{i}, i = \overline{l,n}; \\ \sum_{k=1}^{p(q)} K \mathcal{I}_{k} \to \Phi \mathcal{I}_{q}, q = \overline{l,w}; \end{cases}$$

$$(1.9)$$

где m — количество выполняемых i-ым КЭ функций, т.е. $KЭ_i$ — это Cmp. $Э_i$, материализация которого выполняет набор функций Φ_i , i=[1,...,t], реализуемых в Φ СИ набором $\Phi Э_i$, j=[1,...,t] соответствиями вида $\Phi Э_i \to \Phi_i$.

Взаимосвязи, определяющие входимость КЭ и ФЭ, могут быть трех типов:

- **1.** *i*-ый КЭ содержит в себе набор ФЭ: $[\Phi \mathcal{P}_1,...,\Phi \mathcal{P}_n] \to K\mathcal{P}_i$, что характерно для многофункциональных устройств (уровня *«Деталь»*), номинально сочетающих в себе набор различных функций (на рисунке 1.3 это $K\mathcal{P}_1$, $K\mathcal{P}_2$, $K\mathcal{P}_3$).
- **2.** *i*-ый ФЭ реализуется набором КЭ: $[KЭ_1,...,KЭ_n] \rightarrow \Phi \mathcal{P}_i$, что характерно для комплексных (составных) устройств, функционал которых обеспечивается сложным составом ФЭ, нереализуемом в рамках одного КЭ (на рисунке 1.3 это $\Phi \mathcal{P}_4$).
- **3.** *i*-ый Φ Э реализуется одним *j*-ым КЭ (при этом *j*-ый КЭ содержит в себе только *i*-ый Φ Э) критичный вариант, отмеченный в работе [213], его удобно рассматривать как частный случай взаимосвязи между Φ Э и КЭ *1*-го или *2*-го типа.

Каждый i-ый $K\mathfrak{I} \in Cmp^K(\mathcal{U}\mathfrak{I}\mathfrak{I}\mathfrak{I})$ аналогично $\Phi\mathfrak{I}$ характеризуется собственным набором конструкторских параметров $(nap_1^{K\mathfrak{I}_i},...,nap_m^{K\mathfrak{I}_i})$, качественно и количественно описывающих структуру $K\mathfrak{I}$ в плане «вхождения» в нее $\Phi\mathfrak{I}$, т.е.:

$$\sum_{q=1}^{w}$$
 знач $(nap_q^{K\mathfrak{I}_i}) \to K\mathfrak{I}_i(\sum_{j=1}^{m(i)} \Phi \mathfrak{I}_j), i = \overline{l,n},$ (1.10)

где знач $(nap_q^{K\Theta_i})$ — значение q-го конструкторского параметра i-го $K\Theta$.

Значения конструкторских параметров i-го КЭ определяются, прежде всего, значениями функциональных параметров, входящих в его состав ФЭ:

знач
$$(nap_u^{K\Im_i})_{u=1}^{g(i)} = f($$
знач $(nap_k^{\Phi\Im_j})_{k=1}^{p(j)})$, $i = \overline{I,n}$, $j = \overline{I,m}$, (1.11)

при $\{\Phi \mathcal{G}_1, ..., \Phi \mathcal{G}_m\} \in K \mathcal{G}_i$, где f – это зависимость, «связывающая» функциональные параметры $\Phi \mathcal{G}$ с конструкторскими параметрами состоящего из них i-го $K \mathcal{G}$.

Каждый *i*-ый КЭ характеризуется т.н. *комплексной функцией* Φ_j ' – функцией, выполнение которой обеспечивается набором входящих в его состав Φ Э (как связанных, так и несвязанных между собой):

$$\Phi_{i}' = \sum_{j=1}^{m} \Phi_{j}(\Phi \mathcal{P}_{j}), \{\Phi \mathcal{P}_{i}, \dots, \Phi \mathcal{P}_{m}\} \in K \mathcal{P}_{i}, i = \overline{l, n}, \qquad (1.12)$$

т.о. Φ_i отображает совокупность функций, выполняемых *i*-ым КЭ в $Cmp^K(M3\partial)$.

Комплексная функция Φ_i ', определяется значениями $(nap_1^{K\ni_i},...,nap_m^{K\ni_i})$, т.е.:

$$K \ni_i : \sum_{i=1}^m$$
 знач $(nap_j^{K \ni_i}) \to \Phi_i'$, $i = \overline{I,n}$, (1.13)

а с учетом выражения (1.11):

$$K \ni_i (\Phi \ni_k)_{k=1}^{u(i)} : \sum_{i=1}^m$$
 знач $(nap_j^{\Phi \ni_k}) \to \Phi_i', i = \overline{I,n},$ (1.14)

следовательно, комплексная функция Φ_i ' определяется значениями как конструкторских, так и функциональных параметров.

Номинальный функционал изделия $\Phi(U3\partial.)$ достигается системой КЭ путем выполнения ими комплексных функций Φ_i , тогда запись (1.5) принимает вид:

$$\bigcup_{i=1}^{n} \Phi_{i}' \to \Phi(U30), \tag{1.15}$$

где n – это количество $K\mathcal{P}_i \in Cmp^K(\mathcal{U}_{3\partial})$, и с учетом формул (1.9) и (1.12):

$$Cmp^{K}(\mathit{U3d}): \sum_{i=1}^{n} K\mathcal{I}_{i} \xrightarrow{\cup \Phi_{i}'} \Phi(\mathit{U3d}).$$
 (1.16)

Каждый *i*-ый $K\mathcal{G}_i \in Cmp^K(U_3\partial)$, представляя собой некий набор $\Phi\mathcal{G}$, аналогично записям (1.1)и(1.8), также описывается системой, что видно на рисунке 1.3:

$$K\Theta_{q} = \{\Phi\Theta_{i}, Ce_{i,j}^{\Phi\Theta(K\Theta_{q})}\}, i = \overline{l,b}, j = \overline{l,g}, \qquad (1.17)$$

где $Ce_{i,j}^{\Phi \ni (K \ni_q)}$ — это взаимосвязи между $\Phi \ni$, входящими в состав q-го $K \ni$, и определяющие его как в плане собственной структуры, так и комплексной функциональности Φ_i .

Взаимосвязи между КЭ $Ce_{i,j}^{K9}$ в выражении (1.8) определяются, прежде всего, конструктивным взаимодействием, отображая *«собираемость»* изделия, зависимую в свою очередь от функционального взаимодействия ФЭ: $Ce_{i,j}^{K9} = f(Ce_{k,h}^{\Phi9})$.

КСИ представляет *«идею»* изделия (ФСИ) как объект *материализации* в виде набора КЭ [216]; она формируется на этапе конструкторского проектирования и представляет собой исходные данные для разработки КД на изделие [127].

1.2.3 Взаимосвязь функциональной и конструкторской структур. Конструкция изделия

Взаимосвязь функциональной и конструкторской структур изделия на этапе ОКР выполняется на двух *«уровнях»*:

- $\underline{\mathit{Bнутреннем}}$: связями вида $\Phi\mathcal{P}_j \leftrightarrow \mathcal{K}\mathcal{P}_i$, отображаемых формулой (1.9);
- <u>Внешнем</u>: комплексной связью вида $Cmp^{\phi}(U3d) \to Cmp^{\kappa}(U3d)$, подробно представленной на рисунке 1.4.

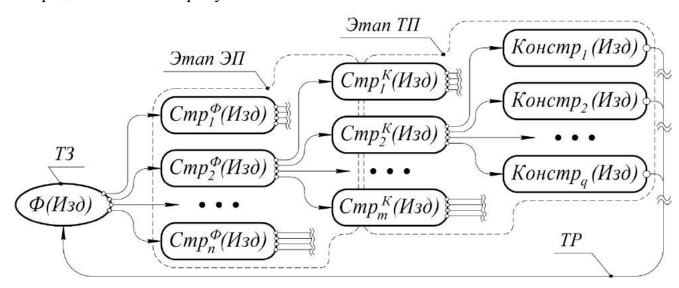


Рисунок 1.4 – Взаимосвязь КСИ и ФСИ

На рисунке 1.4 видно, что требуемая функциональность изделия, зафиксированная в ТЗ, в общем случае может быть обеспечена принципиально различающимися ФСИ, каждая из которых обладает уникальным набором $\Phi Э_i$ и $C e_{i,j}^{\Phi Э}$, а также параметрами и характеристиками; определение конкретной ФСИ происходит на этапе ЭП.

Дальнейшая *«материализация»* выбранной ФСИ включает в себя два этапа:

- **1.** Определение КСИ. Одна ФСИ может быть реализована множеством разнообразных КСИ, главным и обязательным условием для которых является обеспечение номинального функционала $\Phi(U3d)$. На данном этапе происходит выбор набора КЭ согласно формуле (1.9) и связями между ними. Выбор экземпляра КСИ остается за конструктором, как правило, совместно с разработчиком. Данный этап соответствует <u>структурному синтезу систем</u>, описанному в книге [137].
- **2.** Формирование конструкции. Каждая КСИ, соответствующая исходной ФСИ, может быть реализована множеством вариантов, сходных по своей структуре, описываемой формулой (1.8), но отличающихся друг от друга значениями, описывающих каждый $KO_i \in Cmp^K(\mathit{U3d})$ конструкторских параметров $\{nap_j^{KO_i}\}$ согласно записи (1.10). На данном этапе происходит формирование экземпляра КСИ, характеризующегося набором значений параметров $\{shay(nap_j^{KO_i})\}$, которые определяются инженером-конструктором самостоятельно. Данный этап соответствует napamempuveckomy синтезу систем, описанному в книге [137].

Как отмечают Г.Б. Евгенев и другие авторы работы [3], каждый конструктивный узел (по своей сути изделие) может иметь несколько исполнений, состоящих из различных конструктивных частей, и, следовательно, описываться различными системами КЭ согласно выражению (1.16).

КСИ является, по своей сути, **классом** структурно подобных конструкций: в зависимости от значений конструкторских параметров $\{3hau(nap_j^{K3_i})\}$, формируется экземпляр класса в виде **Констр(Изд)**, т.е. КСИ – это *«шаблон конструкций»*.

Такой экземпляр КСИ в настоящей диссертационной работе обозначается термином «Конструкция изделия», под которым понимается полное информационное описание изделия, необходимое и достаточное для материализованного воплощения его конструкторской структуры в виде технического решения, описываемого комплектом КД и обеспечивающего номинальную функциональность.

Конструкция (лат. *constructio* – строение, устройство) изделия включает данные о материале, геометрии и размерах с обязательным указанием допустимых отклонений, допусков и погрешностей на выполнение размеров и форм, а также тип покрытий, обработки, набор технических требований и др. [115, 119, 237].

Б.М. Базров в своей работе [14] отмечает, что «полноценное описание конструкции изделия должно нести информацию в явном виде о структуре конструкции, составе входящих в нее элементов, а также качественные характеристики, влияющие на выходные показатели изделия».

Синтез конструкции проектируемого изделия: $Cmp^{\kappa}(\mathit{Изd}) \to \mathit{Kohcmp}(\mathit{Изd})$ – это основная задача CAD-систем [9, 184].

1.3 Электронная геометрическая модель изделия. 3D-модель

Электронные геометрические модели изделий (ЭГМИ) занимают центральное место [100, 222, 231] в PLM-системах — системах управления ЖЦИ [118, 198], являясь главной составляющей *цифрового макета* (ЦМ) изделия [124, 204, 212, 229] — совокупности электронных документов, содержащих всю необходимую для стадий его ЖЦ проектную информацию [83, 125, 226, 237].

1.3.1 Определение и состав электронной геометрической модели

Электронная модель изделия (ЭМИ) согласно стандарту ГОСТ 2.052-2015 определяется как модель изделия, выполненная в компьютерной среде [55].

Электронная геометрическая модель изделия — ЭМИ, описывающая геометрическую форму, размеры и иные свойства изделия, зависящие от его формы и размеров [55]; ее состав представлен на рисунке 1.5.

Как показано на рисунке 1.5, основу ЭГМИ составляет *геометрия модели*, представленная совокупностью *геометрических элементов* (ГЭ), определяемых в [55] как «идентифицированный геометрический объект, используемый в наборе данных (точка, грань, плоскость, поверхность, и т.п.)». Каждый ГЭ характеризуется значениями описывающих его атрибутов, т.е.:

$$\Gamma \ni_i = \{amp_q^{\Gamma \ni_i} < 3нач > \}, q = \overline{I, w},$$
 (1.18)

где 3нач — значение q-го атрибута $amp_q^{\Gamma g_i}$, определяющего набор геометрических параметров и свойств Γg_i , w — количество описывающих его атрибутов. Согласно [55] атрибутом является размер, допуск, текст или символ.

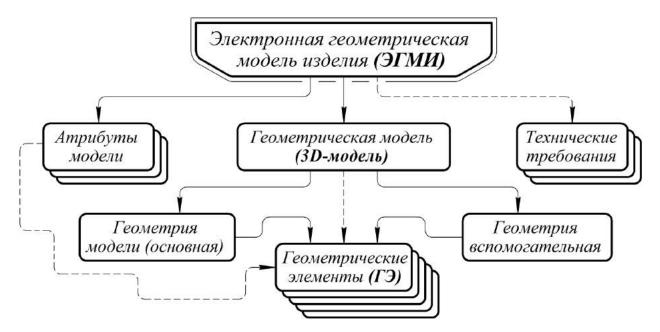


Рисунок 1.5 – Состав электронной геометрической модели изделия

ЭГМИ предназначены, прежде всего, для хранения информации о геометрической форме ДСЕ и их взаимном расположении, а также предоставления этой информации для обработки в удобном для пользователя виде [121, 132].

ЭГМИ содержит в себе всю информацию, необходимую для стадии ОКР [12, 43, 100, 122], при этом на этапе конструирования основную роль играет *геометрическая модель* или просто *3D-модель* изделия [35, 81, 125, 197].

1.3.2 Представление проектируемого изделия 3D-моделью

Конструкция изделия, представляя собой материализованный на основании ТЗ результат проектной деятельности на этапе конструирования, определяющий облик будущего изделия [18], отображается 3D-моделью [11, 13, 133, 226] — конструкторским решением стадии ОКР, формируемым в CAD-системе, т.е.:

$$CAD: Koнcmp(U3d) \rightarrow Mod_{U3d}^{3D},$$
 (1.19)

где $Kohcmp(U3\partial)$ – конструкция изделия, $Mo\partial_{U3\partial}^{3D}$ – 3D-модель изделия.

Современные наукоемкие и обладающие высокими потребительскими свойствами изделия характеризуются, как правило, сложной конструкцией, определяемой номинальной функциональностью, технологичностью изготовления, эргономичностью, эстетичностью, надежностью, а также унификацией и множеством других требований [5, 12, 68, 72, 222, 223, 228].

Сложность конструкции изделия отражается в CAD-системах технологией «Feature-based modeling», рассматриваемой в последующем подразделе.

1.3.3 Формирование и представление 3D-модели в CAD-системах. Понятие конструктивного элемента геометрии

Практически во всех современных САD-системах процесс формирования 3D-модели основан на технологии *«Feature-based modeling»* [235, 242] (с англ.: *«построение на основе конструктивных элементов»*) [116], которая, в свою очередь, базируется на конструктивной геометрии твердых тел [112, 132] (*Constructive Solid Geometry (CSG)*) и заключается в построении трехмерных объектов посредством булевых операций над 3D-примитивами [47, 180]. К таким примитивам относятся: куб, призма, пирамида, сфера, цилиндр, конус и др. [112].

Технология *«Feature-based modeling»*, как следует из названия, основана на т.н. *«фичерсах» (англ.: features)* [148, 187, 242], эквивалентом которых на русском языке является термин *«конструктивные элементы геометрии»* [4, 117, 130].

Конструктивный элемент геометрии (КЭГ) определен в работах [78, 132] как «объект с предопределенным поведением и структурой данных». КЭГ является основной единицей моделирования в современных САПР [114], представляя собой составную часть топологии 3D-модели, задающую ее геометрию [116, 185].

Структурно КЭГ состоит из набора взаимосвязанных друг с другом ГЭ:

$$K\Im\Gamma_i = \langle \Gamma \Im_k, C \mathfrak{G}_{k,q}^{\Gamma \Im} \rangle, k = \overline{l,n}, q = \overline{l,n}, \qquad (1.20)$$

где $\Gamma \ni_k - k$ -ый геометрический элемент, $Ce_{k,q}^{\Gamma \ni}$ – связи между k-ым и q-ым $\Gamma \ni$.

Именно такая система (1.20) в настоящем исследовании обозначается термином «Конструктивный элемент геометрии».

Каждый КЭГ, аналогично выражению (1.18), определяется значениями собственных атрибутов:

$$K \ni \Gamma_i = \{amp_j^{K \ni \Gamma_i} < 3 \mu a \nu > \}, j = \overline{I, m},$$
 (1.21)

где 3нач — это значение j-го атрибута $amp_j^{K \ni \Gamma_i}$; при этом для каждого $\Gamma \ni_k \in K \ni \Gamma_i$ $amp_q^{\Gamma \ni_k} = f(amp_j^{K \ni \Gamma_i})$, т.е. атрибуты $\Gamma \ni$ определяются $K \ni \Gamma$ при его построении.

3D-модель изделия представляется как совокупность КЭГ [4, 130, 148, 230]:

$$\begin{cases}
Mo\partial_{H_{3\partial}}^{3D} = \sum_{i=1}^{n} K \Im \Gamma_{i}, \\
Mo\partial_{H_{3\partial}}^{3D} = \langle \Gamma \Im_{j} \rangle, j = \overline{l,m},
\end{cases}$$
(1.22)

где n — общее число КЭГ, формирующих 3D-модель, m — количество $\Gamma \ni \in Mod_{U30}^{3D}$; т.е. технология CSG обеспечивает формирование 3D-модели следующим образом:

$$CSG: \sum_{i=1}^{n} K \Im \Gamma_{i} \xrightarrow{M^{BO}} Mo\partial_{M3\partial}^{3D}, \qquad (1.23)$$

где: M^{EO} — совокупность булевых операций над КЭГ, к которым в рамках технологии CSG относятся [112]: *объединение* (сложение), *разность* (вычитание) и **пересечение**, i — порядковый номер, отображающий очередность построения КЭГ.

3D-модель состоит из ГЭ согласно записи (1.22) следующим образом: вершины задают грани, грани объединяются в ребра, а совокупность ребер формирует *топологию модели* [211].

Сформированная согласно рисунку 1.5 и выражению (1.23) 3D-модель характеризуется аналогично записям (1.18) и (1.21) набором атрибутов (их значениями), описывающим непосредственно результирующую 3D-геометрию Mod_{II30}^{3D} :

$$\begin{cases} Mo\partial_{H_{3\partial}}^{3D} = \{amp_{t}^{Mo\partial} < 3\mu au > \}, t = \overline{I,v}, \\ amp_{t}^{Mo\partial} \leftarrow \delta(amp_{j}^{K\Im\Gamma_{i}}), j = \overline{I,m}, \\ amp_{t}^{Mo\partial} \rightarrow amp_{q}^{\Gamma\Im_{k}}, \Gamma\Im_{k} \in Mo\partial_{H_{3\partial}}^{3D}, \end{cases}$$

$$(1.24)$$

где $amp_t^{Moo} - t$ -ый атрибут 3D-модели Mod_{Hso}^{3D} , определяемый атрибутами $K\Im\Gamma_i$ согласно формуле (1.22). Набор $\{amp_t^{Moo}\}$ отображает атрибуты всех $\varGamma\Im\in Mod_{Hso}^{3D}$.

Результирующая 3D-модель практически во всех современных САПР описывается технологией *граничного представления* (*Boundary Representation*, *B-Rep*) [47, 67], согласно которой отображаются только те ГЭ, образовавшиеся построением всех КЭГ согласно записям (1.22) и (1.24), и сохранившиеся после выполнения над ними булевых операций, обеспечивающих формирование требуемой геометрии. При этом САD-система «помнит» обо всех ГЭ каждого КЭГ, создаваемого в процессе формирования 3D-модели [38, 229].

1.3.4 Системное описание структуры 3D-модели в САD-системе

Формируемая в CAD-системе 3D-модель характеризуется своей структурой $Cmp(Mod_{H_{30}}^{3D})$, определяющей ее в рамках рассмотренных выше технологий как конкретный набор КЭГ и булевых операций над ними:

$$Cmp(Mo\partial_{H_{3\partial}}^{3D}): \left(\sum_{i=1}^{n} M^{BO}(K\Im\Gamma_i)\right)_{q} \to Mo\partial_{H_{3\partial}}^{3D}, i = f(q),$$
 (1.25)

где $q \in [1, ..., m]$ – номер способа построения $Mo\partial_{H_{30}}^{3D}$.

Структура 3D-модели в наиболее общем случае представлена на рисунке 1.6.

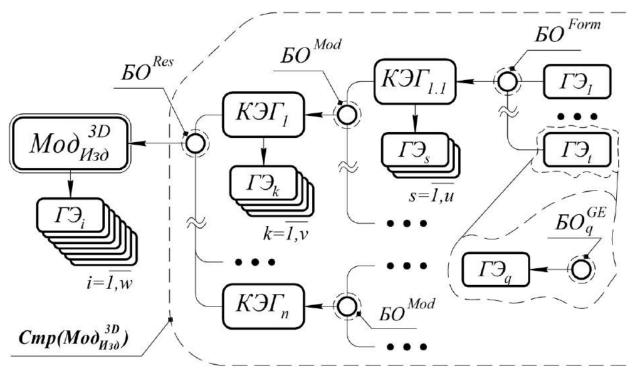


Рисунок 1.6 – Структура 3D-модели как система КЭГ

3D-модель в плане своей *структуры* — иерархичного набора КЭГ формально представляется *как система*:

$$Cmp(Mo\partial_{H_{3\partial}}^{3D}) = \{ K \ni \Gamma_i^k, Om\mu_i^{K\ni\Gamma} \}, \ i = \overline{1,n} \ , \tag{1.26}$$

где k – это структурный уровень i-го КЭГ, $Om H_i^{K\Im\Gamma}$ – множество отношений между КЭГ, определяемое как $Om H_i^{K\Im\Gamma} = \{Om H_{i,j}^{K\Im\Gamma}\}, \ j = \overline{I,n}, \$ где $Om H_{i,j}$ – отношение между i-ым и j-ым КЭГ; $Om H_i^{K\Im\Gamma}$ обеспечивает иерархичность $Cmp(Mod_{H30}^{3D})$ [75].

Иерархичность системы (1.26) поясняется рисунком 1.7.

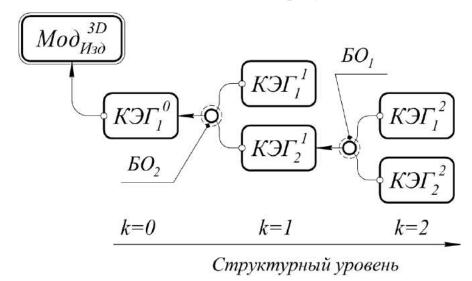


Рисунок 1.7 – Определение иерархичности структуры 3D-модели

Структурный уровень k отображает т.н. *«глубину»* КЭГ в $Cmp(Mod_{U30}^{3D})$, т.е. количество булевых операций, необходимых для непосредственного «включения» данного КЭГ в результирующую 3D-модель. При этом КЭГ структурного уровня k=0 и есть результирующая 3D-модель: KЭ $\Gamma^0=Mod_{U30}^{3D}$.

Количество КЭГ на уровне k=0 не всегда равно единице, как в случае многотельных деталей [28]: $Mo\partial_{H_{30}}^{3D} = \{K\mathcal{P}\Gamma_{1}^{0}...K\mathcal{P}\Gamma_{t}^{0}\}$, где t – количество тел.

 \circ «*Родитель*» — текущий КЭГ является «*исходным*» для формирования последующих КЭГ. На рисунке 1.7 KЭ Γ_1^2 и KЭ Γ_2^2 являются «*родителями*» KЭ Γ_2^1 , а KЭ Γ_2^1 и KЭ Γ_2^1 — «*родителями*» KЭ Γ_2^0 .

- \circ «Потомок» текущий КЭГ есть результат выполнения операций над парой уже построенных КЭГ. На рисунке 1.7 $KЭ\Gamma_2^I$ является «потомком» $KЭ\Gamma_1^2$ и $KЭ\Gamma_2^2$, а $KЭ\Gamma_1^0$ «потомком» $KЭ\Gamma_1^I$ и $KЭ\Gamma_2^I$.
- \circ *Независимый* текущий КЭГ непосредственно не связан в плане выполнения операций с другим КЭГ. На рисунке 1.7 независимыми являются пара $K\mathcal{I}_{I}^{2}$ и $K\mathcal{I}_{I}^{2}$, а также пара $K\mathcal{I}_{I}^{2}$ и $K\mathcal{I}_{I}^{2}$.

КЭГ различных уровней на первый взгляд являются независимыми. Однако реализация технологии CSG в CAD-системах позволяет повторно использовать один и тот же КЭГ (как *«родитель»*); уровень таких КЭГ определяется нижайшим значением k из принимаемых $[k_1, ..., k_n]$, т.е. его первым применением.

Структура 3D-модели с учетом записи (1.26) представлена на рисунке 1.8, где BO_q — набор булевых операций, обеспечивающих формирование $Mo\partial_{\mathit{H30}}^{\mathit{3D}}$.

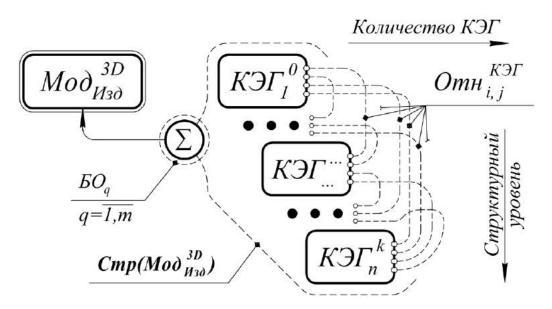


Рисунок 1.8 – Системное представление структуры 3D-модели

На рисунке 1.8 видно, что структура 3D-модели представляет собой *иерар-* xuvuhuu и ynopndovehhuu hafop KF, характеризующий построенную геометрию в плане способа ее формирования, т.е. является ее «cmamuveckou» моделью.

Сама 3D-модель является следствием выполнения проектных процедур CADсистемы [98, 166, 234], отображенных в иерархической структуре, описывающей последовательность их выполнения и взаимосвязи между ними, – в русскоязычной литературе такая структура называется «CSG-дерево» [132] или «Дерево построения 3D-модели» [47, 76, 78] или «История построения модели» [203].

Информация о конструкции изделия, предоставляемая 3D-моделью в соответствии с выражением (1.19), формируется именно в этих проектных процедурах, далее называемых *базовыми операциями*. Им посвящен следующий раздел.

1.4 Базовая операция – основное проектное действие в САД-системе

Проектная деятельность в CAD-системе, сводимая к разработке КД в виде чертежей, текстовых и графических документов, а также 3D-моделей и пр., реализуется посредством *операций* [28, 47, 148, 202], предоставляемых функционалом (инструментарием) используемой CAD-системы.

В работе [208] отмечается, что современные САD-системы не позволяют напрямую обращаться к формируемой геометрии, а взаимодействуют с ней через собственный функционал, уникальный для каждой САПР [19, 25, 38, 135] в плане количества таких *операций*, способа их определения и реализации.

1.4.1 Понятие базовой операции САД-системы

В настоящем исследовании под <u>базовыми операциями</u> (**БО**) понимаются простейшие в рамках функционала используемой CAD-системы проектные действия, вызываемые и определяемые пользователем, на которые декомпозируется процесс построения 3D-модели изделия:

$$CAD: \bigcup_{i=1}^{n} \mathcal{B}O_{i}^{CAD} \to Mo\partial_{\mathcal{U}_{3\partial}}^{3D},$$
 (1.27)

где BO_i^{CAD} — i-ая базовая операция, предоставляемая CAD-системой пользователю для ее определения путем наполнения значениями описывающих ее параметров — исходных данных к ее выполнению [38, 135, 188]; т.е. с точки зрения пользователя БО является функцией вида:

$$EO_i^{CAD} = f(nap_j^{EO_i}), j = \overline{1,m}, \qquad (1.28)$$

где $nap_{i}^{\mathit{EO}_{i}}-j$ -тый параметр, входящий во множество исходных данных i-той БО.

Каждая БО определяется <u>идентификатором</u> внутри САD-системы. *Иденти-фикатор базовой операции (ИБО)* – уникальное символьно-числовое обозначение, присваиваемое каждой БО, обеспечивающее ее отличие от других [89], входящих в функционал используемой САПР. Обращение пользователя к БО происходит в САD-системе путем указания ее ИБО, роль которого (с точки зрения пользователя) зачастую играет наименование БО [22, 153].

1.4.2 Процессная модель базовой операции

ИБО, будучи главным атрибутом базовой операции, определяет ее как экземпляр класса всех БО, предусмотренных функционалом используемой САПР [22]: $M_{CAD}^{EO} = \{ EO_i^{CAD} \}, i = \overline{I,n} \text{ . Такой экземпляр формально представляется в виде:}$

$$EO_i^{CAD} = \langle id, U M \mathfrak{A}, M^{\Pi ap}, Pe_3, \alpha^{CAD} \rangle,$$
 (1.29)

Согласно выражению (1.29), БО может быть представлена как процесс:

$$EO_i^{CAD}: M^{\Pi ap} \xrightarrow{\alpha^{CAD}} Pes.$$
 (1.30)

Все современные САD-системы имеют схожую функциональность: БО в них является основной функциональной единицей инженерной деятельности. Описание БО, как процесса, наиболее информативно [41, 86] в рамках методологии функционального моделирования IDEF0 [167]; процессная диаграмма БО, инвариантная по отношению к конкретной САПР, представлена на рисунке 1.9. Данная IDEF0-диаграмма является ничем иным как процессной моделью.

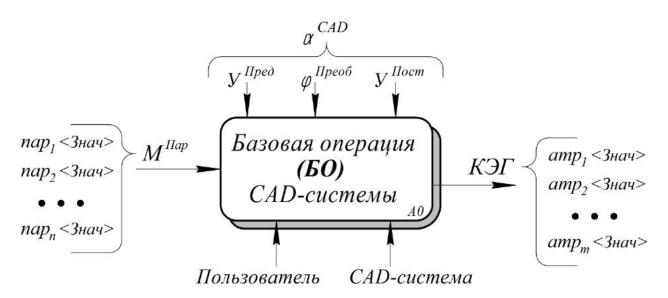


Рисунок 1.9 – IDEF0-диаграмма базовой операции CAD-системы

На рисунке 1.9 видно, что БО преобразует задаваемое пользователем множество $M^{\Pi ap}$ в результат Pes в виде конструктивного элемента геометрии в соответствии с заданным внутри CAD-системы алгоритмом реализации α^{CAD} . Далее рассматриваются компоненты [157] процессного описания базовой операции.

▶ Входные данные базовой операции

Базовая операция описывается множеством параметров $M^{\Pi ap} = \{nap_j\}$, являющихся *входными данными* для ее выполнения [21], значения которых определяют согласно формуле (1.28) как процесс, так и результат выполнения БО, т.е. в этом плане $M^{\Pi ap}$ описывается как:

$$M^{\Pi ap}(BO_{i}^{CAD}) = \{nap_{i}^{BO_{j}} < 3\mu au > \}, j = \overline{1,m},$$
 (1.31)

где 3нач — заданное значение j-того параметра $nap_{j}^{\mathit{EO}_{i}}$, характеризующего $\mathit{EO}_{i}^{\mathit{CAD}}$.

Значение каждого $nap_j^{EO_i}$ задается согласно заложенным в $\alpha_i^{CAD}(EO_i^{CAD})$ правилам [20], с учетом которых выражение (1.31) принимает следующий вид:

$$M^{\Pi ap}(BO_i^{CAD}) = \{nap_j^{BO_i} < 3$$
нач, Тип, Доп, Спос > \}, $j = \overline{1,m}$, (1.32)

где Tun — это тип значения параметра $nap_j^{\mathit{EO}_i}$ (число, геометрический элемент, переменная и др.), $\mathcal{A}on$ — допустимые значения $nap_j^{\mathit{EO}_i}$ в виде предварительно заданного набора, определяемого условиями согласно Tun (положительные числа, гео-

метрические 2D-объекты, 3D-поверхности и др.), Cnoc — способ задания значения $nap_j^{EO_i}$ (ввод «свободных» значений, указание из имеющихся переменных или выбор из предварительно заданных вариантов).

Параметры большинства $nap_{j}^{BO_{i}} \in M^{\Pi ap}(BO_{i}^{CAD})$ взаимосвязаны друг с другом. Для корректной реализации BO_{i}^{CAD} , как правило, нет нужды задавать значение каждого $nap_{j}^{BO_{i}}$, а достаточно фиксированного набора, на основании которого будут получены значения всех параметров множества $M^{\Pi ap}(BO_{i}^{CAD})$ [38, 135].

▶ Выходные данные базовой операции

Результатом выполнения БО является формирование или модификация *конструктивных элементов геометрии* [4, 6, 171, 230], понятие которым было дано в подразделе 1.3.3, т.о.:

$$Pe3(BO_i^{CAD}) = K\Im\Gamma_K^{BO_i}\{...\}, \qquad (1.33)$$

где $K \Im \Gamma_K^{\mathit{BO}_i}$ — это класс $K \Im \Gamma$, формируемых в результате выполнения $\mathit{BO}_i^{\mathit{CAD}}$, описываемый следующим образом:

$$K \ni \Gamma_K^{BO_i} = \{ K \ni \Gamma_i < id, Имя, M^{amp} \{...\} > \}, j = \overline{1,m},$$
 (1.34)

где: id — это идентификатор экземпляра $K \mathcal{I}_j \in K \mathcal{I}_K^{BO_i}$; $\mathit{Имя}$ — его наименование, отображаемое пользователю; m — количество $\mathit{K} \mathcal{I}_j$ в $\mathit{K} \mathcal{I}_K^{BO_i}$; $\mathit{M}^{\mathit{amp}}$ — множество описывающих каждый $\mathit{K} \mathcal{I}_j$ атрибутов, которое с учетом записи (1.21), определяется как:

$$M^{amp}(K \ni \Gamma_j) = \{amp_k^{K \ni \Gamma_j} < id, Имя, Tun, 3нач > \}, k = \overline{l,w},$$
 (1.35)

где id — это идентификатор $amp_k^{K \ni \Gamma_j}$; U m s — его наименование; T u n — тип принимаемых значения 3 ha u k-го атрибута $amp_k^{K \ni \Gamma_j}$; w — количество $amp_k^{K \ni \Gamma_j} \in M^{amp}$.

Идентификатор $id(K\Im\Gamma_j)$ определяет набор атрибутов M^{amp} уникальный в плане их состава и количества, а также взаимосвязей между ними [47].

Каждый экземпляр $K \ni \Gamma_j \in K \ni \Gamma_K^{BO_i}$ полностью определяется набором значений входных к BO_i^{CAD} параметров $nap_q^{BO_i}$, т.е.:

$$K\Im\Gamma_{K}^{BO_{i}}=\{K\Im\Gamma_{j}\big|\,3$$
нач $(amp_{k}^{K\Im\Gamma_{j}})=\varphi(3$ нач $(nap_{q}^{BO_{i}})),\,j=\overline{l,m},\,k=\overline{l,w},\,q=\overline{l,u}\,,$ (1.36) где φ — это комплексная функция, определяющая преобразование исходных данных $nap_{q}^{BO_{i}}$ в выходные $amp_{k}^{K\Im\Gamma_{j}}$, определяемая программным алгоритмом BO_{i}^{CAD} .

Все экземпляры $K \ni \Gamma_j \in K \ni \Gamma_K^{BO_i}$ обладают т.н. «системным свойством», определяемым спецификой класса $K \ni \Gamma_K^{BO_i}$ в плане фиксированного смысла [21, 170] в рамках функционала CAD-системы.

▶ Механизм базовой операции

Механизмами выполнения БО являются САD-система в плане ее программной реализации, а также пользователь (инженер-конструктор) в плане выбора и определения значений описывающих ее параметров $3hau(nap_i^{EO_i})$.

▶ Управляющие данные базовой операции

Данные, управляющие выполнением БО, – алгоритм ее реализации в CAD-системе $\alpha^{\it CAD}$, который может быть представлен следующим образом:

$$\alpha^{CAD}(BO_i^{CAD}) = \langle M^{\Pi peo}, \varphi^{\Pi peoo}, M^{\Pi ocm} \rangle, \qquad (1.37)$$

где $M^{\Pi ped}$ и $M^{\Pi ocm}$ — множества пред- и постусловий выполнения EO_i^{CAD} соответственно, $\varphi^{\Pi peo \delta}$ — функция преобразования $3 hau(nap_j^{EO_i})$ в $3 hau(amp_k^{KS\Gamma_i})$ (см. выражение 1.36).

Множество предусловий выполнения EO_i^{CAD} определяет корректность входных данных согласно выражению (1.32) и описывается следующим образом:

$$M^{\Pi peo}(BO_i^{CAD}) = \{ nap_j^{EO_i} < \mathcal{D}on > \}, \qquad (1.38)$$

т.е. $M^{\Pi peo}$ содержит условия вида $3 hau(nap_j^{EO_i}) \in \mathcal{A}on(nap_j^{EO_i})$, соблюдение которых необходимо перед выполнением EO_i^{CAD} (после ее вызова пользователем) для ее правильной реализации.

Множество постусловий выполнения EO_i^{CAD} определяет корректность выходных данных согласно записи (1.35) в рамках используемого в CAD-системе геометрического ядра [170, 209] и описывается следующим образом:

$$M^{\Pi ocm}(BO_i^{CAD}) = \{amp_i^{\Gamma \ni_k} < \mathcal{A}on > \}, \tag{1.39}$$

т.е. $M^{\Pi ocm}$ содержит условия вида $3 hau(amp_j^{\Gamma \ni_k}) \in \mathcal{A}on(amp_j^{\Gamma \ni_k})$, соответствующие безошибочно и геометрически правильно сформированному $K \ni \Gamma_j$.

Функция преобразования $\varphi_i^{\Pi peo \delta}$ является основой алгоритма α_i^{CAD} , определяя эталонное выполнение EO_i^{CAD} : получение выходных данных на основании исходных, т.е. с учетом формулы (1.36) представляет собой функцию вида:

$$\varphi_i^{\Pi peo6}: \{nap_i^{BO_i}\} \to \{amp_k^{K\Im\Gamma_q}\}, j = \overline{I,m}, k = \overline{I,u};$$
(1.40)

 $\varphi_i^{\Pi_{peob}}$ реализуется внутри геометрического ядра CAD-системы [209], организуя внутреннее (программное) строение EO_i^{CAD} [227].

САD-система не позволяет нарушать или вмешиваться в α_i^{CAD} , – «аппаратный» алгоритм, компоненты которого согласно формуле (1.37) имеют смысл лишь внутри САПР, представляясь пользователю абстрактными правилами.

С учетом рассмотренных выше компонент процессного описания БО, представленного на рисунке 1.9, выражение (1.30) принимает следующий вид:

$$EO_i^{CAD}$$
: $\{3$ нач $(nap_i^{EO_i})\}$ $\xrightarrow{\varphi_i^{\Pi_{peob}}}$ $\{3$ нач $(amp_k^{K\Im\Gamma_q})\}$, $j=\overline{I,m}$, $k=\overline{I,u}$. (1.41)

Набор атрибутов, описывающих 3D-модель согласно записи (1.24), формируется соответствующими БО, что демонстрирует выражение (1.40), следовательно, система (1.24), описывающая 3D-модель, видоизменяется следующим образом:

$$\begin{cases}
Mo\partial_{H_{3\partial}}^{3D} = \{amp_t^{Mo\partial} < 3hau > \}, t = \overline{I,v}, \\
\{3hau(amp_t^{Mo\partial})\} = \delta\{3hau(nap_j^{BO_i})\}, j = \overline{I,m},
\end{cases} (1.42)$$

где δ — функция, определяющая зависимость между $nap_j^{\mathit{EO}_i}$ и amp_t^{Mod} ; она формируется булевыми операциями над КЭГ, трансформирующими $\{\varGamma \mathcal{F}_k\} \in \mathit{K}\mathcal{F}_i$ для получения требуемой геометрии $\mathit{Mod}_{\mathit{Hsd}}^{\mathit{3D}}$ согласно формуле (1.22).

Функционал всех современных САD-систем представлен базовыми операциями, являющимися абстракциями нижнего уровня. С точки зрения пользователя, EO_i^{CAD} — это простейшая недекомпозируемая функция, взаимодействие с которой сводится к заданию исходных данных — $3hau(nap_i^{EO_i})$.

Смысловое содержание БО актуально исключительно внутри используемой САD-системы [217], а КЭГ, формируемый в результате их выполнения, как правило, имеет физический смысл только при отношении к более высокоуровневой 3D-геометрии, что рассматривается в следующем разделе данной главы.

1.5 Отображение конструкции проектируемого изделия 3D-моделью

Конструкция проектируемого изделия с учетом выражений (1.19) и (1.27) формируется в современных CAD-системах следующим образом:

$$CAD : Koнcmp(U3d) \rightarrow \bigcup_{p=1}^{m} EO_{p}$$
, (1.43)

т.е. конструкция отображается результирующим 3D-образом, структурно состоящим из набора КЭ Γ согласно формуле (1.22).

Вне зависимости от способа формирования проектное решение в виде 3D-модели характеризуется законченностью конструкции: $Mo\partial_{H_{30}}^{3D} = Kohcmp(U_{30})$ — 3D-модель является «сплошной», что, в общем случае, подразумевает инвариантность последней к способу построения итоговой геометрии [158].

Дерево построения 3D-модели повышает ее наглядность [78], устанавливая соответствие [19, 28] между ее «статическим» представлением согласно записи (1.22) и «динамическим» – согласно выражению (1.27):

$$\mathcal{A}ep(Mo\partial_{M30}^{3D}): \{BO_p\} \rightarrow \{K\Im\Gamma_j\}, p = \overline{l,m}, j = \overline{l,q},$$
 (1.44)

где $\mathcal{A}ep(\mathit{Mod}_{\mathit{U30}}^{\mathit{3D}})$ – дерево построения 3D-модели $\mathit{Mod}_{\mathit{U30}}^{\mathit{3D}}$.

В современных САD-системах дерево построения 3D-модели выполняет роль конструктивной концепции (англ. *design intent*) [113], т.е. отражает замысел конструктора [29, 136]. Конструктивная концепция представляет собой данные, ассо-

циированные с геометрической моделью, регламентирующие процесс модифицирования последней после ее создания. А.А. Варакин в работе [38] отмечает, что основная информация о 3D-модели содержится именно в дереве ее построения.

1.5.1 Информативность 3D-модели

Информативность 3D-модели заключается в отображении ею требуемых для текущего этапа ЖЦИ проектных данных об изделии [231]. В разделе 1.2 настоящей главы было рассмотрено, что информацию об изделии отображает его структура (ФСИ или КСИ), а единственной структурой 3D-модели в САD-системе является дерево ее построения [19, 78].

Наибольшая информативность 3D-модели, таким образом, может быть обеспечена при отображении КСИ в дереве построения в CAD-системе, т.е.:

$$CAD: Cmp^{K}(U3\partial) \to \mathcal{A}ep(Mo\partial_{U2\partial}^{3D}),$$
 (1.45)

такая 3D-модель уже в полной мере является самостоятельной компонентой *циф-рового макета* изделия [124, 163]. В.А. Рыжков в работе [173] приводит перечень файлов – компонент ЦМ, несущих информацию об изделии в рамках PLM-системы.

С учётом декомпозиции конструкторской структуры изделия $Cmp^K(U3d)$ на КЭ согласно рисунку 1.3 и записи (1.8), а также дерева построения 3D-модели $\mathcal{L}ep(Mod_{U3d}^{3D})$ на взаимосвязи между БО и КЭГ в соответствии с формулой (1.44) отображение КСИ в дереве построения 3D-модели вида $\{K\Im\Gamma_i(EO_p)\}\to\{K\Im_j\}$ при стандартном функционале CAD-систем может быть реализовано различными принципами, рассматриваемыми далее.

1.5.2 Принцип объектно-ориентированного соответствия

Данный принцип основан на объектно-ориентированном упорядочивании (но не обобщении) БО в $\mathcal{L}ep(Mo\partial_{II30}^{3D})$ [234, 249]. Согласно ему, требуемое отображение структуры изделия может быть достигнуто вполне очевидным образом – по-

следовательным группированием (но не обобщением) соответствующих КЭГ, что представлено на рисунке 1.10 и формулой (1.46).

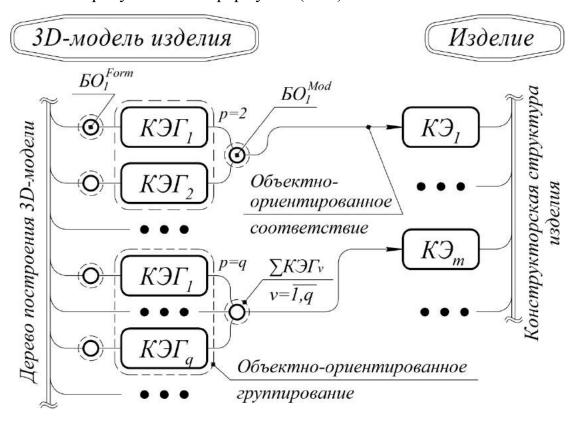


Рисунок 1.10 – Отображение структуры изделия принципом объектно-ориентированного соответствия

$$\mathcal{L}ep(Mo\partial_{H_{3\partial}}^{3D}) = \{K \ni \Gamma_k \mid \sum_{j=1}^p K \ni \Gamma_j \to K \ni_i \}, k = \overline{l,m}, i = \overline{l,n}, m \ge n, \quad (1.46)$$

т.е. каждый $K\Theta_i \in Cmp^K(U3\partial)$ строится некоторым набором $\{K\Theta\Gamma_k\}$, k=[1...n], предоставляя параметры соответствующих БО согласно формуле (1.28) для определения его геометрического 3D-образа. При этом конкретный состав и количество $K\Theta\Gamma$ выбирается инженером на свое усмотрение [98].

Построенная таким образом 3D-модель соответствует первому типу, обладая при этом некоторыми признаками модели второго типа в классификации, представленной Д.Б. Козыревым и Е.М. Абакумовым в их работе [104].

При таком подходе наиболее подробно (в рамках функционала CAD-систем) визуализируется информация о структуре изделия. Сформированную 3D-модель удобно редактировать в дальнейшем: при изменении КЭ его 3D-образ модифици-

руется (в плане геометрии) соответствующими КЭГ посредством изменения значений параметров формирующих их БО $\{nap_i^{BO_i}\}$.

Однако, такой способ построения предоставляет пользователю лишь атрибуты соответствующих БО для редактирования 3D-модели [229], не несущих смысла непосредственно в конструкции изделия. Построение 3D-модели на основе объектно-ориентированного упорядочивания требует значительных временных и трудовых затрат, а также высокой интеллектуальной нагрузки на пользователя и редко используется на практике [249].

Значительно чаще [101] 3D-модель строится без учета структуры изделия, — главным требованием является соответствие итоговой 3D-модели текущей конструкции изделия — геометрическое соответствие между $Mo\partial_{Hso}^{3D}$ и Kohcmp(Usd).

1.5.3 Принцип геометрического соответствия

Суть данного принципа заключается в быстрейшем и, соответственно, легчайшем процессе построения 3D-модели в плане минимального количества БО САD-системы [101, 230]. Отображение конструкторской структуры проектируемого изделия 3D-моделью в соответствии с данным подходом имеет вид, представленный на рисунке 1.11 и выражением (1.47):

$$\mathcal{L}ep(Mo\partial_{\mathcal{U}_{3\partial}}^{3D}) = \{K \ni \Gamma_k \left| \sum_{j=1}^p K \ni \Gamma_j \rightarrow \sum_{i=0}^g K \ni_i \}, k = \overline{I,n}, g = \overline{0,m}, p \le m, (1.47) \right\}$$

т.е. набор $\{K\Im\Gamma_k\}$, при k=[1...n] может отображать какой-либо фиксированный набор $\{K\Im_i\}$, при i=[0...m] или же их частей (при i=0) без четкого соответствия вида $K\Im\Gamma\to K\Im$. С одной стороны, такой вариант на практике значительно удобнее для инженеров, поскольку требует минимума проектных действий – количества БО, а также дает возможность построить требуемую геометрию выбранным на свое усмотрение способом, оперируя знакомыми методами построения трехмерных тел; с другой же стороны, данный подход делает крайне затруднительным последующие изменения уже построенной 3D-геометрии.

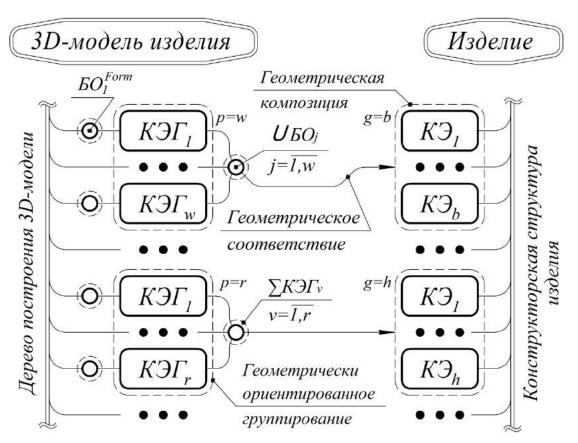


Рисунок 1.11 — Отображение структуры изделия принципом геометрического соответствия

Сформированная таким образом 3D-модель соответствует только первому типу моделей в классификации, представленной в упомянуто работе Д.Б. Козырева и Е.М. Абакумова [104].

Главным достоинством описания 3D-модели согласно формуле (1.47) является легкость построения результирующего 3D-образа с более низкими интеллектуальной нагрузкой на пользователя [249], временными и трудовыми затратами.

Однако, при данном подходе невозможно отображение изначально заложенного смыслового содержания 3D-модели (конструкторской структуры), поскольку акцент делается только на результирующую геометрию (а не на способ ее получения), а это вызывает дополнительные трудности при последующих внесениях изменений в сформированную 3D-геометрию. При таком подходе крайне затруднительно повторное использование проектных данных [139].

1.5.4 Принцип технологического соответствия

Конструкция изделия, как результат проектной деятельности на стадии ОКР, материализуется посредством последовательного выполнения набора технологических операций над исходной заготовкой. Б.А. Шкарин и Ю.В. Мокрецов в работе [222] предлагают структуру дерева построения 3D-модели изделия, соответствующую технологическому процессу (ТП) его изготовления, т.е. имеющую вид, представленный на рисунке 1.12 и выражением (1.48).

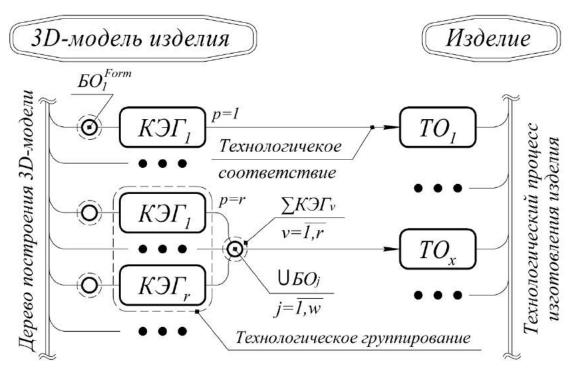


Рисунок 1.12 — Отображение структуры изделия принципом технологического соответствия

$$\mathcal{L}ep(Mo\partial_{H_{3\partial}}^{3D}) = \{K \ni \Gamma_k \middle| \bigcup_{j=1}^p K \ni \Gamma_j \to TO_i \}, k = \overline{I,n}, g = \overline{0,m}, p \le m, \qquad (1.48)$$

где TO_i — технологическая операция, выполняемая при изготовлении изделия, i — это порядковый номер TO, определяющий последовательность ее выполнения: $TO_i \prec TO_{(i+1)} \prec ... \prec TO_n$, n — количество TO_i , обеспечивающее «превращение» исходного материала в Kohcmp(U3d). В данной структуре каждая TO формируется некоторой последовательностью БО: $\bigcup EO_j \rightarrow TO_i$, $j = \overline{I,m}$.

Такая структура $\mathcal{L}ep(Mod_{\mathit{Изо}}^{\mathit{3D}})$ обеспечивает актуальность данных, предоставляемых 3D-моделью не только на стадии ОКР, но и на стадии технологической подготовки производства (ТПП), при этом отображая технологическую структуру изделия (ТСИ) [5]. Однако, возникает дополнительная сложность процесса построения 3D-модели, следствием которой является увеличение времени ее построения, а также требования к знанию ТП изготовления изделия.

Технологические процессы являются объектом автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и САПР ТП; подход к описанию знаний в таких системах описан в работе Б.В. Палюха и Г.Б. Бурдо [142].

Конструктор, как правило, наравне с технологом обладает информацией о технологических процессах, т.к. от них напрямую зависят технические свойства и параметры изготавливаемых изделий; однако CAD-системы используются, прежде всего, на стадии ОКР, для которой важнейшей и основной является информация именно о конструкции изделия [184].

Для наибольшей наглядности на рисунке 1.13 (страница 51) представлена 3D-модель изделия *«Корпус»* из состава микрополоскового модуля СВЧ (а) и два дерева ее построения, соответствующие принципам геометрического (б) и объектноориентированного (в) соответствия.

1.5.5 Анализ рассмотренных принципов

Сравнивая представленные выше принципы, становится понятно, что каждый из них обладает рядом сильных и слабых сторон, следовательно, оптимален синтез их ключевых преимуществ, а именно:

- 1. Удобство последующих процессов редактирования и изменения 3D-модели (как при принципе объектно-ориентированного соответствия), не нарушающих ее структурной целостности.
- 2. Предоставление дополнительных данных об изделии в дереве построения 3D-модели (аналогично принципу технологического соответствия), дающих полное информационное описание его конструкторской структуры на этапе ОКР.

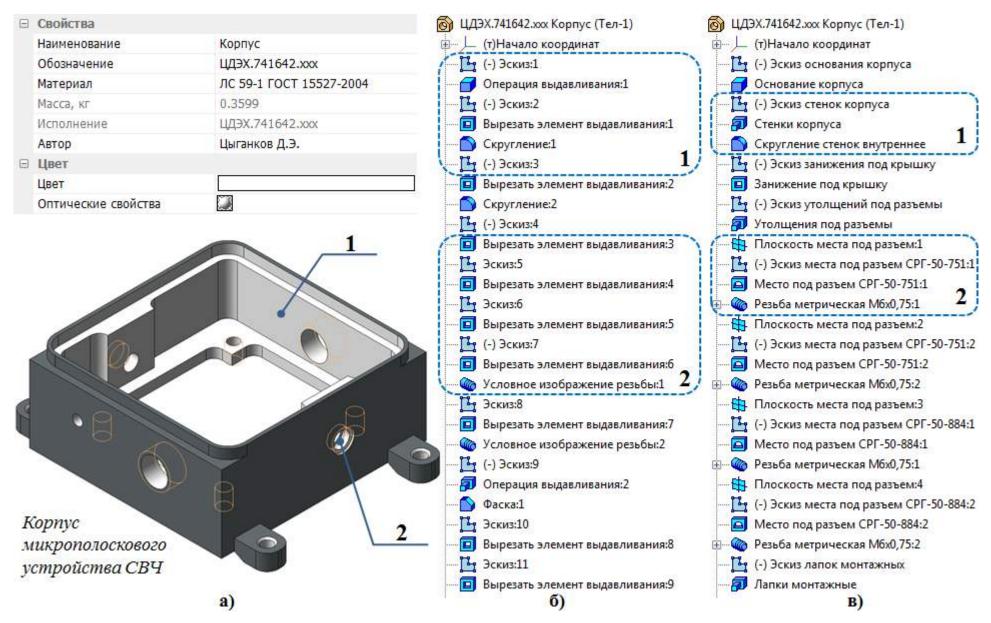


Рисунок 1.13 – 3D-модель изделия уровня *«Деталь»* (а) и деревья ее построения, сформированные на основе принципов геометрического (б) и объектно-ориентированного (в) соответствия

3. Легкость процесса построения 3D-модели, требующая минимальных интеллектуальных, временных и трудовых затрат (как при принципе геометрического соответствия), формирующего «смысловое» дерево построения согласно 2-му пункту, удобное для последующей модификации согласно 1-му пункту.

В настоящее время сформированная 3D-геометрия может быть отредактирована и изменена посредством различных способов и технологий, рассматриваемых в следующем разделе.

1.6 Подходы к построению модифицируемой 3D-модели изделия

Конструкция проектируемого изделия, формируемая по завершению работ на стадии ОКР, как правило, является предварительной [23], а не окончательной: после проведения испытаний она дорабатывается с учетом выявленных замечаний и новых требований, связанных, например, с обеспечением большей технологичности, повышением технико-эксплуатационных характеристик, снижением себесто-имости и др. [80, 88, 171].

Если на КД в виде твердых копий такая доработка может быть проведена путем ручных исправлений — добавлением, удалением или изменением номинала размеров и допусков, технических требований и самой графической информации, то для КД в виде 3D-модели доработка сводится к ее модификации [128].

Применительно к 3D-модели, *модификацией* называется изменение результирующей 3D-геометрии [129, 171], что на данный момент может быть обеспечено различными способами, рассматриваемыми далее.

Модификация также активно применяется при повторном использовании конструкторских решений в виде электронных 3D-моделей [241].

Для корректной модификации 3D-модели необходимо учитывать замысел конструктора, воспроизвести который другому пользователю (не являющимся автором данного решения) крайне затруднительно и зачастую просто невозможно. Следовательно, процесс модификации 3D-модели требует как трудовых и временных затрат, так и интеллектуальной нагрузки на пользователя.

1.6.1 Традиционный подход к модификации

Традиционный подход к модификации 3D-модели заключается в изменении значений входных параметров соответствующих БО для получения новой геометрии в соответствии с выражением (1.27). За основу берется уже сформированная структура 3D-модели (см. рисунок 1.8) и редактируется: дорабатывается или изменяется. При таком подходе, в общем случае, меняется как число КЭГ, так и количество входящих в их состав ГЭ:

$$Mo\partial_{H_{3\partial}}^{\prime 3D} = \{K \ni \Gamma_i\} \xrightarrow{modif} Mo\partial_{H_{3\partial}}^{\prime\prime 3D} = \{K \ni \Gamma_j\}, i = \overline{I,m}, j = \overline{I,m},$$
 (1.49)

т.е. в результате модификации, как правило, получается абсолютно новая структура 3D-модели: $Cmp(Mo\partial'^{3D}_{H3\partial}) \neq Cmp(Mo\partial'^{3D}_{H3\partial})$.

Модификация 3D-модели зависит от дерева ее построения [199, 241], которое в свою очередь привязано к используемой CAD-системе: при передаче в другую САПР (через форматы STEP, IGES и др.) дерево построения теряется, а следовательно, теряются и возможности для последующей модификации [138].

Перестраивание 3D-модели таким способом требует значительных временных затрат, сравнимых [73] с построением этой же модели с нуля; а изменение значений $\{nap_j^{EO_i}\}$, в общем случае, нарушает целостность [199] 3D-модели, что приводит к ошибкам в ее структуре (и геометрии).

1.6.2 Технология параметризации в задачах модификации

Параметрическое моделирование, на данный момент являющееся стандартом во всех CAD-системах [132, 199], базирующихся на технологии *«Feature-based Modeling»*, заключается в формировании 3D-моделей уровня ДСЕ, заданных в неявном виде — переменными и зависимостями между ними [24]. Т.е. 3D-модель модифицируется путем задания новых значений выделенным переменным:

при $j = \overline{1,m}$, $k = \overline{1,q}$, где $IIIa6_{Mod}^{3D}$ — это шаблон 3D-модели, т.е. заданный в неявном виде, x —переменная, принимающая диапазон значений [Знач₁, ..., Знач_m].

А.В. Параничев и И.В. Герасимов в работе [144] проводят классификацию всех основных методов параметризации в САD-системах. В работе Н.М. Боргеста, М.Д. Коровина и М.О. Спириной [23] рассматривается подход к автоматизации проектирования на основе параметризованных 3D-моделей.

В рамках технологии параметризации реализуется построение шаблонов типовых деталей, чему посвящена работа В.И. Аверченкова и М.Ю. Рытова [7], различных конфигураций изделий, что рассмотрено в работах П.И. Соснина и О.Э. Чоракаева [189, 190], а также формируются репозитарии унифицированных изделий, что представлено в работе Е.С. Горячкина, А.И. Рязанова, А.В. Урлапкина и Л.А. Чемпинского [168].

Несмотря на разнообразие подходов, они все основаны на формировании зависимостей, связывающих воедино все параметры. Если для простых деталей это сделать не вызывает трудностей, то для больших и конструктивно сложных деталей, состоящих их множества различных КЭГ, эта задача становится труднореализуемой [233, 236, 246] как в плане трудоемкости, так и требуемых временных ресурсов, что также отмечено в работе [80].

Е.А. Петракова в своей работе [147] описывает процесс параметрического построения сборочной 3D-модели изделия с использованием внешних данных, роль которых исполняет таблица MS Excel с конструкторскими данными.

А.А. Грибовский в работе [68] рассматривает и детально описывает получение параметрического представления 3D-моделей изделий, отмечая, что параметризация не может быть реализована в полностью автоматическом виде, а только при непосредственном участии человека, подразумевающем ручную доработку.

Модификация 3D-модели на основе параметризации также зависит от дерева построения [199], что ограничивает возможности ее применения используемой САПР. С.Е. Сляднев и В.Е. Турлапов в работе [187] описывают подход, позволяющий восстанавливать параметрическую 3D-модель изделия при ее передаче в сторонние САПР (без дерева построения); кроме того, в данной работе представлен детальный обзор работ зарубежных авторов по данному направлению.

Однако невозможно реализовать условные ветвления, позволяющие модифицировать структуру 3D-модели. Таким образом, в рамках параметризации возможно изменении только геометрии, описывающей конкретную структуру [230].

В современных САD-системах поддерживается параметризация как деталей, так и сборочных единиц [193, 205]: если при работе с деталями пользователь оперирует параметрами КЭГ, то при работе со сборками – параметрами сопряжений, т.е. ограничений, определяющих расположение и подвижность входящих в сборочную 3D-модель компонента.

1.6.3 Технология функционально адаптивного представления

Технология функционально адаптивного представления (**ФАП**), предложенная И.В. Горбачевым и А.Ф. Похилько [53], ставит своей целью достижение интероперабельности CAD-систем при передаче 3D-модели для ее модификации.

Сформированная 3D-модель передается вместе с исполняемым программным модулем — функционально адаптированной САПР (ФА САПР), разработанной на базе платформы *Open CASCADE Technology* [52]. ФА САПР обеспечивает построение 3D-модели на основе вводимых значений проектных параметров:

$$\Phi A \ CA\Pi P : \{ nap_j^{Moo} < x > \} \xrightarrow{x := 3Ha4} Moo_{H3o}^{3D} = \{ amp_k^{Moo} < 3Ha4 > \}, \quad (1.51)$$

при $j = \overline{1,m}$, $k = \overline{1,q}$, где nap_j^{Moo} — это j-ый выделенный параметр, описывающий непосредственно 3D-модель (а не формирующие ее БО, как в записи (1.50))

Технология функционально адаптивного представления, в отличие от традиционной параметризации, позволяет изменять не только геометрию, но и структуру 3D-модели за счет поддержки условных ветвлений в процессе ее формирования. Также появляется возможность закладывания физического смысла в проектные параметры, повышая информативность 3D-модели. В рамках технологии ФАП возможна работа как с 3D-моделями деталей, так и сборочных единиц.

3D-модель, сформированная в ФА САПР и переданная в другую систему, однако, утрачивает дерево построения. Ее дальнейшее редактирование возможно только в рамках заложенного в ФА САПР алгоритма [51].

Набор проектных параметров и алгоритм, обеспечивающий формирование результирующего 3D-образа, строго определены. Конструктору доступно только задавать значения, не вмешиваясь в программный алгоритм ФА САПР [52].

1.6.4 Компоновочная геометрия

Компоновочная геометрия (КПГ) — функционал нисходящего проектирования САПР «Компас-3D», направленная на обеспечение большей гибкости при разработке узлов, в которой задействовано несколько исполнителей. [126]. КПГ представляет собой файл — единую среду для всех участников проектирования, заменяя им ТЗ [106]. КПГ реализует модифицируемость сборочных моделей.

Как уже было отмечено, модификация сборок включает в себя как модификацию входящих в них компонент, так и сопряжений, определяющих их взаимное расположение. Компоновочная геометрия способна облегчить данную работу [39]. По своей сути, данная технология представляет собой параллельное нисходящее проектирование (в контексте единой сборки), поддерживающее ассоциативные связи и всю требуемую информацию для реализации проекта [106]. При изменении исходных данных, представленных в компоновочной геометрии, ассоциативно меняется и проектное решение.

В рамках КПГ 3D-модель проектируемого изделия может модифицироваться двумя путями: на уровне компонент, чему соответствуют локальные изменения, не меняющие сборку, а также на уровне самой КПГ в случае принципиальных изменений структуры сборочной модели. Детали-компоненты, проектируемые в контексте КПГ, собираются в сборочную единицу посредством требований, указанных в КПГ: исключительно геометрическими элементами, а не скрываемыми за ними элементами конструкции.

Как отмечено в работе [46], компоновочная геометрия служит для более простого и наглядного понимания ставившихся перед инженером задач.

1.6.5 Конструирование по базе знаний

Конструирование по базе знаний (англ. Knowledge-based Engineering, **КВЕ**) заключается в использовании в процессе параметрического моделирования (рассмотренного в подразделе 1.6.2.) базы знаний (**БЗ**) — содержащей формулы, расчетные правила, законы, а также системы уравнений и неравенств [111, 132]. Эти элементы связывают между собой геометрические и конструкторские параметры проектируемого изделия [111]. БЗ описывает конкретную предметную область, а следовательно, ориентирована на конкретный класс изделий.

Г.Б. Евгенев, А.А. Кокорев и М.В. Пиримяшкин в цикле работ [80, 82] описывают процесс создания интеллектуальных систем конструирования на основе продукционных БЗ, обеспечивающих полуавтоматическую генерацию 3D-моделей изделий. Базой таких БЗ служат модули знаний — правила-продукции вида: *если* [условие], то [действие]. И.А. Лёзин и Д.Е. Маркелов в статье [120] рассматривают реализацию автоматизированной классификации конструкторско-технологических элементов изделий (уровня *«Деталь»*) с использованием БЗ, которые в их работе также представлены набором правил *«если \rightarrow то»*.

П.И. Соснин и другие авторы в цикле работ [69, 162] описывают подход к проектированию, основанный на применении проектных онтологий, позволяющий накапливать и повторно использовать проектно-конструкторские знания в виде опытных единиц.

М.Л. Кантуреева, А.Л. Сеньковская и М.А. Болысбек в работе [93] описывают процедуру формализации проектирования продукционной БЗ на основе разделения на информационные единицы выбранной предметной области.

А.В. Рыбаков, С.А. Евдокимов и А.А. Краснов в статьях [146, 172] выделяют преимущества проектирования на основе БЗ перед традиционным, отмечая повышение производительности инженерного труда и снижение общей трудоемкости.

Н. Семидоцкий в публикации [179] демонстрирует широкие возможности САПР SolidWorks, реализующие технологию КВЕ. В.И. Калинцев и М.В. Лихачев в работе [92] рассматривают применение шаблонов КВЕ в САПР САТІА.

Поддержка условных ветвлений (продукционных правил Г.Б. Евгенева) позволяет более качественно и детально прорабатывать проект. Сформированная 3D-модель модифицируется изменением исходных данных как геометрически, так и структурно [243, 244]. Дерево построения при таком подходе играет вспомогательную роль, так как обращение к 3D-модели происходит через специальный интерфейс пользователя, предоставляющий всю необходимую информацию [239].

Конструирование по базе знаний предоставляет широкий функционал параметрического моделирования, позволяя аккумулировать и повторно использовать опыт и знания инженеров [240, 246].

1.6.6 Технологии прямого моделирования

Прямое моделирование (англ. Direct modeling) заключается в оперировании непосредственно граничными элементами 3D-модели: гранями, вершинами и ребрами с сохранением связности между смежными элементами [164]. Данная технология представляет 3D-модель без дерева ее построения, т.е. 3D-геометрия представляется «сплошной», состоя только из набора ГЭ [108, 203]. Прямое моделирование базируется на технологии B-Rep [211].

С учетом записи (1.22), модификация 3D-модели данным методом имеет вид:

$$Mo\partial'^{3D}_{U_{3\partial}} = \{ \Gamma \mathcal{I}'_{i} \} \xrightarrow{var(\Gamma \mathcal{I}_{i})} Mo\partial''^{3D}_{U_{3\partial}} = \{ \Gamma \mathcal{I}''_{i} \}, i = \overline{l,n}, j = \overline{l,m},$$
 (1.52)

где: $\{ \varGamma \mathfrak{I}'_i \}$ и $\{ \varGamma \mathfrak{I}''_i \}$ — это множества геометрических элементов до и после модификации соответственно.

Редактирование 3D-модели сводится к оперированию непосредственно геометрией «напрямую», позволяя нивелировать зависимость от используемой САD-системы при передаче геометрии в другие САПР (с потерей дерева построения) путем наложения ограничений на ГЭ [210], т.е. обращается только к описывающим эти элементы координатам.

Преимущества прямого моделирования представлены Д. Кондратьевым в его работе [108] и П. Хэмилтоном в работах [210, 211]. Л.В. Губич в монографии [90]

характеризует прямое моделирование как эффективное средство изменения геометрии без затрагивания дерева построения.

Р.В. Хохленков в своей книге [207] отмечает, что прямое моделирование разрушает замысел конструктора. Технология вариационного прямого моделирования (англ. *Variational Direct modeling*, *VDM*) лишена такого недостатка [32].

Вариационное прямое моделирование — это технология прямого моделирования без истории построения, отличительной особенностью которой является сохранение конструктивной концепции [32, 200] за счет явных и неявных геометрических ограничений, генерируемых в геометрическом решателе [33].

Д.М. Ушаков в работе [200] проводит сравнение различных подходов к 3D-моделированию, доказывая, что вариационное прямое моделирование является современной альтернативой традиционному параметрическому проектированию.

В настоящее время технология вариационного геометрического моделирования реализована в САПР «Компас-3D» [143].

1.6.7 Синхронная технология и ее аналоги

Синхронная технология (CT) (англ. Synchronous Technology) — это метод 3D-моделирования, комбинирующий возможности традиционного моделирования на основе дерева (истории) построения и прямого моделирования [178, 181]. Данный метод разработан Siemens PLM Software и как отмечается в [194] долгое время не был повторен ни в одной другой САПР.

Синхронная технология устраняет необходимость изучения метода построения 3D-геометрии с целью ее редактирования, позволяет вносить изменения независимо от истории ее создания [182].

В рамках СТ 3D-модель описывается комбинированным деревом, состоящим из трех частей [201]:

1. «Традиционное» дерево, представляющее собой набор КЭГ, сформированный при формировании 3D-геометрии, — его можно редактировать при модификации 3D-модели посредством изменения параметров соответствующих БО;

- **2.** Синхронные элементы, описывающие уже построенную 3D-геометрию, не связанные друг с другом связью «Родитель-потомок», предоставляющие операции прямого моделирования для управления ими;
- **3.** Упрощенное представление модели, позволяющее удалять и редактировать входящие в 3D-модель геометрические элементы.

«Синхронной» технология называется из-за одновременного наличия первых двух частей дерева построения 3D-модели. В работе [29] эти части описаны следующим образом: традиционные КЭГ показывают как модель была построена, а синхронные элементы – группировку ГЭ до уровня 3D-тел (т.е. то, из чего состоит построенная 3D-модель).

Важный момент был отмечен в той же работе [29], а именно: при построении нового синхронного элемента уже построенное дерево КЭГ исчезает, что в свою очередь говорит о строгой иерархии элементов в комбинированном дереве и способствует потере исходной информации, заложенной непосредственно через КЭГ в 3D-модель.

Комбинация дерева построения на основе КЭГ с прямым моделированием, как отмечает Д.М. Ушаков в другой работе [200], была реализована у компаний Autodesk и РТС: в обоих случаях она основанная на распознавании дерева построения заново после выполнения синхронных операций над 3D-моделью.

1.6.8 Сравнительный анализ рассмотренных технологий

Очевидно, что каждая из рассмотренных в данном разделе технологий обладает как сильными, так и слабыми сторонами: их сравнительный анализ по наиболее значимым показателям представлен в таблице 1.1 (страница 61); в таблице 1.2 (страница 62) представлены САПР, реализующие рассматриваемые технологии.

Наиболее простыми в изучении являются системы на основе дерева построения 3D-модели, при этом процесс построения и редактирования 3D-модели достаточно трудоемок и требует значительных временных затрат. При этом именно простота изучения и работы являются фактором, определяющим широкое распространение данного подхода.

 Таблица 1.1

 Сравнительный анализ методов формирования редактируемой 3D-геометрии

	Традиционное и параметрическое конструирование	Компоновочная геометрия	Конструирование по базе знаний	Функционально адаптивное представление	Прямое моделирование	Синхронная технология	Прямое вариационное моделирование	
Трудоемкость:								
• изучения	Низкая	Низкая	Высокая	Высокая	Низкая	Средняя	Низкая	
• построения								
3D-модели	Средняя	Средняя	Низкая	Низкая	Средняя	Низкая	Низкая	
• редактирования								
3D-модели	Высокая	Средняя	Низкая	Низкая	Низкая	Низкая	Низкая	
Временные затраты:								
• на построение								
3D-модели	Высокие	Высокие	Низкие	Низкие	Высокие	Высокие	Высокие	
• на редактирование								
3D-модели	Высокие	Средние	Низкие	Низкие	Средние	Средние	Средние	
Модификация						Г		
3D-геометрии	Геометрическая Геометрическа		метрическая и структ	ическая и структурная		Геометрическая и струг		
Целостность	Геометрическая и		Facularing		Гаалаттинааная			
3D-модели			Геометрическая и конструкторская		Геометрическая			
Информативность	Отображение конструкции изделия / Отображение конструк-							
3D-модели	торской структуры – в дереве построения 3D-модели			Отображение только конструкции изделия			1Я	
Работа с импортиро-	Отсутствует			Частично	Полимоти и постионого			
ванной 3D-моделью				поддерживается	Полностью реализуется			
Распознавание кон-	Отсутствует Поддерживаетс					Поддаржираета		
структивной концепции						поддерживается		

 Таблица 1.2

 Поддержка подходов к формированию редактируемой 3D-геометрии в современных САПР (САD-системах)

	Традиционное и параметрическое конструирование	Компоновочная геометрия	Конструирование по базе знаний	Функционально адаптивное представление	Прямое моделирование	Синхронная технология	Прямое вариационное моделирование
Компас-3D	+	+	+	-	-	-	+
NX	+	+	+	-	-	+	-
Creo	+	-	+	-	-	+	-
CATIA	+	-	+	-	-	+	-
Inventor	+	-	+	-	-	-	-
SolidWorks	+	+	+	-	+	-	-
Solid Edge	+	-	-	-	-	+	-
T-Flex	+	+	+	-	-	-	-
BricsCAD	-	-	-	-	+	-	+
Open CASCADE	-	-	+	+	-	-	-
FreeCAD	+	-	+	-	-	-	-
C3D Toolkit	-	+	+	+	-	-	-

Специализированные программные средства, ориентированные на конкретные задачи (на основе технологии ФАП и КВЕ) трудно реализуются (за счет программного алгоритма и установления параметрических зависимостей), но крайне просты в работе, т.к. взаимодействие с пользователем сводится к заданию исходных данных через специальные диалоговые окна.

Временные ресурсы, затрачиваемые на создание и модификацию 3D-модели, минимальны при использовании ФАП- и КВЕ-систем, т.к. пользователь оперирует лишь предварительно выбранными исходными данными, не обращаясь непосредственно к геометрии. Создание же 3D-геометрии другими из рассмотренных способов занимает значительное время.

При традиционном параметрическом и прямом моделировании реализуется только геометрическая модификация: посредством изменения значений параметров, описывающих составляющие 3D-тело КЭГ. При этом в остальных подходах за счет поддержки условных ветвлений реализуется и структурная модификация.

Под целостностью 3D-модели понимается ее корректность: геометрическая целостность означает корректно сформированный 3D-образ (не нарушающий заложенные в геометрическое ядро правила), а конструктивно-функциональная целостность — актуальность «скрываемой» за 3D-моделью конструкции изделия в заданной предметной области. Если геометрическая целостность обеспечивается инструментарием CAD-системы, то конструктивно-функциональная целостность задается нормативными документами, а также замыслом конструктора.

Технологии, представляющие 3D-модель на основе дерева построения, способны отображать информацию о конструкторской структуре изделия (что было рассмотрено в разделе 1.5). Подходы на основе прямого геометрического моделирования отображают лишь конструкцию – конкретный экземпляр (в соответствии с формулой (1.19)) без какой-либо конструкторской информации о его структуре.

Работа с импортированной 3D-геометрией (Д.М. Ушаков в работе [200] называет ее «немой») не поддерживается в системах на основе дерева построения, т.к. обращение к 3D-модели происходит через набор БО, уникальный для каждой САПР. Ключевое преимущество систем прямого моделирования — обращение

непосредственно к 3D-геометрии, т.е. работа с ней напрямую. Технология функционально адаптивного представления обеспечивает работу с импортированной 3D-геометрией лишь частично: в рамках заложенного в ФА САПР алгоритма.

В статье [200] и электронных ресурсах [32, 33] заявлено, что технология вариационного прямого моделирования способна распознавать конструктивную концепцию 3D-модели. При этом стоит учитывать, что конструктивная концепция, согласно определению, данному в [113] регламентирует поведение только 3D-геометрии (с сохранением ее целостности), но не замысел конструктора (смысловое содержание), т.е. соответствия в виде формул (1.43) и (1.45).

Из таблицы 1.1 также видно, что ключевые преимущества противоположно представлены у следующих двух технологий:

▶ Конструирование по базе знаний:

- Обеспечение геометрической и конструкторской целостности 3D-модели,
- Отображение конструкторской структуры проектируемого изделия,
- Низкие временные затраты на создание и модификацию 3D-геометрии;

▶ Прямое вариационное моделирование:

- Работа со структурными элементами 3D-геометрией непосредственно,
- Распознавание конструктивной концепции 3D-модели.

Подход, сочетающий в себе выделенный выше набор показателей, позволит значительно повысить эффективность процесса конструирования за счет снижения временных затрат на построение и редактирование 3D-модели изделия с сохранением ее конструктивно-функциональной целостности, а также повышения информативности 3D-модели (за счет отображения КСИ) и возможности аккумулирования проектных знаний и их повторного использования.

1.7 Унификация конструкторских решений в САД-системах

Унификация проектных решений на уровне ДСЕ – это эффективное средство [107, 206, 228] снижения временных затрат на разработку КД и повышения ее качества ввиду снижения количества ошибок и применения уже отработанных на

предприятии конструкций и технологических процессов. Унификация тесно связана с конструкторско-технологической классификацией изделий, что рассматривают В.И. Аверченков и В.Л. Жога в работе [8], в которой также отмечается, что важнейшим признаком изделия является его геометрическая форма.

Во всех современных САD-системах унификация конструкторских решений в виде 2D-чертежей и фрагментов, а также 3D-моделей реализуется способами, представленными далее.

1.7.1 Способы обобщения конструкторских решений

• Библиотека 2D-фрагментов и 3D-моделей

Простейшим средством являются библиотеки готовых решений, представляющие собой хранилища 2D-фрагментов и 3D-моделей [251], объединенных по какому-либо (зачастую, конструктивному) признаку.

В своей книге [98] М.И. Кидрук отмечает, что такие библиотеки нацелены на предоставление проектировщикам возможности сформировать свой набор наиболее используемых типовых элементов, чтобы облегчить к ним доступ при разработке новых чертежей или моделей.

Такие библиотеки хранят в себе уже сформированные геометрические данные [97]. Пользователь может выбрать готовый результат и работать с ним в дальнейшем [99]. Как правило, каждый элемент добавляется в работу вместе с деревом построения. Д.Б. Козырев и Е.М. Абакумов в работе [103] рассматривают создание таких справочников 3D-моделей компонент изделий.

• Библиотека шаблонов 2D-фрагментов и 3D-моделей

Более сложным инструментом являются библиотеки шаблонов — особый вид пользовательских прикладных библиотек, содержащих параметризированные 2D-фрагменты или 3D-модели [251], а также таблицы переменных [98].

Библиотеки шаблонов представляют геометрию в параметризованном виде, позволяя избавить инженера от необходимости ручной доработки выбранного

элемента библиотеки [97, 99]. Закладывание условий и ограничений на параметры позволит задавать определенный класс компонент с общей спецификой.

При работе с такой библиотекой пользователь выбирает нужный шаблон и задает значения описывающим его переменным, получая на выходе конкретное решение (экземпляр), которое также можно модифицировать в дальнейшем. Пример формирования библиотеки шаблонов 3D-моделей представлен в работе А.Е. Капранова и Н.М. Прис [94]. А.А. Грибовский в работе [68] доказывает труднореализуемость унификации на основе параметрического моделирования.

• Специализированная пользовательская библиотека

Так как первые два способа обеспечивают лишь традиционный и параметрический подход к построению 3D-моделей, они не способны в полной мере обобщить проектные решения [253], – это обеспечивается специализированными пользовательскими библиотеками – гибкими функциональными приложениями [85, 98].

Формирование таких библиотек основано на программировании посредством *API*-интерфейса (англ. *Application Programming Interface – интерфейс прикладно-го программирования*). Очевидно, что процесс построения таких инструментов достаточно трудоемок [252], однако они являются мощным инструментом, ориентированным под конкретную решаемую задачу и предметную область [238, 253].

Также пользовательские библиотеки можно формировать с помощью *макро-сов* – записей действий пользователя в CAD-системе при построении 3D-модели; пример работы с макросом рассмотрен В.С. Бабаниным в его работе [13].

1.7.2 Сравнительный анализ рассмотренных способов

Все представленные выше способы унификации проектных решений в САDсистемах применяются в проектной деятельности конструкторов [250], т.к. решают различные задачи; их сравнительный анализ представлен в таблице 1.3.

Очевидно, что библиотеки готовых конструкторских решений наиболее просты в формировании, тогда как библиотеки шаблонов и специализированные библиотеки требуют определенных трудовых затрат на их формирование, прежде всего, в связи с заданием параметрических зависимостей и ограничений; последний тип библиотек, кроме того, требуют знаний и навыков программирования.

 Таблица 1.3.

 Сравнительный анализ способов унификации проектных решений в САПР

	Библиотека решений	Библиотека шаблонов	Специализированная библиотека
Трудоемкость формирования	Низкая	Средняя	Высокая
Степень автоматизации:			
• выбора элемента	Низкая	Низкая	Высокая
• модификации элемента	Отсутствует	Средняя	Высокая
Навыки программирования	Не тр	Необходимы	
Обобщение проектных решений	по любому признаку	Геометрическое подобие	Структурное подобие
Подход к построению редактируемой геометрии	Традиционное моделирование	Параметрическое моделирование	Конструирование по базе знаний

Первый тип библиотек обеспечивает минимальную автоматизацию при выборе хранящихся в ней компонент, при этом автоматизация модификации и редактирования не поддерживается — пользовать при необходимости самостоятельно редактирует выбранный элемент, однако при этом обобщение проектных решений может проводиться по любому признаку (на усмотрение инженера).

Второй тип библиотек обеспечивает модифицируемость элементов за счет задания шаблона в неявном виде (параметризованно), т.е. модифицируется только результирующая 3D-модель, но не ее структура (ввиду отсутствия условных ветвлений), а следовательно проектные решения обобщаются до уровня геометрического подобия. Группа шаблонов также может обобщаться по любому признаку.

Третьему типу библиотек свойственна высокая степень автоматизации при выборе элементов с их последующим редактированием и модификацией за счет поддержки условных ветвлений, позволяющие изменять не только геометрию, но и скрываемую за нею структуру конструкторского решения. Такие библиотеки наиболее эффективно обобщают решения до уровня структурного подобия [252].

Все рассматриваемые библиотеки схожи тем, что обеспечивают предоставление информации о конструкции выбранного проектного решения (на уровне 3D-модели) лишь в момент его выбора — за счет логических переменных, а также атрибутов *PMI* (англ. Product Manufacturing Information — информация о производстве изделия) [131]. Взятый в работу 3D-объект представляется как экземпляр конструкции, а информация о его структуре генерируется конструктором аналитически. Тем не менее, применение библиотек позволяет раскрывать замысел конструктора для инженеров, являющихся только пользователями, а не авторами.

1.8 Выводы и рекомендации по Главе 1

Результатами обзора, проведенного в первой Главе настоящей диссертационной работы, являются следующие выводы:

- 1. Конструкторская структура изделия содержит в себе всю информацию, необходимую для этапа конструкторского проектирования, связывая функциональную структорскую, определяющую номинальный принцип действия изделия и конструкторскую документацию, описывающую его конструкцию, определяющую внешний и физический облик изделия. Именно КСИ задает семантическое содержание проектного решения;
- **2.** Инженерная деятельность во всех современных CAD-системах, основанных на технологии *«Feature-based modeling»*, реализуется посредством базовых проектных операций, процедурно определяющих конструктивные элементы геометрии, составляющие 3D-модель;
- **3.** Известные подходы к построению модифицируемой 3D-модели имеют свои преимущества и недостатки, по набору которых выделяются: конструирование по базе знаний и технология прямого вариационного моделирования. Реализуя принципиально различающиеся алгоритмы формирования 3D-геометрии, данные подходы не способны в полной мере автоматизировать процесс конструкторского проектирования по следующим причинам:

- параметрически задаваемые зависимости (ограничения) определяют лишь геометрическую и структурную корректность формируемой 3D-модели без обеспечения ее конструктивно-функциональной целостности;
- *«распознавание»* конструктивной концепции позволяет обращаться только к геометрическим элементам, задающим 3D-геометрию, но не за скрываемыми за ними структурными единицами конструкции, обладающими фиксированным физическим смыслом.
- **4.** Отображение конструкторской структуры изделия в САD-системе значительно повышает информативность 3D-модели. Единственная структура, в которой она может быть представлена это дерево (история) построения 3D-модели. Известные подходы к такому отображению либо не отображают семантическое содержание структурных элементов, не позволяя пользователю однозначно верно воспроизводить его, либо труднореализуемы как по временным затратам, так и по интеллектуальной нагрузке на конструктора;
- **5.** Библиотеки являются эффективным средством обобщения проектных решений в CAD-системе. Целесообразно использование библиотек всех типов при снижении степени обобщения до уровня фрагмента решения, что позволит избежать сложных алгоритмов их реализации и параметрических зависимостей.

Обобщая все представленные выше выводы, рекомендуется модель представления проектных решений в САПР, главные требования которой формулируются следующим образом:

- ▶ Отображение конструкторской структуры проектируемого изделия в виде иерархической структуры, описывающей 3D-модель непосредственно;
- ▶ Оперирование структурными единицами конструкции (далее обозначенными термином «конструктивно-функциональные элементы»), обладающими физическим смыслом в рассматриваемой предметной области проектируемого изделия, при построении и последующем редактировании 3D-геометрии;
- ▶ Обеспечение конструктивно-функциональной целостности и сохранения семантического содержания проектного решения в виде 3D-модели.

ГЛАВА 2 МЕТОДЫ КОНСТРУКТИВНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ЭТАПА КОНСТРУКТОРСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Качество производимых изделий, заключаемое в их функциональных характеристиках, технологичности и надежности, а также себестоимости, в полной мере определяется КД и задается разработчиком на этапе конструирования [237].

Достижению высоких значений данных показателей способствует повторное использование отработанных технически грамотных проектных решений [246], эффективность которого зависит от их информационного представления в САПР.

В настоящей главе представлены методы конструктивно-функциональной поддержки проектирования, основанные на термине *«семантическое содержание»* проектного решения — информации (данных), отражающей его конструктивнофункциональную специфику в терминах заданной предметной области [249].

Глава начинается с раздела, посвященного закладыванию и отображению в САПР информации о конструкторской структуре изделия, – исходных данных для этапа технического проектирования.

2.1 Отображение конструкторской структуры изделия в дереве построения 3D-модели в CAD-системе

На основании анализа рассмотренных в разделе 1.5 подходов к отображению конструкции изделия в САПР формируется т.н. *«Принцип структурного соответствия»*, сочетающий в себе набор признаков, выделенных в подразделе 1.5.5.

2.1.1 Принцип структурного соответствия

Принцип структурного соответствия заключается в *биективном отображении* конструкторской структуры проектируемого изделия в дереве построения его 3D-модели, что представлено на рисунке 2.1 и поясняется формулой (2.1):

$$\mathcal{A}ep(Mo\partial_{M30}^{3D}) = \{M\kappa O\delta_k \mid M\kappa O\delta_j \to K\Theta_j \}, k = \overline{l,n}, \qquad (2.1)$$

где $M\kappa O\delta_i - i$ -ый **макрообъект**, представляющий собой некую композицию КЭГ (что подробно рассматривается в следующем подразделе); такой макрообъект соответствует строго одному КЭ, а следовательно, имеет фиксированный физический смысл в предметной области проектируемого изделия $\Pi pO(U3d)$:

$$mean(Mean_k) \in \Pi pO(Hsd), k = \overline{1,n},$$
 (2.2)

таким образом, структура проектируемого изделия $Cmp^{K}(U3\partial)$ поэлементно повторяется в дереве построения его 3D-модели $\mathcal{L}ep(Mo\partial_{U3\partial}^{3D})$, а обе структуры $\kappa a\kappa$ множества являются равномощными:

$$\left| Cmp^{K}(H_{3\partial}) \right| = \left| \mathcal{A}ep(M_{0\partial_{H_{3\partial}}}^{3D}) \right|.$$
 (2.3)

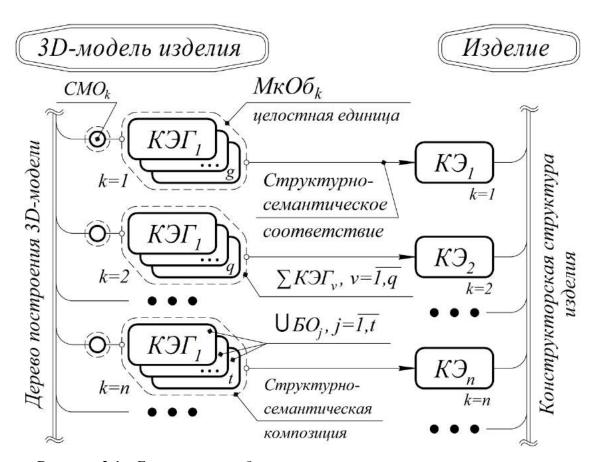


Рисунок 2.1 – Биективное отображение структуры проектируемого изделия

Формируемая по принципу структурного соответствия 3D-модель является не просто геометрией, получаемой булевыми операциями над абстрактными КЭГ, а системой трехмерных макрообъектов, описывающих структуру проектируемого

изделия непосредственно. Такая 3D-модель может рассматриваться как электронная структура изделия (**ЭСИ**) [36, 56, 109].

Выделенные в подразделе 1.5.5 признаки отражаются в принципе структурного соответствия следующим образом:

- 1. 3D-модель предоставляет дополнительную информацию о проектируемом изделии, отображая его конструкторскую структуру в дереве построения;
- 2. 3D-модель формируется и редактируется посредством задания (и изменения) значений описывающих конкретный макроэлемент параметров и атрибутов непосредственно, сохраняя свою структурную (и смысловую) целостность.

На данном принципе основан одноименный **метод**, заключаемый в *информационно-смысловой композиции* КЭГ до уровня макрообъекта, отображающего согласно записи (2.1) один элемент конструкции изделия, т.е. обладающего фиксированным физическим смыслом, в связи с чем, такой макрообъект далее по тексту обозначается термином *«семантический макроэлемент геометрии* (СМЭГ)».

2.1.2 Семантический макроэлемент геометрии: критерии и состав

3D-модель изделия, состоящая из набора КЭГ согласно выражению (1.22), по методу структурного соответствия рассматривается как совокупность СМЭГ:

$$Mo\partial_{H_{3\partial}}^{3D} = \sum_{i=1}^{n} CM \Im \Gamma_i$$
 (2.4)

где $CM\Im\Gamma_i$ – i-ый семантический макроэлемент геометрии, который описывается аналогично системе (1.22) следующим образом:

$$\begin{cases}
CM \ni \Gamma_i = \sum_{j=1}^m K \ni \Gamma_j, \\
CM \ni \Gamma_i = \langle \Gamma \ni_k \rangle, k = \overline{1, q},
\end{cases}$$
(2.5)

т.е. СМЭГ обладает признаками как 3D-модели $Mod_{H_{30}}^{3D}$ (в плане своей структуры, описываясь согласно выражению (1.22)), так и конструктивного элемента геометрии (в плане своего поведения и определения посредством проектной процедуры).

3D-модель, описываемая как совокупность СМЭГ согласно записи (2.4), далее по тексту обозначается термином *«конструкторская 3D-модель»*.

Критериями, отличающими СМЭГ, являются:

• Смысловое содержание

СМЭГ отображает реальный элемент конструкции проектируемого изделия, предоставляя пользователю требуемую для текущего этапа (прежде всего, конструктивно-функциональную) информацию о нем: геометрическую, текстовую и др.

• Целостность

СМЭГ является неделимым, т.е. входящие в его состав абстрактные КЭГ недоступны для взаимодействия с пользователем. Внутренняя структура СМЭГ задается алгоритмически – процедурой, определяющей его поведение.

• Регламентированное поведение

Предварительно задаваемые алгоритмы процессов формирования и модификации СМЭГ обеспечивают как геометрическую (со стороны САD-системы), так и смысловую (со стороны конструкции изделия) корректность выходных данных.

Биективное соответствие между структурой 3D-модели и конструкцией изделия в виде $CMЭГ \rightarrow KЭ$ позволяет однозначно верно воспринимать результирующий 3D-образ, обращаясь не к геометрии, а к «скрытому» за ней смысловому (семантическому) содержанию, отображающему конструктивно-функциональную специфику, т.е. *замыслу конструктора*.

Взаимосвязи между СМЭГ в составе 3D-модели также обладают смысловым содержанием, обеспечивая отображение конструкторской структуры изделия – как иерархической системы КЭ согласно формуле (1.8).

СМЭГ, являясь целостной системой – составной частью геометрической 3D-модели, описывается аналогично записи (1.21) следующим образом:

$$CM \ni \Gamma_i = \{ UMЯ, id, amp_i^{CM \ni \Gamma_i} < 3нач > \}, j = \overline{1,m},$$
 (2.6)

где $\mathit{Имя}$ — наименование i-го СМЭГ, несущее смысл в предметной области изделия: $\mathit{Имя}(\mathit{CMЭ\Gamma}_i) \in \mathit{ПрO}(\mathit{Изd})$ — отображаемое пользователю для его смыслового восприятия, id — это идентификатор i-го СМЭГ, а $\mathit{Знaч}$ — значение j-го атрибута $\mathit{amp}_j^{\mathit{CMЭ\Gamma}_i}$, который в отличие от $\mathit{amp}_j^{\mathit{KЭ\Gamma}_i}$ обладает физическим смыслом; для каж-

дого $K\Im\Gamma_k\in CM\Im\Gamma_i$ $amp_q^{K\Im\Gamma_k}=f(amp_j^{CM\Im\Gamma_i})$, т.е. внешние атрибуты СМ $\Im\Gamma$ определяют «внутренние» атрибуты» К $\Im\Gamma$ и, что очевидно, входящие в их состав $\Gamma\Im$.

Критерием «семантического» атрибута $amp_j^{CM \ni \Gamma_i}$ и его наименования является их соответствие конструктивно-функциональным атрибутам и названию отображаемого СМ \ni Г структурного элемента конструкции изделия соответственно.

Идентификатор id определяет i-ый СМЭГ как экземпляр класса всех СМЭГ, имеющих единое наименование, и, следовательно, общее смысловое содержание.

Фиксация семантического содержания СМЭГ реализуется на двух уровнях:

- **1 уровень** геометрическая корректность СМЭГ: отсутствие ошибок при описании 3D-объекта геометрическим ядром используемой САD-системы;
- **2 уровень** семантическая корректность СМЭГ: актуальность конструктивнофункциональных характеристик отображаемого 3D-образом КЭ в предметной области проектируемого изделия *ПрО(Изд)*.

Если первый уровень обязательно выполнятся в современных САПР, то второй — далеко не всегда [218, 231]. Их совместная реализация способствует оперированию не составляющими 3D-геометрию КЭГ, а «заложенными» в них смысловыми элементами конструкции изделия.

Такие элементы с фиксированным смыслом в заданной предметной области, отображаемые СМЭГ, детально рассматриваются в следующем разделе.

2.2 Концепция конструктивно-функционального элемента изделия

Модульный принцип проектирования изделий машиностроения разработан и представлен Б.М. Базровым в книге [16]. Применительно к этапу конструирования (как к частному случаю определения, данного в [16]) модульный принцип заключается в построении различных конструкций изделий, отличающихся характеристиками и свойствами, путем компоновки их из *типовых элементов*.

В настоящем исследовании в качестве такого типового элемента выступает конструктивно-функциональный элемент, рассматриваемый далее.

2.2.1 Конструктивно-функциональный элемент: определение и критерии

Конструктивно-функциональный элемент (КФЭ) в настоящем исследовании определяется как структурный элемент изделия (элемент конструкции [71]), отличающийся двумя критериями: конструктивной и функциональной целостностью, а также фиксированным смысловым содержанием в заданной предметной области.

КФЭ представляется как система следующим образом:

$$\begin{cases}
K\Phi \mathcal{J}_{i} = \sum_{j=1}^{m(i)} \Phi \mathcal{J}_{j}, Kohcmp(K\Phi \mathcal{J}_{i}) = def; \\
K\Phi \mathcal{J}_{i} = \sum_{k=1}^{p(i)} K \mathcal{J}_{k}, \Phi'(K\Phi \mathcal{J}) = const;
\end{cases} (2.7)$$

где $K\Phi \ni_i$ – это i-ый конструктивно-функциональный элемент.

Конструктивная целостность КФЭ заключается в технической реализации (материализации) набора функциональных элементов $\{\Phi \mathcal{F}_j\}_{j=1}^m \in K\Phi \mathcal{F}_i$ строго в **одной** конструктивной единице $Koncmp(K\Phi \mathcal{F}_i)$, не содержащей других $\Phi \mathcal{F}$. Данному критерию соответствует первая запись в системе (2.7).

Функциональная целостность КФЭ означает, что набор конструктивных элементов $\{K\mathcal{G}_k\}_{k=1}^p \in K\Phi\mathcal{G}_i$ как целостная система обладает определенной функциональностью $\Phi'(U\mathfrak{G})$, имеющей фиксированный физический смысл в структуре изделия. Этому критерию соответствует второе выражение в системе (2.7).

Под данное выше определение КФЭ подходят *структурные элементы*, выделенные С.М. Латыевым в его работе [119], к которым он относит:

- <u>Рабочие элементы</u> **(РЭ)**, выполняющие регламентированные функции изделия непосредственно;
- <u>Базовые элементы</u> **(БЭ)**, обеспечивающие координацию изделия относительно других изделий в процессе сопряжения;
- <u>Соединительные элементы</u> (СЭ), служащие для материальной связи рабочих и базовых элементов друг с другом;
- <u>Технологические элементы</u> (ТЭ), требуемые для реализации технологического процесса изготовления изделия и его последующей сборки.

Также в работе [119] отмечено, что одни и те же структурные элементы могут играть роль как РЭ, так и БЭ и СЭ; а наиболее благоприятный вариант — это объединение в конструкции РЭ и БЭ при минимизации СЭ.

КФЭ, как структурный элемент, с учетом выражений (1.4) и (1.10), описывается следующим образом:

$$K\Phi \ni_i = \{ U_{MS}, nap_i^{K\Phi \ni_i} < 3\mu a \nu > \}, j = \overline{1,m},$$
 (2.8)

где $\mathit{Имя}$ — это наименование i-го КФЭ, предоставляющее пользователю информацию о его конструктивно-функциональной специфике, $\mathit{nap}_{j}^{\kappa \phi \ni_{i}}$ — это j-ый параметр i-го КФЭ, описывающий его конструктивные или функциональные характеристики аналогично $\mathit{nap}_{j}^{\kappa \ni_{i}}$ и $\mathit{nap}_{j}^{\phi \ni_{i}}$ соответственно.

Основное преимущество КФЭ как элемента структуры изделия — его информативность, заключаемая в предоставлении конструкторских данных, связывающих его *«идею»* и *«материализацию»*, и обобщенных до семантически целостной единицы, что в сумме позволяет эффективно применять модульный принцип проектирования за счет типизации элементов по конструкторским и функциональным признакам одновременно.

2.2.2 Конструкторская структура изделия как система КФЭ

Конструкторская структура изделия, описываясь согласно ГОСТ 53394-2017 выражением (1.8), как *система КФЭ* представляется следующим образом:

$$Cmp^{K}(U3\partial) = \{ K\Phi \mathcal{F}_{i}, Ce_{i,j}^{K\Phi \mathcal{F}} \}, i = \overline{1,n}, j = \overline{1,n},$$
 (2.9)

где $K\Phi \ni_i - i$ -ый конструктивно-функциональный элемент в составе конструкторской структуры изделия, $Ce_{i,j}^{K\Phi \ni}$ — взаимосвязи между i-ым и j-ым КФ \ni .

Данное выше конструктивно-функциональное представление КСИ также является частным случаем общей структуры изделия согласно записи (1.1). Графическое отображение конструкторской структуры, сформированной из КСИ, представленной на рисунке 1.3 (которая в свою очередь основана на ФСИ, представленной на рисунке 1.2) как система КФЭ в соответствии с записью (2.9), пред-

ставлено на рисунке 2.2. Такое представление может рассматриваться как частный случай описания конструкции по принципу, представленному в работе [232].

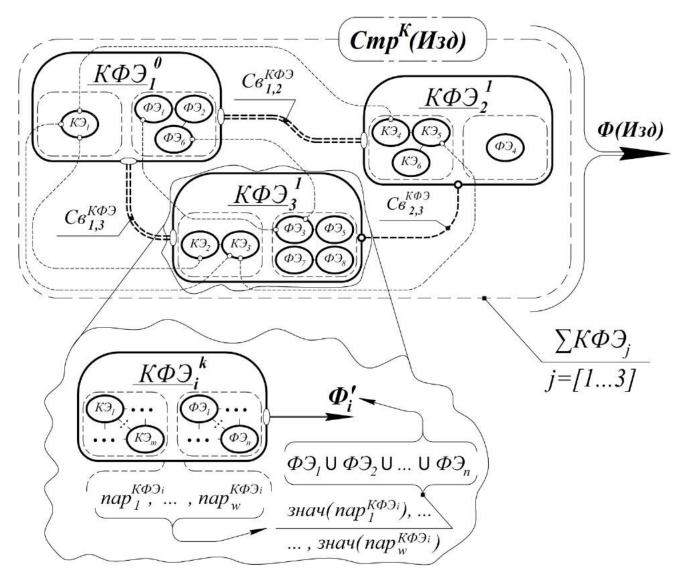


Рисунок 2.2 – Конструкторская структура изделия (КСИ) как система КФЭ

Метод конструктивно-функционального представления КСИ (системой КФЭ) в соответствии с формулой (2.9) лежит в основе структурно-функциональной декомпозиции, впервые описанной в работе [213].

Результирующая функциональность изделия достигается объединением комплексных функций, реализуемых всеми КФЭ, – т.е. аналогично записи (1.5):

$$\bigcup_{i=1}^{n} \Phi'(K\Phi \mathcal{F}_i) \to \Phi(U\mathfrak{F}_i), \qquad (2.10)$$

где $\Phi'(K\Phi \ni_i)$ — номинальная функциональность *i*-того КФЭ, определяемая значениями параметров КФЭ согласно записи (2.8):

$$\sum_{i=1}^{m} 3 \operatorname{Hay}(\operatorname{nap}_{j}^{K\Phi \mathfrak{I}_{i}}) \to \Phi'(K\Phi \mathfrak{I}_{i}), \qquad (2.11)$$

а с учетом выражения (2.10):

$$\bigcup_{i=1}^{n} \left(\sum_{j=1}^{m} 3 \mu a \nu \left(nap_{j}^{K \Phi \Theta_{i}} \right) \right) \to \Phi(\mathcal{U}_{3} \partial). \tag{2.12}$$

Конструкция изделия, описываемая такой КСИ (см. выражение (2.9) и рисунок 2.2.), формируется путем компоновки используемых КФЭ:

$$\sum_{i=1}^{n} K\Phi \mathcal{I}_{i} \to Kohcmp(U3\partial), \qquad (2.13)$$

а с учетом выражения (2.8):

$$\sum_{i=1}^{n} \left(\sum_{j=1}^{m} 3 + \alpha u(nap_{j}^{K\Phi \Theta_{i}}) \right) \to Kohcmp(U3\partial). \tag{2.14}$$

Таким образом, согласно записям (2.12) и (2.14) номинальная функциональность изделия $\Phi(U \circ \partial)$ и экземпляр его конструкции $Kohcmp(U \circ \partial)$ определяются значениями одних и тех же параметров – $nap_j^{K \circ \partial_j}$.

Принцип модульности заключается в оперировании непосредственно параметрами типовых элементов: задавая их различные значения $nap_{j}^{K\Phi \ni_{i}}$, формируется экземпляр конструкции i-го КФ \ni , ассоциативно связанный с другими так, что система $Cmp^{K}(\mathit{U}3d)$ остается конструктивно и функционально целостной.

Взаимосвязи между КФЭ – $Ce_{i,j}^{K\Phi\Theta}$ определяют иерархичность КСИ, для реализации которой вводится термин *«структурный уровень КФЭ»*, выступающий критерием дифференцирования КФЭ на два типа, рассматриваемых далее.

2.2.3 Разновидности конструктивно-функциональных элементов

Структурный уровень КФЭ определяет конструктивную иерархию [10], задавая отношения *«родитель-потомок»* между КФЭ. В зависимости от структурного уровня КФЭ разделяются на *конструктивно-функциональную базу* (**КФБ**) и *конструктивно-функциональный фрагмент* (**КФФ**):

▶ Конструктивно-функциональная база изделия

Это КФЭ, определяющий конструктивную основу изделия: внешний облик и основные характеристики. Описываясь в соответствии с выражением (2.8), КФБ определяется преимущественно конструкторскими параметрами. Конструктивнофункциональная база характеризуется нижайшим (k=0) структурным уровнем, за счет чего относится ко всем остальным КФЭ только как *«родитель»*. На рисунке 2.2 конструктивно-функциональной базой изделия является элемент $K\Phi \mathcal{P}_{I}^{0}$ – *«родитель»* по отношению к $K\Phi \mathcal{P}_{2}^{1}$ и $K\Phi \mathcal{P}_{3}^{1}$.

▶ Конструктивно-функциональный фрагмент изделия

Это КФЭ, определяющий одну из подфункций, обеспечивающих номинальную функциональность всего изделия. Также описываясь согласно записи (2.8), КФФ определяется, главным образом, функциональными параметрами. Конструктивно-функциональный фрагмент характеризуется ненулевым ($k\neq 0$) структурным уровнем и относится к другим КФФ и как *«родитель»* и как *«потомок»*. На рисунке 2.2. конструктивно-функциональными фрагментами изделия являются элементы $K\Phi \mathcal{P}_2^I$, $K\Phi \mathcal{P}_3^I$ – *«потомки»* по отношению к $K\Phi \mathcal{P}_I^0$.

Для наглядности на рисунке 2.3 (страница 80) представлено выделение КФЭ из изделия уровня *«Деталь»* — корпуса микрополоскового модуля СВЧ. Как видно на данном рисунке, каждый из выделенных КФЭ имеет фиксированный смысл в предметной области микрополосковых СВЧ устройств.

Информация о конструктивно-функциональных атрибутах изделия частично отображается в *децимальном номере* – *обозначении* изделия, определяемом классификаторами единой системы конструкторской документации (ЕСКД):

- о изделия уровня *«Деталь»* обозначаются в соответствии с их конструкцией и геометрией, из этого же принципа выбирается и *наименование*;
- изделия уровня «Сборочная единица» обозначаются в соответствии с их функциональным назначением и конструктивными исполнениями, наименование же, зачастую имея буквенно-цифровое обозначение, зачастую не несет непосредственно конструкторской информации.

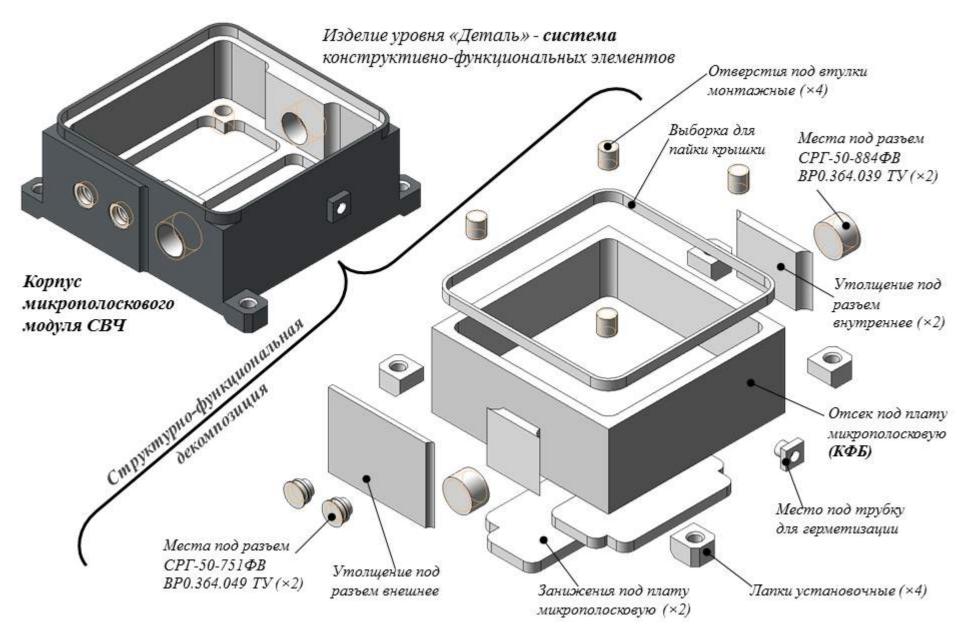


Рисунок 2.3 – Выделение конструктивно-функциональных элементов из изделия уровня «Деталь»

Обозначение и наименование КФБ, которая может рассматриваться как изделие уровня *«Деталь»*, определяется, прежде всего, ЕСКД, тогда как КФФ — спецификой предметной области *(ПрО)* проектируемого изделия.

Любое изделие уровня *«Деталь»* в своей конструкторской структуре содержит только одну КФБ и набор $\{ K\Phi\Phi_i \}, i=\overline{0,n}$, где n- это количество КФФ, ограниченное конструктивным исполнением изделия.

Генерация конструкторской структуры изделия и последующее формирование экземпляра конструкции реализуется в САD-системе посредством вызова и наполнения значениями т.н. *комплексных проектных операций*, обеспечивающих построение СМЭГ, отображающих 3D-образы КФЭ (КФБ и КФФ); такие операции детально рассматривается в следующем разделе.

2.3 Семантическая макрооперация как проектное действие в CAD-системе с конструкторским смыслом

Конструкторский замысел, содержащийся в проектном решении, последовательно закладывается при построении СМЭГ посредством комплексных проектных операций, в настоящем исследовании обозначаемых термином «семантическая макрооперация», представленном впервые на рисунке 2.1 как «CMO_k».

2.3.1 Определение и свойства семантической макрооперации

Семантическая макрооперация (СМО) — это композиция БО, обеспечивающая построение семантического макроэлемента геометрии, соответствующего одному конструктивно-функциональному элементу (КФБ или КФФ) проектируемого изделия [214, 217, 218]; СМО (в плане своей структуры) представлена на рисунке 2.4 и описывается следующим образом:

$$\begin{cases}
CMO_{i} = \bigcup_{j=1}^{m} BO_{j} < M_{j}^{nap}, \ \alpha_{j}^{CAD}, \ K_{j}^{K\Im\Gamma} >, \\
CMO_{i} : K\Phi \ni_{k} \to CM \ni \Gamma_{q},
\end{cases} , i = \overline{l,n}, \qquad (2.15)$$

СМО, являясь с точки зрения инженера (пользователя) целостной процессной единицей, описывается аналогично выражению (1.29):

 $CMO_i = \{id, \mathit{Имя}, \mathit{nap}_j^{\mathit{CMO}_i} < 3\mathit{haч} >, \ \gamma^{\mathit{CAD}}, \ \mathit{K}^{\mathit{CM9\Gamma}} \}, \ i = \overline{\mathit{I,n}}, \ j = \overline{\mathit{I,m}} \ ,$ (2.16) где $\mathit{Имя}$ — это наименование i-ой CMO вида «построение $\mathit{k\text{--}zo}\ \mathit{K}\Phi \mathit{9}$ », $\mathit{amp}_j^{\mathit{CMO}_i}$ — это j-ый параметр i-ой CMO, значение которого определяет результирующий q-ый СМЭГ как экземпляр $\mathit{CM3F}_q \in \mathit{K}^{\mathit{CM3F}}(\mathit{CMO}_i)$, где $\mathit{K}^{\mathit{CM3F}}(\mathit{CMO}_i)$ — класс СМЭГ, формируемых в результате выполнения i-ой CMO.

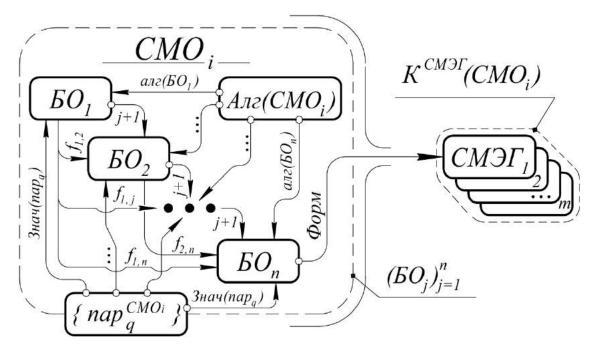


Рисунок 2.4 – СМО как композиция базовых операций САД-системы

Значения параметров *i*-той СМО определяют значения параметров входящих в ее состав БО: $3hau(nap_k^{EO_q}) = \delta(3hau(nap_j^{CMO_i})), k = \overline{l,w}, j = \overline{l,m}$, при этом каждый $nap_j^{CMO_i}$ имеет фиксированный смысл в заданной предметной области, воспринимаясь пользователем как *конструкторский параметр*, определяющий конфигурацию формируемого СМЭГ.

Критерий общности класса $K^{CMG}(CMO_i)$ – конструктивно-функциональное (семантическое) подобие формируемых СМЭГ в заданной предметной области.

Отличительными признаками СМО, сформированными на основе критериев СМЭГ, выделенных и рассмотренных в подразделе 2.1.2, являются:

- ► Семантическое содержание, определяемое актуальностью формируемого СМЭГ и описывающих его атрибутов в предметной области проектируемого изделия;
- ► Структурная целостность как проектной процедуры, определяемая обращением к СМО непосредственно при построении 3D-геометрии;
- ► Регламентированное поведение, представляющее СМЭГ как функцию от исходных данных, обеспечивающую их обобщение по смысловому подобию.

Важнейшим свойством СМО является ее фиксированное и однозначно верно воспринимаемое смысловое содержание, задаваемое ее алгоритмом.

2.3.2 Алгоритм семантической макрооперации.

Понятие конструкторского маршрута

СМО, формируемая путем информационно-смыслового обобщения базовых проектных операций САD-системы (см. рисунок 2.4), упорядочивает их в последовательности, обеспечивающие формирование q-го СМЭГ; при этом, как правило, используется не весь набор БО, а лишь его часть.

Последовательность базовых операций вида $EO_n \succ EO_{n-1} \succ ... \succ EO_2 \succ EO_1$, где $\{EO_n\} \in CMO_i$, обеспечивающая построение q-го CMЭГ, представляет собой маршрут его построения как экземпляр класса всех формируемых i-ой CMO:

$$\begin{cases}
KM_q = (BO_j)_{j=1}^{n(q)} \\
KM_q : CMO_i \to CM \ni \Gamma_q
\end{cases}, q = \overline{1,m}, KMq \in CMO_i.$$
(2.17)

Данный маршрут определяет выходные данные СМЭГ, т.е. конструкторские параметры соответствующих КФЭ, в связи с чем, в настоящем исследовании он обозначается термином «конструкторский маршрут (КМ)».

КМ определяется идентификатором формируемого СМЭГ (id(CMЭГq)) как экземпляр класса $K^{CMЭГ}$. Построение каждого q-го СМЭГ отличается как количеством, так и набором БО, т.е. внутри одной СМО реализованы различные КМ, обобщенные **смысловым подобием** формируемых ими СМЭГ:

$$CMO_i = \bigcup_{q=1}^m KM_q. (2.18)$$

Объединение таких КМ, реализуемых в рамках одной СМО в соответствии с выражением (2.18), обеспечивают ее комплексный алгоритм.

Процессная модель обобщения различных конструкторских маршрутов внутри одной СМО представлен на рисунке 2.5.

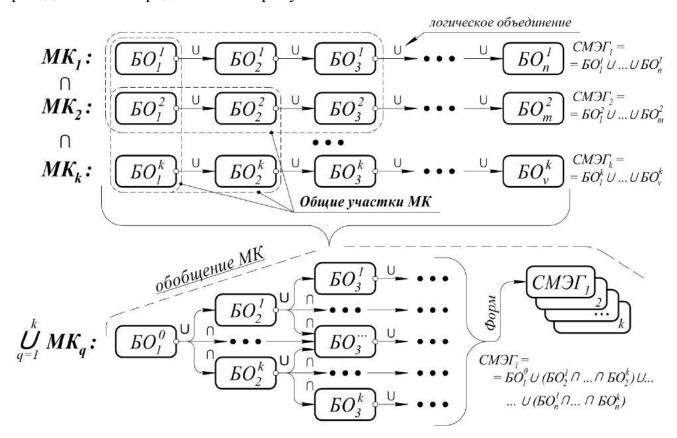


Рисунок 2.5 – К определению конструкторского маршрута в СМО

Как видно по рисунку 2.5, СМО состоит из набора проектных маршрутов, обобщаемых по общим участкам, т.о. алгоритм СМО имеет древовидную структуру: в зависимости от исходных данных выбираются участки (БО), способствующие построению требуемого конструкторского решения в виде q-го СМЭГ.

Древовидность структуры СМО определяется условными ветвлениями, основанными на связках вида *«если-то»*, в работах В.Г. Евгенева [3, 81, 82] называемых *«модулями знаний»*. В общем случае, после каждой j-ой БО в зависимости от исходных данных выполняется только одна (j+1)-я из m возможных БО. Такое «логическое» обобщение не поддерживается традиционным функционалом САПР и позволяет более качественно обобщать и параметризировать конструкторские решения.

Различные конструкторские маршруты СМО обеспечивают <u>структурную ва-</u> <u>риацию</u> конструкторских решений (при фиксации смыслового содержания), тогда как в рамках одного маршрута осуществляется лишь <u>геометрическая вариация</u>.

Выбор требуемого КМ определяется автоматически (за счет заложенных в программный алгоритм реализации i-ой СМО системы проектных ограничений в виде зависимостей и правил) на основании заданных значений исходных атрибутов $amp_i^{CMO_i}$. Эти входные данные определяют формируемый СМЭГ.

СМО, обеспечивая формирование и модификацию класса СМЭГ путем оперирования смысловыми атрибутами, становится основной **операцией конструирования** в САПР. Процессное описание отдельной СМО рассматривается далее.

2.3.3 Процессная модель семантической макрооперации

Представляя собой композицию БО согласно системе (2.15), каждая из которых как процесс описывается выражением (1.41), СМО также является процессом (комплексным), контекстно представленным в нотации IDEF0 на рисунке 2.6.

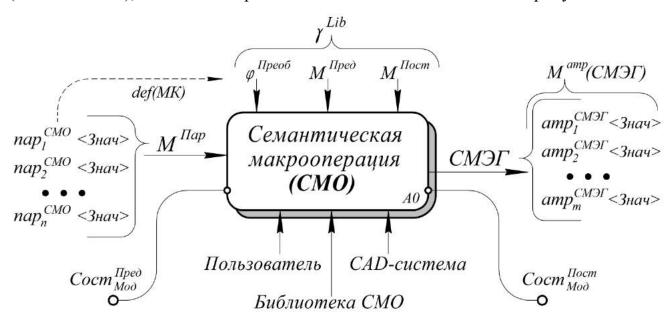


Рисунок 2.6 – IDEF0-диаграмма семантической макрооперации

Отличительные признаки СМО, ранее выделенные в подразделе 2.3.1, задаются компонентами IDEF0-диаграммы: входными, выходными и управляющими

данными (аналогичные соответствующим данным БО, представленным на рисунке 1.9), ключевые отличия которых рассматриваются далее по тексту.

▶ Входные данные СМО

СМО, согласно записи (2.15), наследует все параметры, описывающие как входящие в ее состав БО, так и связи между ними, содержащиеся в двух множествах: $M_{BO}^{\Pi ap} = \{M_i^{BO}, \dots, M_n^{BO}\}$ и $M_{Ce}^{\Pi ap} = \{M_{i,j}^{Ce}, \dots, M_{n,m}^{Ce}\}$ соответственно. Каждый параметр $nap_i^{BO_i} \in M_{BO}^{\Pi ap}$ и $nap_{i,j}^{Ce} \in M_{Ce}^{\Pi ap}$ определяется аналогично виду (1.31).

Множество параметров i-той СМО описывается следующим образом:

$$M^{\Pi ap}(CMO_i) = \{ nap_k^{CMO_i} < UMЯ, 3нач > \}, k = \overline{1,m},$$
 (2.19)

где $nap_k^{CMO_i} - k$ -тый параметр i-той СМО.

Семантическое содержание СМО *на входе* достигается *смысловыми* параметрами $nap_k^{CMO_i}$, имеющими фиксированный смысл в предметной области проектируемого изделия $\Pi pO(U3d)$. Таким образом, *i*-тая СМО описывается системой вида:

$$\begin{cases}
M^{\Pi ap}(CMO_{i}) = \{ nap_{k}^{CMO_{i}} \mid mean(nap_{k}^{CMO_{i}}) \in \Pi pO(M3\partial) \}, \\
f_{\alpha}^{CMO_{i}} : M^{\Pi ap}(CMO_{i}) \to M_{BO}^{\Pi ap} \cup M_{Cg}^{\Pi ap},
\end{cases}, i = \overline{1, n}, k = \overline{1, m} \quad (2.20)$$

где $f_{\alpha}^{CMO_i}$ — зависимость между $\{nap_k^{CMO_i}\}$, $\{nap_j^{EO_i}\}$ и $\{nap_{i,j}^{Ce}\}$ как элементами соответствующих множеств, определяемая алгоритмом реализации i-той СМО λ_i^{Lib} ; запись $mean(nap_k^{CMO_i}) \in \Pi pO(\mathit{U3d}.)$ означает, что каждый параметр $nap_k^{CMO_i}$ содержится в $\Pi pO(\mathit{U3d})$, т.е. несет конструктивно-функциональную информацию и, следовательно, определяет группу атрибутов СМЭГ, формируемых i-ой СМО.

Значение каждого $nap_k^{CMO_i}$ задается пользователем аналогично записи (1.32):

$$M^{\Pi ap}(CMO_i) = \{nap_k^{CMO_i} < Uмя, 3нач, Tun^{3haч}, Дon^{3haч}, Cnoc^{3haч} > \}, k = \overline{I,m},$$
 (2.21)

где $\mathit{Имя}$ — наименование $\mathit{nap}_k^{\mathit{CMO}_i}$ (отображаемое пользователю), а остальные обозначения — в соответствии с формулой (1.32), главным отличием от которой является то, что значение $\mathit{nap}_k^{\mathit{CMO}_i}$ — $\mathit{3hav}(\mathit{nap}_k^{\mathit{CMO}_i})$, его тип и допустимые значения

 $Tun^{3ha4}(nap_k^{CMO_i})$, $\mathcal{A}on^{3ha4}(nap_k^{CMO_i})$ определяются не только алгоритмом реализации БО внутри САПР, но и их актуальностью и корректностью в $\Pi pO(U3d)$.

Элементы множества $M^{\Pi ap}(CMO_i)$ – «**Входные данные**» СМО. При этом, с учетом взаимосвязей $nap_k^{CMO_i}$ друг с другом достаточным является лишь фиксированный набор $\{nap_k^{CMO_i}\}, k=\overline{I,g}, g\leq n$,, на основании которого расчетным путем могут быть получены все остальные $nap_k^{CMO_i}\in M^{\Pi ap}(CMO_i)$, а следовательно, и оба множества $M_{BO}^{\Pi ap}\cup M_{C_8}^{\Pi ap}$ в соответствии с выражением (2.20).

▶ Выходные данные СМО

Результатом выполнения *i*-той СМО является сформированный СМЭГ, рассмотренный в подразделе 2.1.2 и описываемый выражением (2.6). СМЭГ является «**Выходом**» СМО, что может быть описано следующим образом:

$$\begin{cases} CMO_{i}: \{3\text{Hay}(nap_{k}^{CMO_{i}})\} \rightarrow CM\Im\Gamma_{q} < U\text{MM}, id, amp_{j}^{CM\Im\Gamma_{q}} < 3\text{Hay} >, \\ \Pi pO(U3\partial): CM\Im\Gamma_{q} \rightarrow K\Phi\Im_{u} \in Cmp^{K}(U3\partial), \end{cases}$$
 (2.22)

множество описывающих q-й СМЭ Γ атрибутов $M^{amp}(\mathit{CM}$ Э Γ_q) определяется как:

$$M^{amp}(CM\Im\Gamma_q) = \{amp_j^{CM\Im\Gamma_q} < Mмя, Знач, Tun^{3haч} > \}, j = \overline{l,m},$$
 (2.23)

где $\mathit{Имя}$ — это наименование j-того атрибута $\mathit{nap}_k^{\mathit{CMO}_i}$, которое отображается пользователю, $\mathit{Знач}(\mathit{amp}_j^{\mathit{CMЭ\Gamma}_q})$ — значение данного атрибута, а $\mathit{Tun}^{\mathit{3haq}}(\mathit{amp}_j^{\mathit{CMЭ\Gamma}_q})$ — тип его значения. Главное отличие от $\mathit{amp}_j^{\mathit{\Gamma}_j}$ в выражении (1.35) заключается в фиксированном конструкторском смысле наименования и значений $\mathit{amp}_j^{\mathit{CMЭ\Gamma}_q}$ в предметной области проектируемого изделия: $\mathit{mean}(\mathit{amp}_j^{\mathit{CMЭ\Gamma}_q}) \in \mathit{ПpO}(\mathit{Изd})$.

Множество атрибутов $M^{amp}(CM\Im\Gamma_q)$ формируется на основе входных параметров $nap_k^{CMO_i}$ в виде зависимости:

Знач
$$(amp_j^{CM\Im\Gamma_q}) = \delta(3$$
нач $(nap_k^{CMO_i})), j = \overline{1,m}, k = \overline{1,v},$ (2.24)

а также включает в себя атрибуты, получаемые расчетным путем посредством алгоритма реализации i-той СМО λ_i^{Lib} .

Каждый $CMЭ\Gamma_q$ полностью определяется значениями атрибутов $amp_j^{CMЭ\Gamma_q}$ как в плане 3D-геометрии, так и в плане заложенной в нее конструкторской информацией [249].

 $\mathit{CMЭ\Gamma}_q$ является своего рода «*классом*» 3D-объектов — экземпляров, определяемых идентификатором $id(\mathit{CMЭ\Gamma}_q)$, получаемых значениями описывающих их атрибутов $\mathit{Зhav}(\mathit{amp}_j^{\mathit{CMЭ\Gamma}_q})$. Эти экземпляры, как элементы одного класса, объединены уже не геометрическим и структурным, а $\mathit{смысловым}$ подобием.

Основной информацией о $CM\Im\Gamma_q$ являются именно $3hau(amp_j^{CM\Im\Gamma_q})$, так как они предоставляют пользователю данные о формируемой конструкторской структуре изделия, и кроме того, значения $amp_j^{CM\Im\Gamma_q}$ q-того $CM\Im\Gamma_q$ могут быть ассоциативно связаны с атрибутами множества других $\{CM\Im\Gamma_i\}$ в структуре $Mo\partial_{M30}^{3D}$ согласно записи (2.4), обеспечивая геометрическую корректность $Mo\partial_{M30}^{3D}$ в САПР и конструктивно-функциональную целостность в $\Pi pO(M3d)$.

▶ Механизм СМО

Механизмы выполнения СМО аналогичны механизмам БО, рассмотренным в подразделе 1.4.2 первой Главы, к которым добавляется <u>библиотека семантических макроопераций</u>, выполняющая функции создания, хранения, вызова и редактирования СМО. Управление СМО осуществляется внутри библиотеки, а ее реализация – непосредственно в САD-системе.

▶ Управляющие данные СМО

Управление процессом выполнения СМО обеспечивается алгоритмом ее реализации λ_i^{Lib} , формируемым в библиотеке СМО; структурно λ_i^{Lib} аналогичен алгоритму выполнения БО α_i^{CAD} , представленному записью (1.37), а именно:

$$\lambda_i^{Lib}(CMO_i) = \langle M^{\Pi ped}, M^{\Pi ocm}, M^{MK}, \Phi^{\Pi peo6} \rangle, \tag{2.25}$$

где все обозначения – в соответствии с выражением (1.37).

Множество предусловий $M^{\Pi peo}$ выполнения i-той СМО определяется как:

$$M^{\Pi peo}(CMO_i) = \{ nap_k^{CMO_i} < \mathcal{I} on^{3ha4} >, Mo\partial_{H_{3\partial}}^{3D} < Cocm_{Moo}^{\Pi peo} > \},$$
 (2.26)

где $Cocm_{Moo}^{\Pi peo} = \{ \Gamma \mathcal{I}_i < amp_j^{\Gamma \mathcal{I}_i} > \}, i = \overline{I,n}$ — допустимое состояние 3D-модели для реализации i-той СМО. Таким образом, множество $M^{\Pi peo}(CMO_i)$ содержит два условия: $3hau(nap_k^{CMO_i}) \in \mathcal{I}_0 n^{3hau}(nap_k^{CMO_i})$ и $Cocm(Moo_{H3o}^{3D}) \in Cocm_{Moo}^{\Pi peo}$, выполнение которых обеспечивает геометрическую и структурную корректность исходных данных для выполнения i-ой СМО в текущий момент времени.

Множество постусловий $M^{Ilocm.}$ выполнения i-той СМО определяется как:

$$M^{\Pi ocm}(CMO_i) = \{ nap_k^{CMO_i} < \mathcal{A}on^{3Ha4} >, Mod_{M30}^{3D} < Cocm_{Mod}^{\Pi ocm} > \},$$
 (2.27)

где $Cocm_{Mod}^{\Pi ocm} = \{ \Gamma \mathcal{J}_i < amp_j^{\Gamma \mathcal{J}_i} > \}, i = \overline{I,n}$ — допустимое состояние 3D-модели после реализации i-той СМО. Таким образом, множество $M^{\Pi ocm}(CMO_i)$ содержит два условия: $3 \mu a u (nap_k^{CMO_i}) \in \mathcal{J}on^{3 \mu a u}(nap_k^{CMO_i})$ и $Cocm(Mod_{U30}^{3D}) \in Cocm_{Mod}^{\Pi ocm}$, выполнение которых обеспечивает геометрическую корректность сформированного $CM\mathcal{J}\Gamma_q$ и актуальность его смыслового содержания в $\Pi pO(U3d)$.

Множество маршрутов конструирования M^{MK} в i-ой СМО определяется как:

$$M^{MK}(CMO_i) = \{MK_j | MK_j = f(3\mu\alpha u(nap_k^{CMO_i})), Cocm(Mod_{M30}^{3D})\}, i = \overline{1, n}, \qquad (2.28)$$

где MK_j — j-ый маршрут конструирования i-той СМО, представляющий собой последовательность $(EO_j)_{j=1}^m \in CMO_i$, согласно записи (2.17) и рисунку 2.4, определяющий комплексный алгоритм преобразования $\varphi_i^{\Pi peo \delta}$:

$$MK_j$$
: Знач $(nap_k^{CMO_i}) \rightarrow \varphi_i^{\Pi peob}, \ j = \overline{l,m},$ (2.29)

а, следовательно:

$$\varphi_i^{\Pi_{peo6}} = MK_j(3hau(nap_k^{CMO_i})), j = \overline{1,m}, \qquad (2.30)$$

т.е. маршрут конструирования MK_j зависит от исходных данных в виде $nap_k^{CMO_i}$ и предусловий согласно выражениям (2.21), (2.26) соответственно и регламентирует, как именно будет реализовываться СМО путем определения алгоритма $\varphi_i^{\Pi peo \delta}$.

Множество комплексных алгоритмов преобразования $\Phi^{\Pi peo \delta}$ — основа алгоритма λ_i^{Lib} , определяющего «внутреннее» поведение i-той СМО, элементы которого $\{\varphi_i^{\Pi peo \delta}\}, i=\overline{I,n}$ описываются формулой:

$$\varphi_i^{\Pi peo \delta}: \{3 + a \cdot (nap_k^{CMO_i})\} \rightarrow \{3 + a \cdot (amp_j^{CM3\Gamma_q})\}, j = \overline{1, m}, k = \overline{1, m}, \qquad (2.31)$$

при этом $\varphi_i^{Преоб}$ содержит зависимости вида 3нач $(nap_j^{EO_i}) = \phi(3$ нач $(nap_k^{CMO_i}))$ и 3нач $(nap_{i,j}^{C_6}) = \phi(3$ нач $(nap_k^{CMO_i}))$, реализуемые посредством БО, входящих в состав i-той СМО, и представляет собой кортеж вида $\varphi_i^{Преоб} = < EO_i > , i = \overline{I,n}$.

Таким образом, задаваемые значения входных данных 3нач $(nap_k^{CMO_i})$ для выполнения i-той СМО являются одновременно и « $\mathbf{\mathit{Bxodom}}$ » и « $\mathbf{\mathit{Ynpagnehuem}}$ », определяя $\mathit{CMЭ}\Gamma_q$ как в плане его атрибутов, так и способа его формирования.

Обращение к $\{ EO_j \} \in CMO_i$ осуществляется в библиотеке СМО, обеспечивающей создание СМО и ее редактирование в плане процесса выполнения. И если в САD-системе СМО – это неделимая операция, выполняемая посредством задания значений исходных данных $3hau(nap_k^{CMO_i})$, то в библиотеке СМО она – комплексный древовидный процесс, определяемый правилами и атрибутами согласно записи (2.25), которые, в отличие от алгоритма выполнения БО (формула (1.37)), имеют фиксированное смысловое содержание в предметной области проектируемого изделия, обеспечивая тем самым конструктивно-функциональную целостность выходных данных семантической макрооперации.

Процессная модель семантической макрооперации (аналогично БО в соответствии с записью (1.41), согласно рисунку 2.6) представляется следующим образом:

$$CMO_{i}: \{3 \text{Hay}(nap_{k}^{CMO_{i}})\} \xrightarrow{\varphi_{i}^{\Pi peof}(MK_{i})} CM \ni \Gamma_{j}, \ k = \overline{1, n}, \ j = \overline{1, m}. \tag{2.32}$$

СМО, таким образом, представляет собой уже не абстрактное действие, а реальную *конструкторскую операцию* ввиду ее актуальности в предметной области проектируемого изделия. СМЭГ, формируемый в результате ее выполнения, отображает конструктивно-функциональный элемент изделия, рассмотренный в

разделе 2.2 данной Главы. Для выполнения СМО инженеру первичны не принципы работы с САD-системой, а знания проектируемого изделия и его конструкции.

СМО, фиксируясь в дереве построения 3D-модели $\mathcal{L}ep(Mod_{\mathit{Изо}}^{3D})$ и обеспечивая доступ к формируемым СМЭГ, превращает традиционное дерево построения в конструкторскую структуру изделия, что рассматривается в следующем разделе.

2.4 Конструкторское дерево построения 3D-модели

Конструкторская 3D-модель изделия — определяемая в соответствии с выражением (2.4), полностью описывается «конструкторским» деревом построения, предоставляющим информацию о конструкции изделия и устанавливающим вза-имосвязи между процессом ее построения (набором СМО) и результирующим 3D-образом (системой СМЭГ), формируя соответственно «динамическое» и «статическое» описания Mod_{Hio}^{3D} , рассматриваемые далее.

2.4.1 Статическое описание конструкторской 3D-модели

Статическое описание характеризует уже построенную 3D-модель, акцентируясь на ее конструктивно-функциональных свойствах и атрибутах, предоставляющих пользователю необходимую информацию о конструкторском решении.

Электронная 3D-модель, как конструкторское решение, обладает конструктивно-функциональной целостностью, последовательно закладываемой в процессе ее построения. Запись (2.4) определяет лишь типовой элемент структуры Mod_{IJ30}^{3D} , при этом взаимосвязи между СМЭГ задают ее целостность в САD-системе; т.о. описание конструкторской 3D-модели преобразуется в систему:

$$Mo\partial_{M30}^{3D} = \{CM\Im\Gamma_i, Ce_{i,j}^{CM\Im\Gamma}\}, i = \overline{1,n}, j = \overline{1,n},$$
 (2.33)

где $Ce_{i,j}^{CM\Im\Gamma}$ — взаимосвязи между i-ым и j-ым СМ $\Im\Gamma$. Такое «системное» описание $Mod_{II3\partial}^{3D}$ далее также называется cmpyкmyрным nреdсmавлением 3D-моdели и обозначается как $Cmp^K(Mod_{II3\partial}^{3D})$.

Каждый $CM \ni \Gamma_q \in Mod_{H_{3\partial}}^{3D}$ информационно описывается выражением (2.6), а множество взаимосвязей между ними может быть представлено как:

$$Ce_{i,j}^{CM\Im\Gamma} = \{amp_k^{Ce_{i,j}}\}, k = \overline{1,m}, i = \overline{1,n}, j = \overline{1,n},$$
 (2.34)

где $amp_k^{C_{B_{i,j}}}$ — это k-ый (из m) атрибут, задающий взаимосвязи между i-ым и j-ым СМЭГ (посредством входящих в него ГЭ), описываемый следующим образом:

$$amp_{k}^{Ce_{i,j}} = \{ \Gamma \ni_{k}^{CM \ni \Gamma_{i}}, \Gamma \ni_{k}^{CM \ni \Gamma_{j}}, Tun, \exists ha4 \}, k = \overline{1,m}, i = \overline{1,n}, j = \overline{1,m}, (2.35)$$

где m – количество ГЭ, участвующих во взаимосвязях между i-ым и j-ым СМЭГ.

Множество атрибутов $amp_{j}^{CM \supset \Gamma_{q}}$, характеризующих каждый $CM \supset \Gamma_{q} \in Mod_{M_{30}}^{3D}$, описывается согласно выражению (2.23).

Конструкторская 3D-модель, описываясь как система согласно записи (2.33), характеризуется собственным набором *конструкторских атрибутов*:

$$M^{amp}(Mo\partial_{H_{3\partial}}^{3D}) = \{amp_u^{Moo}\}, u = \overline{l,b}, \qquad (2.36)$$

где $amp_u^{Moo} - u$ -ый конструкторский атрибут, описывающий $Mod_{H_{30}}^{3D}$, каждый из которых определяется аналогично выражению (2.23):

$$M^{amp}(Mo\partial_{H3\delta}^{3D}) = \{amp_u^{Mo\delta} < Uмя, 3нач > \}, u = \overline{l,b},$$
 (2.37)

где Имя — наименование u-го amp_u^{Moo} , несущее конструкторское значение, воспринимаемое пользователем, а 3нau — значение этого атрибута.

Множество конструкторских атрибутов 3D-модели представляет собой <u>объединение</u> атрибутов входящих в ее состав СМЭГ, а также взаимосвязей между ними, т.е.: $amp_u^{Mo\partial} \in (\{amp_j^{CMЭ\Gamma_q}\} \cup \{amp_k^{Ce_{i,j}}\})$.

Значения конструкторских атрибутов, формируя конфигурацию СМЭГ в составе $Mod_{H_{2}\partial}^{3D}$, а также взаимосвязей между ними, определяют $Mod_{H_{2}\partial}^{3D}$ как экземпляр класса конструкторских моделей, описываемых выражением (2.33). Значения данных атрибутов задаются при вызове и реализации соответствующих СМО.

2.4.2 Динамическое описание конструкторской 3D-модели

Динамическое описание характеризует 3D-модель как процесс, акцентируясь на операциях, участвующих в ее формировании; взаимодействие инженера с которыми осуществляется посредством задания значений параметров последних. Общий случай динамического описания 3D-модели представлен на рисунке 2.7.

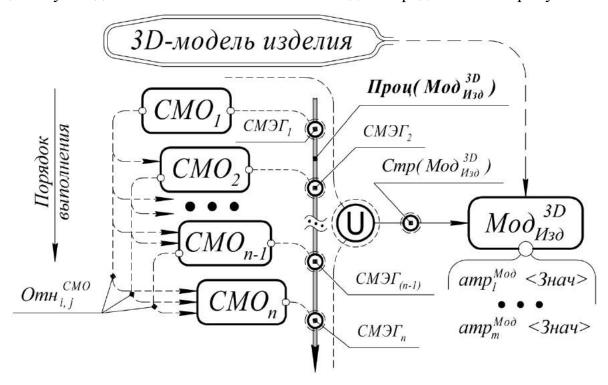


Рисунок 2.7 – Динамическое описание 3D-модели как последовательности СМО

Конструкторская 3D-модель изделия в плане своего формирования в CADсистеме представляет собой не что иное, *как процесс* – последовательное выполнение СМО, принимающий вид системы:

$$\begin{cases}
CAD : \bigcup_{j=1}^{n} CMO_{j} \to Mo\partial_{H_{3\partial}}^{3D}, \\
Mo\partial_{H_{3\partial}}^{3D} = \sum_{i=1}^{n} CM\Im\Gamma_{i},
\end{cases} (2.38)$$

где n — это количество выполняемых СМО, равное числу СМЭГ, входящих в состав $Mo\partial_{H_{3\partial}}^{3D}$. Объединение СМО формирует единую последовательность построения конструкторского решения $\Pi pou(Mo\partial_{H_{3\partial}}^{3D})$, описываемую как:

$$\Pi pou(Mod_{M30}^{3D}) = \bigcup_{i=1}^{n} CMO_{i} = CMO_{i} \cup CMO_{2} \cup ... \cup CMO_{n} , \qquad (2.39)$$

эта последовательность компактно записывается как $\Pi pou(Mo\partial_{U_{30}}^{3D}) = (CMO_j)_{j=1}^n$; далее по тексту обозначается термином *«процесс конструирования 3D-модели»*.

Как видно на рисунке 2.7, сформированная 3D-модель $Mo\partial_{H_{3}0}^{3D}$ описывается набором атрибутов amp_{u}^{Moo} , тогда как набор параметров $nap_{j}^{CMO_{i}}$ является исходными данными для ее построения (посредством задания их значений) и модификации (посредством изменения уже заданных значений).

Значения атрибутов amp_u^{Moo} , характеризующих экземпляр конструкторской 3D-модели, в общем случае, являются функциями от значений исходных параметров соответствующих СМО, т.е.:

Знач
$$(amp_u^{Moo}) = f^{\kappa}(3$$
нач $(nap_i^{CMO_i})),$ (2.40)

где f^{κ} — зависимость, определяемая внутренними алгоритмами СМО, составляющими процесс конструирования согласно записи (2.39), а следовательно:

$$\Pi pou(Mod_{H_{3\partial}}^{3D}): \langle 3hau(nap_i^{CMO}) \rangle \rightarrow \langle 3hau(amp_u^{Mod}) \rangle$$
, (2.41)

т.е. процесс конструирования 3D-модели, описываемый формулой (2.39), определяет как способ реализации зависимости (2.40), так и результирующие значения конструкторских атрибутов сформированной 3D-модели.

2.4.3 Взаимосвязь статического и динамического описаний 3D-модели

Статическое и динамическое представления 3D-модели дополняют друг друга в плане ее информационного (смыслового) описания, отображая данные, являющиеся важными в различных аспектах проектной деятельности:

- <u>Статическая модель</u> удобна при работе с экземпляром конструкторского решения: при анализе и обработке, т.к. отображает его структуру и параметры входящих в ее состав компонент наиболее важные данные для его описания;
- <u>Динамическая модель</u> полезна при модификации и повторном использовании конструкторских решений, т.к. позволяет вносить изменения в процесс их формирования, тем самым изменяя полученный результат.

Совмещение обоих способов описания 3D-модели позволит значительно повысить ее информативность, отображая конструкторские данные, актуальные во всех аспектах применения последней. Таким *«совмещением»* является конструкторское дерево построения 3D-модели, представленное на рисунке 2.8.

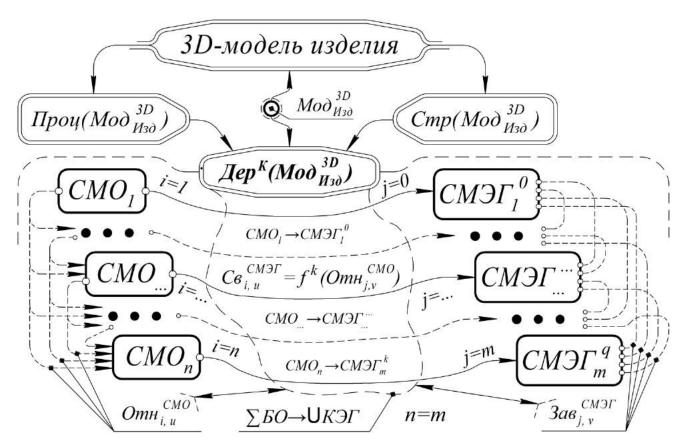


Рисунок 2.8 – Представление 3D-модели конструкторским деревом построения

Конструкторское дерево построения 3D-модели $\mathcal{L}ep^{\kappa}(Mo\partial_{H_{30}}^{3D})$ представляет собой ее комбинированное описание, принимающее в соответствии с выражениями (2.33), (2.38) и (2.39) следующий вид:

$$\mathcal{A}ep^{K}(Mo\partial_{U_{3\partial}}^{3D}):\langle CMO_{i}\rangle \rightarrow \{CM\Im\Gamma_{i}\}, i=\overline{1,n}, j=\overline{1,n},$$
 (2.42)

где n — это количество выполняемых СМО, равное числу СМЭГ, составляющих структуру $Mo\partial_{IJ30}^{3D}$; т.о. $\mathcal{L}ep^{K}(Mo\partial_{IJ30}^{3D})$ устанавливает взаимное соответствие между последовательностью СМО и системой СМЭГ.

Конструкторское дерево построения 3D-модели ассоциативно связывает конструкторское решение в виде $Mod_{H_{30}}^{3D}$ с процессом $\Pi pou(Mod_{H_{30}}^{3D})$ его формирования за счет задания зависимости f^{κ} из выражения (2.40), а следовательно:

$$\mathcal{L}ep^{K}(Mo\partial_{u_{3\partial}}^{3D}): < 3$$
нач $(nap_{v}^{CMO_{i}}) > \rightarrow < 3$ нач $(amp_{w}^{CM\supset\Gamma_{j}}) > ,$ (2.43)

т.е., в отличие от выражения (2.41) $\mathcal{L}ep^{\kappa}(Mo\partial_{H_{3\partial}}^{3D})$ определяет зависимость значений конструкторских атрибутов каждого $CM\mathcal{I}_i \in Mo\partial_{H_{3\partial}}^{3D}$ от входных значений параметров соответствующих СМО.

Зависимость f^k определяет связи $Ce_{i,u}^{CM\Im\Gamma}$ между СМ $\Im\Gamma$, формируемые на основе отношений $Omh_{i,v}^{CMO}$ между СМО, задаваемых при их вызове и выполнении.

Путем изменения значений входных данных $nap_j^{CMO_i}$ на выходе формируется класс конструкторский решений, обладающих *семантическим* (конструктивнофункциональным) **подобием**, что достигается посредством задания конструктивной концепции в дереве построения $\mathcal{L}ep^K(Mod_{H30}^{3D})$, рассматриваемой далее.

2.4.4 Задание конструктивной концепции

В САD-системе все СМО выполняются в строго очередном порядке: структура $\Pi pou(Mod_{M30}^{3D})$ задает $Cmp(Mod_{M30}^{3D})$ посредством отношений $Omh_{j,y}^{CMO}$ между ними, среди которых выделяются **3** частных случая:

- *i*-ая СМО обеспечивает возможность выполнения (n-1) последующих СМО: $CMO_i = \varphi_k^{nped}(CMO_q)$, $q \in [(i+1),...,n]$, т.е. она реализует предусловия их выполнения, например, производя модификацию исходной 3D-геометрии, формируя или изменяя набор ГЭ, используемых в качестве входных данных и т.п.
- *i*-ая СМО выполняется на основе вариационных зависимостей между описывающими ее параметрами (и входными и выходными) и параметрами (*i*-1) выполненных СМО: $CMO_i = \varphi_k^{eap}(CMO_q)$, $q \in [1,...,(i-1)]$, представленными как математическими формулами, так и табличными значениями.
- *i*-ая СМО *«заимствует»* в качестве входных данных набор ГЭ, сформированный *(i-1)* предыдущими СМО: $CMO_i = \varphi_k^{\text{геом}}(CMO_q)$, $q \in [1,...,(i-1)]$, под «заимствованием» понимается как непосредственное применение уже созданного ГЭ, так и привязка к нему путем сопряжений.

Эти частные случаи в указанном порядке соответствуют <u>иерархической</u>, <u>размерной (вариационной)</u> и <u>геометрической</u> параметризации [23, 132, 144].

При отсутствии отношений между СМО $\Pi pou(Mod_{H_{30}}^{3D})$ структурирован по временной очередности их выполнения.

Указанные выше отношения между СМО формируют множество:

$$OmH_{i,j}^{CMO} = \{\varphi_{i,j}\}, i = \overline{l,n}, j = \overline{l,n}, \qquad (2.44)$$

где $\varphi_{i,j} = (\Phi_{i,j}^{npeo} \cup \Phi_{i,j}^{sap} \cup \Phi_{i,j}^{seom})$ — совокупность комбинаций отношений указанных типов между i-ой и j-ыми CMO, таких, что $CMO_i = \varphi(CMO_q)$, $q = \overline{0,(i-1)}$.

Каждая *i*-ая СМО *в общем случае* ассоциативно, параметрически и очередно зависима от каждой уже выполненной CMO_i , $i \in [0, ..., i)$, а следовательно:

$$\Pi pou(Mo\partial_{M_{30}}^{3D}) = \{CMO_i \mid CMO_i = \bigcup_{j=0}^{(i-1)} \varphi_{i,j}(CMO_j)\}, i = \overline{I,n}, \qquad (2.45)$$

где запись $CMO_i = \bigcup_{j=0}^{(i-1)} \varphi_{i,j}(CMO_j)$ показывает совокупность отношений между текущей СМО и каждой из полуинтервала уже выполненных.

Последовательность СМО обеспечивает конструктивно-функциональную целостность, заложенную и полностью содержащуюся в $Cmp(Mod_{H_{30}}^{3D})$. Именно отношения между СМО $Omh_{j,y}^{CMO}$, определяемые при их выполнении, задают конструктивную концепцию $Mod_{H_{30}}^{3D}$ ($\underline{reomempuческую}$), что поясняется рисунком 2.9.

Каждая СМО характеризуется порядком p, определяющим очередность ее выполнения относительно других СМО, т.е. ... \prec $CMO_{(p-1)} \prec CMO_p \prec CMO_{(p+1)} \prec ...$ и определяемым зависимостями между СМЭГ: $p(CMO_i) = \delta(Omh_{i,j}^{CMO})$. Таким образом, $\Pi pou(Mod_{H30}^{3D})$ может быть представлен $\kappa a \kappa$ $\kappa opmes$:

$$\Pi pou(Mo\partial_{U_{30}}^{3D}) = \langle CMO_p \rangle, \ p = \overline{I,n} \ , \tag{2.46}$$

где n – количество СМО в последовательности, формирующей $Mo\partial_{H_{2\partial}}^{3D}$.

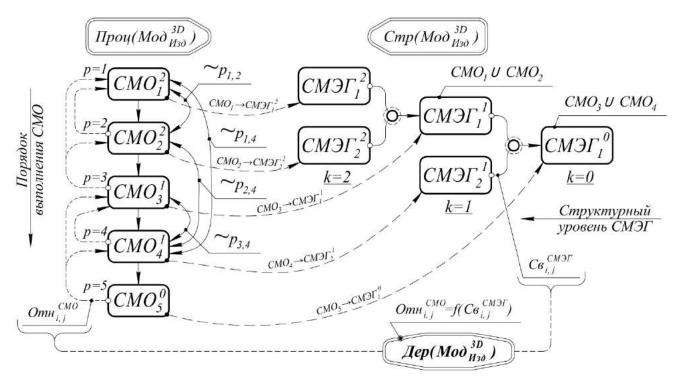


Рисунок 2.9 – Задание конструктивной концепции в дереве построения 3D-модели

Очередности выполнения СМО делятся на два типа:

- \circ *Строгие*, регламентированные согласно $Cmp(Mod_{M30}^{3D})$ в плане порядка их выполнения, смена которого принципиально изменит структуру конструкторского решения. Порядок выполнения СМО задается связями *«родитель-потомок»*; на рисунке 2.9 строгой является очередь: $CMO_1 \prec CMO_3 \prec CMO_5$.
- \circ *Свободные*, допускающие смену порядка, не влекущую за собой изменение структуры конструкторского решения, такие СМО являются независимыми друг от друга (с точки зрения последующих СМО). Как видно на рисунке 2.9, свободной является очередность выполнения CMO_1 , CMO_2 и CMO_4 , а следовательно: $(CMO_1 \prec CMO_2 \prec CMO_4) \cap (CMO_4 \prec CMO_1 \prec CMO_2) \cap ...$

3D-модель, описываемая выражением (2.4), реализуется в САПР технологией СSG, т.е. $\sum_{k=1}^{n} CM \Im \Gamma_k \xrightarrow{CSG} Mod_{M30}^{3D}$, где k – структурный уровень СМ \Im Г (аналогичный по смыслу структурному уровню К \Im Г, рассмотренному в подразделе 1.3.4.); она формируется согласно записи (2.46) последовательностью, обеспечивающей построения СМ \Im Г нижних уровней и восходящие операции над ними.

Таким образом (как видно на рисунке 2.9) в дереве построения устанавливается взаимосвязь между структурным уровнем СМЭГ и порядком выполнения СМО:

$$\mathcal{A}ep(Mo\partial_{IJ30}^{3D}): Om_{H_{i,j}}^{CMO} \xrightarrow{\Psi} Ce_{i,j}^{CM3\Gamma}, i = \overline{1,n}, j = \overline{1,n},$$
 (2.47)

где Ψ — способ установления взаимосвязей и зависимостей между СМЭГ в процессе построения 3D-модели, задаваемый последовательностью СМО и отображаемый в дереве построения, т.е. $\Psi = f(\mathcal{A}ep(Mod_{Hso}^{3D}))$.

Выражения (2.42) и (2.47), устанавливая соответствие между СМО и СМЭГ (а также отношения и взаимосвязи между ними) в конструкторском дереве построения Mod_{Hso}^{3D} , задают конструктивную концепцию проектного решения.

Процесс формирование проектного решения в виде электронной 3D-модели, представленной в САПР системой взаимосвязанных СМЭГ, на основе последовательного выполнения СМО, в настоящем исследовании обозначается термином «конструктивно-функциональное проектирование».

Формируя и отображая конструктивную концепцию, дерево построения способно предоставлять детальную информацию о конструкторской структуре проектируемого изделия, что рассматривается в следующем подразделе.

2.4.5 Отображение конструкторской структуры изделия

Информативность конструкторского дерева построения заключается в отображении проектного решения не только в виде семантически целостной единицы, но и в виде системы СМЭГ, формируемой последовательностью СМО, из которых каждый элемент актуален в предметной области проектируемого изделия.

Структура проектного решения является, по сути, спецификацией, отображающей конструктивно-функциональную информацию о нем, в связи с чем, метод отображения проектного решения в виде системы СМЭГ в настоящем исследовании обозначается термином «конструктивно-функциональное представление».

Следствие такого представления — отображение КСИ в дереве построения 3D-модели, поясняемое рисунком 2.10, на котором в качестве КСИ использована система КФЭ, представленная на рисунке 2.2 и описываемая выражением (2.9).

На данном рисунке видно, что каждый СМЭГ, формируемый в результате выполнения СМО, отображает строго один КФЭ, следовательно, $\Pi pou(Mod_{H30}^{3D})$ и $Cmp^{K}(U3d)$, как множества, равномощны, т.е.: $|\Pi pou(Mod_{H30}^{3D})| = |Cmp^{K}(U3d)|$.

При выполнении СМО также задаются отношения $Om H_{i,j}^{CMO}$ — важнейший элемент реализации конструктивной концепции, отображающий взаимосвязи между набором КФЭ — $Ce_{i,j}^{K\Phi\Theta}$, обеспечивая конструктивно-функциональную целостность проектного решения.

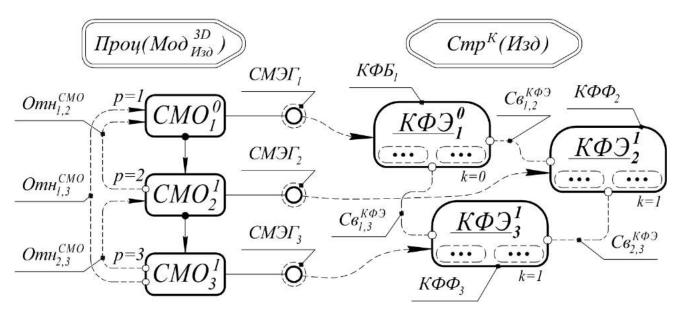


Рисунок 2.10 – Отображение КСИ в дереве построения 3D-модели

Пример отображения конструкторской структуры изделия уровня *«Деталь»*, а именно – корпуса из состава микрополоскового модуля СВЧ (как системы ранее выделенных КФЭ (см. рисунок 2.3)) представлен на рисунке 2.11 (Страница 101).

Как видно на рисунке 2.11 Конструкторская структура изделия уровня *«Де- таль»* отображается как последовательность СМО соответствующих иерархической системе взаимосвязанных КФЭ непосредственно в дереве построения 3D-модели. КФБ *«Отсек под плату микрополосковую»* находится на верхнем уровне иерархической структуры, являясь по смыслу конструктивной основой изделия; а последующие КФФ строятся как дочерние элементы, независимо друг от друга. Таким образом реализуется фиксация (закладывание), отображение и воспроизведение семантического содержания проектного решения в CAD-системе.

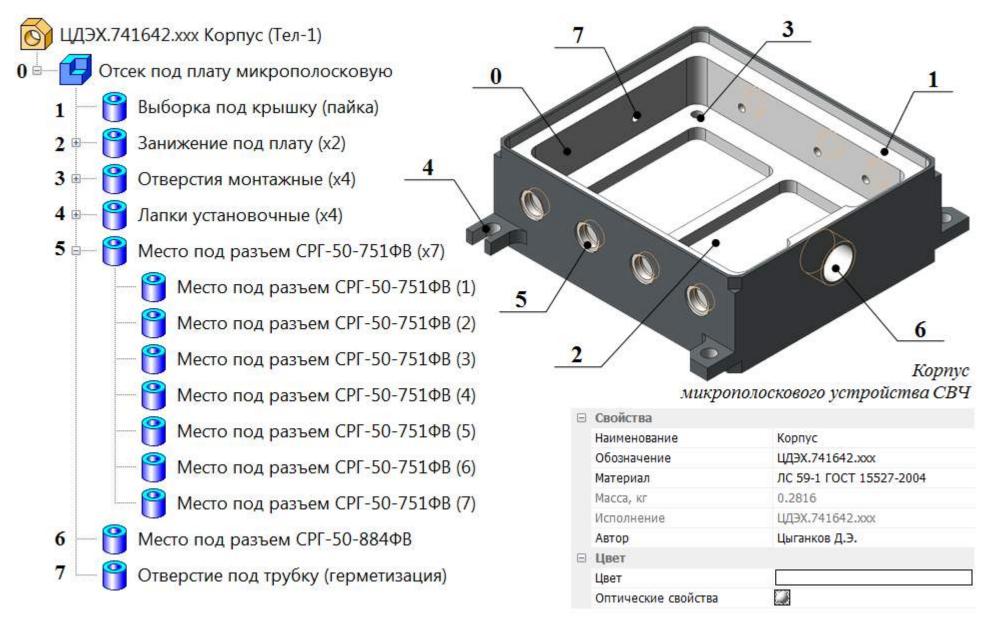


Рисунок 2.11 – Отображения конструкторской структуры изделия уровня *«Деталь»* в дереве построения его 3D-модели, образованным последовательностью СМО

Значения описывающих каждый КФЭ конструктивно-функциональных параметров $nap_i^{K\Phi \ni}$ определяются входными параметрами соответствующих СМО nap_i^{CMO} согласно рисунку 2.12.

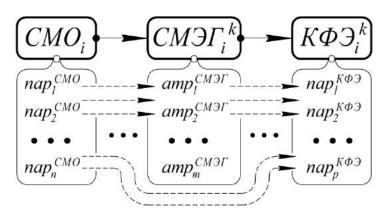


Рисунок 2.12 – Взаимосвязь значений параметров и атрибутов СМО, СМЭГ и КФЭ

Как видно, параметры КФЭ частично отображаются в СМЭГ (их смысловое содержание в таком случае является идентичным) и частично определяются входными данными СМО (на основе табличных и расчетных зависимостей). В результате КФЭ описывается набором $nap_i^{K\Phi 9}$, в который входит набор конструктивнофункциональных параметров, отображаемых как геометрически, так и в численно-текстовой форме. Сформированные значения $nap_i^{K\Phi 9}$ фиксируются в дереве построения при описании соответствующих макроэлементов.

Таким образом, пользователь в процессе конструирования в CAD-системе определяет требуемую конфигурацию проектируемого изделия (при выполнении CMO), оперируя терминами заданной предметной области.

Изменение значений входных параметров СМО nap_i^{CMO} изменяет маршрут конструирования в соответствии с выражением (2.17), формируя уже новый набор СМЭГ и, как следствие, новую конструкцию, отличающуюся как геометрически, так и структурно, но сохраняющую исходное семантическое содержание за счет использования обобщенных СМО из определенной предметной области.

В рамках одного сформированного дерева построения реализуется отображение класса семантически подобных конструкторских решений, что подробно рассматривается в следующем – заключительном подразделе.

2.4.6 Обобщенное дерево конструирования

Из всего представленного ранее в данном разделе следует то, что дерево построения является <u>основным</u> способом отображения всей заложенной в 3D-модель конструкторской информации о проектируемом изделии.

Проектная информация в дереве построения отображается на двух уровнях: • **верхний уровень** (уровень 3D-модели), содержащий принципиальные параметры, определяющие результирующее конструкторское решение (в виде Mod_{H30}^{3D}), а также параметры, общие для всех $CM\Im\Gamma_i \in Mod_{H30}^{3D}$;

о **нижний уровень** (уровень СМЭГ), содержащий локальные параметры, определяющие каждый отображаемый конструктивно-функциональный элемент.

По заданным значениям верхнего уровня формируется КФБ, являющаяся конструктивно-функциональной основой будущего изделия. Последующие КФФ строятся, опираясь на уже сформированный задел, обеспечивая конструктивнофункциональную целостность проектного решения, что реализуется набором пред- и постусловий выполнения соответствующих СМО. Таким образом, посредством СМО формируется семантически целостное конструкторское решение.

Процессная модель построения 3D-модели $\Pi pou(Mo\partial_{u_{30}}^{3D})$, определяемый согласно записи (2.39), имеет древовидную ветвящуюся структуру, в которой на каждом участке отображаются СМО, потенциально реализуемые на текущей стадии.

Общий случай формирования конструкторского решения в виде $Mod_{u_{30}}^{3D}$ посредством семантических макроопераций (в соответствии с выражением (2.38)) представлен на рисунке 2.13, и является не чем иным, как *процессной моделью проектной деятельности* в САПР. Представленная процессная модель реализует конструктивно-функциональную поддержку конструкторского проектирования.

Структуры, представленные на рисунках 2.5 и 2.13, отличаются принципиально. На рисунке 2.5 представлена система абстрактных БО, обобщенных только по смысловому содержанию выходных данных, тогда как на рисунке 2.13 — процесс, обладающая смыслом, как выходных данных, так и внутреннего строения.

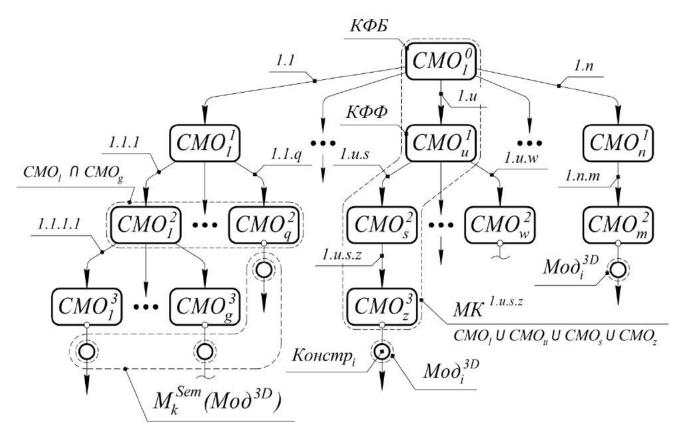


Рисунок 2.13 – Процессная модель проектной деятельности в САПР – Обобщенное дерево конструирования

Дерево построения $\mathcal{L}ep^{K}(Mo\partial_{H_{30}}^{3D})$ представляет собой обобщение маршрутов конструирования конструктивно грамотных и корректных конструкций проектируемого изделия:

$$\begin{cases}
\mathcal{L}ep^{K}(Mo\partial_{M3\partial}^{3D}) = \bigcup_{i=1}^{n} MK_{i}, \\
MK_{i} : \bigcup_{j=1}^{m} CMO_{j} \to Kohcmp_{i}(U3\partial),
\end{cases} (2.48)$$

где $Koнcmp_i(U3\partial)$ — это i-ая конфигурация конструкции проектируемого изделия, отображаемая 3D-моделью, формируемой последовательностью СМО:

$$CAD: Kohcmp_i(U3\partial) \rightarrow Mo\partial_{U3\partial}^{3D} = CMO_I^0 \cup ... \cup CMO_{n(i)}^{k(i)},$$
 (2.49)

где количество СМО определяется структурной и геометрической спецификой i-го исполнения и, как следствие, маршрутом конструирования MK_i . Таким образом, $\mathcal{L}ep^K(Mo\partial_{H_{30}}^{3D})$ является «depesom» в полном смысле этого слова, так как каждая ветвь определяет уникальный МК, что видно на рисунке 2.13.

Маршрут конструирования, фиксируемый в $\mathcal{A}ep^{\kappa}(Mo\partial_{u_{30}}^{3D})$, отображает в САD-системе и состав проектного решения (его структуру) и показывает, как эта структура формируется, — может рассматриваться и как *«история построения»* и как *«структура 3D-модели»* и, что наиболее важно, как *конструкторская структура проектируемого изделия*.

Управление конструкторским решением в САD-системе осуществляется деревом построения посредством добавления новых или редактирования (в т.ч. удаления) уже имеющихся СМО, а также изменением значений $nap_{j}^{CMO_{i}}$. В результате таких манипуляций формируется **новое проектное решение**. Но новым оно является исключительно в плане конструктивного исполнения, сохраняя изначальное смысловое содержание в виде $\underline{конструктивно-функциональной специфики}$.

Объектом, отображаемым конструкторским деревом построения, является, прежде всего, не конструкция изделия (экземпляр проектного решения), а класс конструкций, обобщенных по их смысловому содержанию:

$$\begin{cases}
\mathcal{L}ep^{K} : Mo\partial_{\mathcal{U}3\partial}^{3D} \to K_{u}^{Kohcmp}(\mathcal{U}3\partial), i = \overline{1,n}, \\
K_{u}^{Kohcmp}(\mathcal{U}3\partial) = \left\{Kohcmp_{i}(\mathcal{U}3\partial) \mid \Phi'(Kohcmp_{i}(\mathcal{U}3\partial)) = const\right\},
\end{cases} (2.50)$$

где u — идентифицирующий номер класса $K^{Kohcmp}(U3\partial)$, определяемый КСИ (см. рисунок 1.4), т.е.: $u = f(Cmp^K(U3\partial))$.

Модификация конструкторского дерева построения обеспечивает формирование класса 3D-моделей, соответствующих экземплярам класса $K^{\text{Констр}}(\text{Изд})$:

$$\begin{cases}
\mathcal{A}ep^{K}(Mo\partial_{H_{3\partial}}^{3D}) \xrightarrow{mod} \mathcal{M}_{w}^{Sem}(Mo\partial_{H_{3\partial}}^{3D}) \\
M_{w}^{Sem}(Mo\partial_{H_{3\partial}}^{3D}) = \{Mo\partial_{iH_{3\partial}}^{3D} \mid Mo\partial_{iH_{3\partial}}^{3D} \rightarrow Kohcmp_{i}(H_{3\partial}) \in K_{u}^{Kohcmp}(H_{3\partial})\},
\end{cases} (2.51)$$

где $M_w^{Sem}(Mo\partial_{u_{3\partial}}^{3D})$ – класс 3D-моделей, имеющих *семантическое* (смысловое) **по- добие**, заключающееся в отображении конструкторских решений с фиксированной конструктивно-функциональной спецификой, и имеющих в общем случае как структурное, так и геометрическое различия.

Отображение класса конструктивных исполнений с фиксированным смысловым содержанием реализуется в CAD-системе классом $M_w^{Sem}(Mo\partial_{H_{3\partial}}^{3D})$:

$$CAD: K_u^{Kohcmp}(U_{3\partial}) \mapsto M_w^{Sem}(M_{\partial}\partial_{U_{3\partial}}^{3D}). \tag{2.52}$$

Этот класс описывается следующим образом:

$$M_{w}^{Sem}(Mo\partial_{Hso}^{3D}) = \{ UMs^{M}, \Phi^{M}, < Mo\partial_{jHso}^{3D} \{ UMs_{j}, id_{j} \} > \}, j = \overline{I,n},$$
 (2.53)

где $\mathit{Имя}^M$ и $\mathit{\Phi}^M$ – это наименование и функциональное назначение соответственно, относящиеся ко всему классу M_w^{Sem} , а $\mathit{Имя}_j$ и id_j – наименование и идентификатор (порядковый номер) j-того конструктивного исполнения $\mathit{Mod}_{j\,\mathit{H30}}^{\mathit{3D}} \in M_w^{\mathit{Sem}}$.

Для наглядности на рисунке 2.14 (страница 107) представлены конструкторские решения уровня «Деталь» — корпуса микрополосковых устройств СВЧ, в основе которых лежит единая КФБ «Отсек под плату микрополосковую». Как видно, все сформированные конструкторские решения различаются как геометрией, так и структурой, при этом обобщены по их смыслового содержания, заключаемой в их функциональной роли в составе микрополоскового устройства СВЧ. Также на рисунке 2.14 видно, что даже в случае использования КФБ с одинаковыми значениями описывающих его конструкторских параметров ($Kohcmp_1(Qem)$ и $Kohcmp_4(Qem)$), результирующие решения могут сильно различаться.

Представленные на рисунке 2.14 конструкторские решения являются компонентами узлов – изделий уровня «Сборочная единица». Для наибольшей наглядности на рисунке 2.15 (страница 108) представлены конструкторские решения уровня «Узел» – устройства (модули) СВЧ микрополосковые, в состав которых входят сформированные ранее и представленные на рисунке 2.14 изделия. Как видно, все решения, имея различную структуру в плане количества и набора компонент, обобщены до класса подобных конструкторских решений по критерию семантического содержания (конструктивно-функциональной специфике).

Процессная модель проектной деятельности в САПР, представленная на рисунке 2.13, в настоящем исследовании также обозначается термином «Обобщенное конструкторское дерево построения 3D-модели».

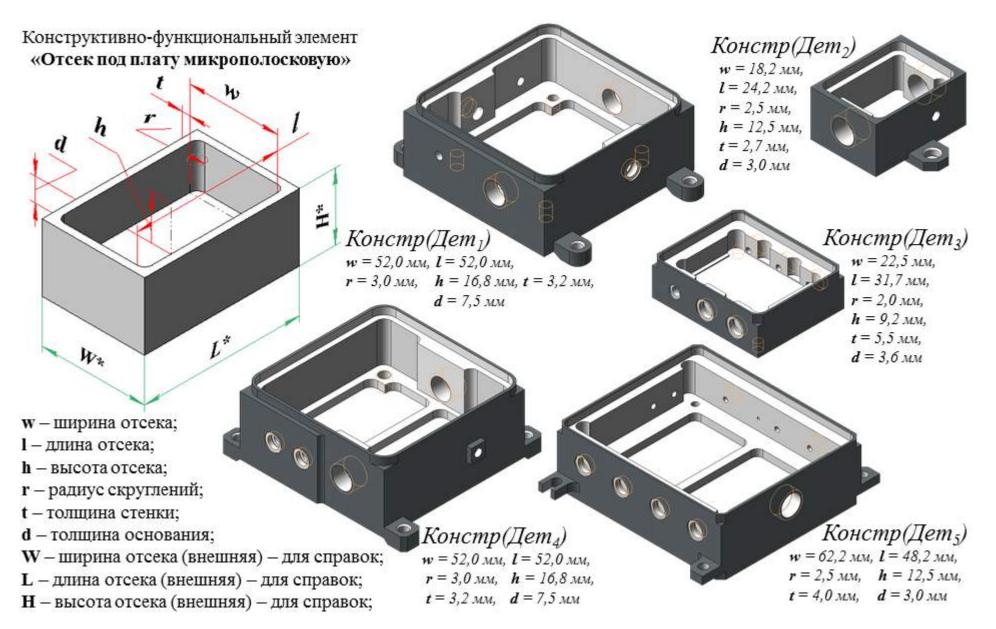


Рисунок 2.14 – Класс семантически подобных конструкторских решений уровня *«Деталь»*, сформированные различными маршрутами конструирования

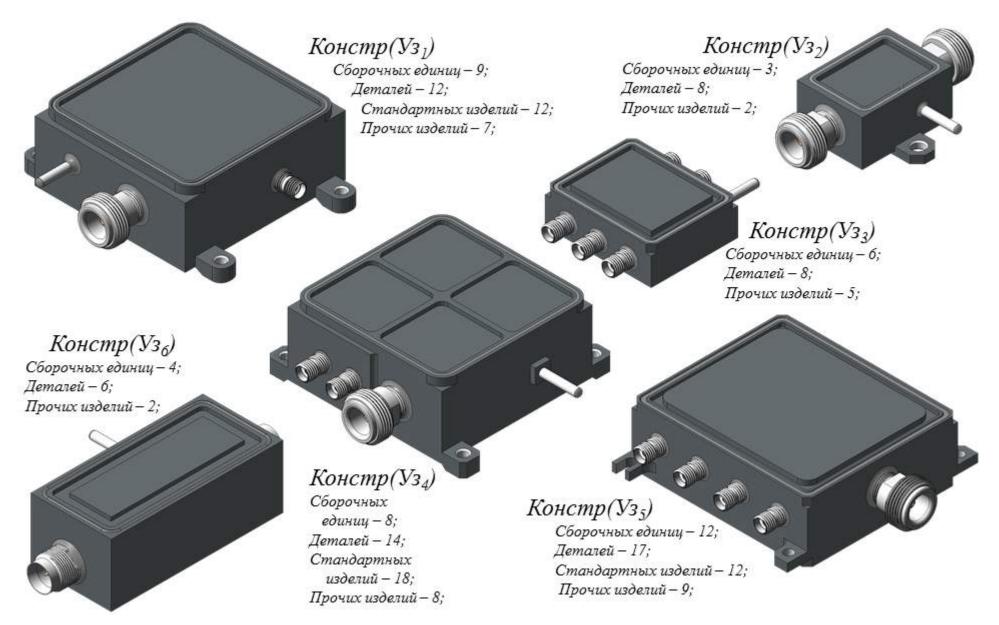


Рисунок 2.15 – Класс семантически подобных конструкторских решений уровня *«Узел»*, имеющих различную структуру и геометрию, обобщенных по конструктивно-функциональной специфике

В сформированном конструкторском дереве построения модификация каждого экземпляра $Mo\partial^{3D}_{H_{3}\phi}$ реализуется тремя путями:

- **1.** Изменением значений $nap_{j}^{CMO_{i}}$ в данном случае конструкторское решение модифицируется геометрически (или структурно на уровне КФЭ);
- **2.** Изменением состава $CMO_i \in \mathcal{A}ep^K(Mo\partial_{H_{3\partial}}^{3D})$ в данном случае конструкторское решение модифицируется структурно (на уровне всего изделия).

Каждому набору выполненных СМО и заданных значений соответствует экземпляр конструкторского решения. В дереве построения обобщенно содержится все множество таких решений, заданных алгоритмически посредством маршрутов конструирования, которые отличаются между собой по ходу ветвления: от общих участков к конкретным результирующим данным в виде экземпляра Mod_{M30}^{3D} .

При этом возможны случаи, при которых проектные решения, формируемые различными маршрутами, геометрически и семантически идентичны. Воспроизведение структуры, содержащей отличие между такими решениями, представляет собой дополнительную задачу, выходящую за рамки настоящего диссертационного исследования, в котором предполагается, что все конструкторские решения, формируемые обобщенным деревом конструирования, геометрически и семантически (на уровне отдельных экземпляров) отличаются друг от друга.

2.5 Выводы и рекомендации по Главе 2

Результатами разработанных методов конструктивно-функциональной поддержки этапа конструкторского проектирования, рассмотренных во второй Главе диссертационного исследования, являются следующие выводы:

1. Отображение конструкторской структуры изделия в дереве построения 3D-модели реализуется методом структурного соответствия, при котором одному структурному элементу изделия соответствует один т.н. «Семантический макроэлемент геометрии» – композиция КЭГ, обладающая фиксированным смысловым содержанием, целостностью и регламентированным поведением;

- 2. Вводимый термин «Конструктивно-функциональный элемент», обозначающий элемент конструкции, отличающийся конструктивно-функциональной целостностью, позволяет описывать КСИ в терминах предметной области проектируемого изделия, реализуя ее модульную структуру. Согласно методу конструктивно-функционального представления, КСИ рассматривается как система КФЭ.
- **3.** Семантическая макрооперация, формируемая обобщением базовых операций по выходным данным (до уровня СМЭГ), определяется как основное проектное действие в функционале САD-системы с конструкторским смыслом, заключающимся в построении 3D-образа конкретного КФЭ. Формирование и редактирование 3D-модели осуществляется посредством обращения к СМО.
- **4.** Предложенная процессная модель проектной деятельности в САПР в виде обобщенного дерева конструирования является структурой, описывающей класс семантически подобных конструкторских решений, которые, в общем случае, имеют геометрическое и структурное отличия, но объединены по семантическому содержанию, заключаемому в конструктивно-функциональной специфике.

Указанные выводы в сумме определяют метод конструктивно-функциональной поддержки этапа конструкторского проектирования в CAD-системе удовлетворяющим требованиям, выделенным по результатам обзора, проведенного в первой Главе. Так конструктивно-функциональное проектирование реализует:

- ▶ Отображение конструкторской структуры проектируемого изделия в обобщенном дереве построения 3D-модели в CAD-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 их семантического содержания, исключая выход за рамки, определяющие текущий класс изделий.

Так как все требования, предъявляемые к методу представления проектных решений реализованы, то далее наступает очередь программной реализации.

ГЛАВА 3 ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДОВ КОНСТРУКТИВНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ЭТАПА КОНСТРУКТОРСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Конструктивно-функциональная поддержка этапа конструкторского проектирования в САПР реализуется двумя программными средствами:

- Библиотекой конструктивно-функциональных элементов;
- Модулем управления конструкторской структурой изделия.

Библиотека КФЭ и модуль управления КСИ в рамках настоящего исследования программно реализуются как надстройка к САПР *«Компас-3D»*, разрабатываемой ЗАО *«Аскон»*, дополняя и расширяя функционал последней.

Архитектура комплекса программных средств, реализующего конструктивно-функциональное проектирование, представлена на рисунке 3.1 (страница 112).

Библиотека конструктивно-функциональных элементов обеспечивает построение экземпляра (конфигурации) СМЭГ с комплектом параметрических, геометрических и логических зависимостей и ограничений в процессе работы в САОсистеме с 3D-моделями изделий уровня «Деталь». Каждый построенный СМЭГ представляет собой составную часть формируемой 3D-модели изделия Mod_{M30}^{3D} и описывается набором конструкторских параметров, допустимые (т.е. обеспечивающие семантическую целостность проектного решения) комбинации значений которых хранятся в базе данных. Параметрические и геометрические зависимости и ограничения задают модифицируемость проектного решения в виде 3D-модели как на уровне «Деталь», так и на уровне «Сборочная единица (узел/подузел)».

Модуль управления конструкторской структурой изделия обеспечивает отображение конструкторской информации о проектном решении в виде 3D-модели на уровнях *«Деталь»* и *«Сборочная единица»* с возможностью модификации последнего посредством управления проектными параметрами. В процессе «управления» структурой проектного решения редактируются все ассоциативно связанных 3D-модели посредством обращения к входящим в их состав СМЭГ, что обеспечивает целостность проектного решения различного структурного уровня.

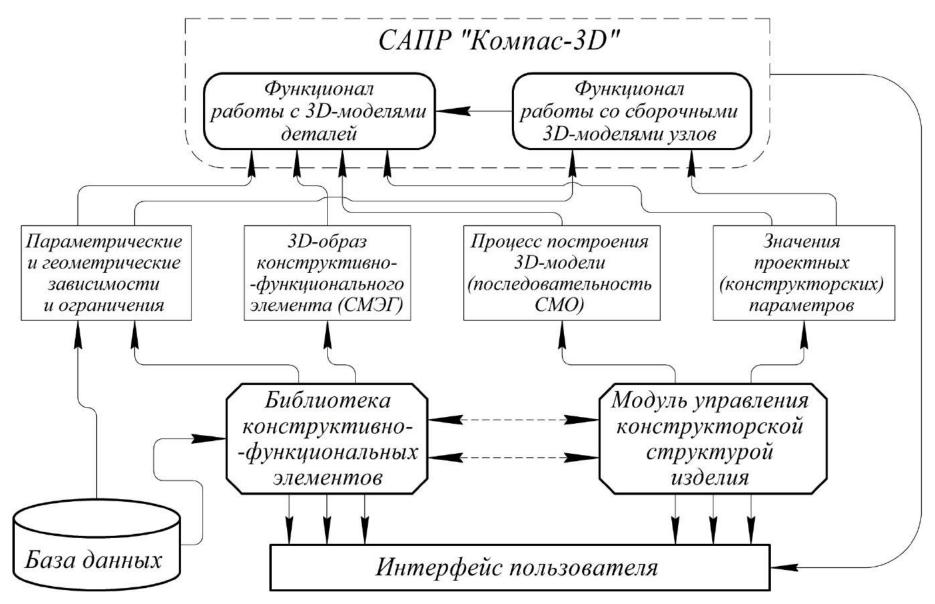


Рисунок 3.1 – Архитектура комплекса программных средств, реализующего конструктивно-функциональную поддержку этапа конструкторского проектирования в САПР

Важнейшей особенностью библиотеки конструктивно-функциональных элементов является формирование 3D-образов КФЭ (в виде СМЭГ), обладающих семантической целостностью, т.е. каждый из них является актуальным в заданной предметной области по критериям конструктивно-функциональной специфики, а также описывается набором параметров, обладающим физическим смыслом.

Важнейшей особенностью модуля управления конструкторской структурой изделия является возможность модификации проектных решений, обеспечивая как геометрическую и структурную корректность (со стороны САD-системы), так и семантическую целостность (со стороны предметной области), исключая выход за рамки обозначенного класса, определяемого конструктивным исполнением и функциональным назначением проектируемых изделий.

Далее подробно рассматривается разработка обозначенных выше средств.

3.1 Разработка библиотеки конструктивно-функциональных элементов

Библиотека конструктивно-функциональных элементов (**БКФЭ**) представляет собой хранилище семантических макроэлементов геометрии, отображающих входящие в ее состав КФЭ. Критерием обобщения КФЭ в рамках единой библиотеки является их конструктивно-функциональная специфика, относящаяся к заданной предметной области.

3.1.1 Основные сведения о БКФЭ

Библиотека КФЭ характеризуется своим *наименованием*, несущим конструктивно-функциональную информацию, общую для всех содержащихся в ней КФЭ:

 $\mathit{Имя}(\mathit{БK\Phi}\mathcal{G}_i) = \mathit{Библиотека} + [\mathit{общий признак набора K\Phi}\mathcal{G}],$ (3.1) в качестве такого признака лучше всего подходит предметная область, задающая конструктивное исполнение и функциональное назначение изделий:

$$\Pi pO(\mathcal{U}_{3\partial}): mean(K\Phi \mathcal{P}_{j}) \in mean(K\Phi \mathcal{P}_{j}), j = \overline{l,m}.$$
 (3.2)

Наименование библиотеки КФЭ предоставляет пользователю первичную информацию о предметной области, к которой относятся входящие в нее элементы.

Каждый $K\Phi \mathcal{G}_j \in \mathcal{B}K\Phi \mathcal{G}_i$ является экземпляром класса семантически подобных $K\Phi \mathcal{G}$, который отображается в САПР классом СМ $\mathcal{G}\Gamma$; элементы обоих классов связаны следующим образом:

$$\mathcal{E}K\Phi\mathcal{P}_{i}: K\Phi\mathcal{P}_{j} \to CM\mathcal{P}_{i}, j = \overline{l,m}.$$
 (3.3)

Все СМЭГ строятся посредством семантических макроопераций — функций от входных значений на основе комплексных алгоритмов, в выражении (2.25) обозначенных как γ^{Lib} . Библиотека КФЭ содержит не *«готовые результаты»* в виде СМЭГ, а *процессы их формирования* в виде последовательностей СМО [218].

СМО обеспечивает построение класса СМЭГ, что было рассмотрено в разделе 2.3; набор $\{CMO_j\} \in \mathit{БK\Phi}\mathcal{P}_i$ обеспечивает построение *«метакласса»* СМЭГ, критерием которого является фиксированные конструктивное исполнение или функциональное назначение в заданной предметной области:

$$\begin{cases} CAD : EK\Phi \ni_{i} \to M_{q}^{Sem}(CM \ni \Gamma_{j}), \\ M_{q}^{Sem} = \{CM \ni \Gamma_{j} | \begin{cases} mean(CM \ni \Gamma_{j}) = const, & j = \overline{1,m}. \\ mean(CM \ni \Gamma_{j}) \in mean(EK\Phi \ni_{i}). \end{cases}$$
(3.4)

где $M_q^{\mathit{Sem}}(\mathit{CM}\mathfrak{I}\Gamma_k)$ – это *«метакласс»* СМ $\mathfrak{I}\Gamma$, формируемый в рамках i-ой БК $\Phi\mathfrak{I}$.

БКФЭ имеет признаки библиотеки шаблонов. Однако, в рамках таких библиотек реализуется лишь геометрическое подобие выходных данных (на основе параметризации в САПР). БКФЭ же реализует построение семантически подобных конструкторских решений (их фрагментов) в виде $M_q^{Sem}(CMЭ\Gamma_k)$, в общем случае отличающихся как структурно, так и геометрически, — что не реализуется в рамках стандартного функционала САD-систем. Поэтому БКФЭ рассматривается как специализированная библиотека в классификации, проведенной в разделе 1.7.

Библиотека КФЭ является таковой только лишь при оперировании терминами реальных конструктивных единиц: в САПР же они представляются как СМЭГ, построение которых регламентируется СМО, как именно – рассматривается далее.

3.1.2 Представление семантической макрооперации в БКФЭ

Информация об СМО, как об элементе внутренней структуры БКФЭ, может быть представлена на двух уровнях:

▶ на внешнем уровне (уровне библиотеки), описываясь наименованием КФЭ:

 $\mathit{Имя}(\mathit{CMO}_i) = \mathit{Построениe} + [\mathit{наименованиe}\ \mathit{K}\Phi\varTheta\ (\mathit{K}\Phi\rlap{Б}\ / \mathit{K}\Phi\varPhi)]$, (3.5) т.е. наименование СМО предоставляет инженеру информацию о конструктивнофункциональной специфике класса КФЭ, разделяя при этом КФБ и КФФ;

▶ на внутреннем уровне (уровне операции), описываясь алгоритмом реализации:

$$CMO_i^{Lib} = \{ id, nap_i^{CMO_i} < 3\mu a \nu >, \gamma^{CAD}, K^{CM \ni \Gamma} \}, j = \overline{I,m},$$
 (3.6)

алгоритм реализации СМО определяется выражением (2.25), с учетом которого:

$$CMO_i^{Lib} = \{id, nap_j^{CMO_i} < 3нau >, M^{\Pi peo}, M^{\Pi ocm}, M^{MK}, \Phi^{\Pi peoo}, K^{CMЭ\Gamma}\}, j = \overline{l,m},$$
 (3.7) где все обозначения — в соответствии с формулами (2.16) и (2.25).

Семантическая макрооперация наиболее информативно описывается в рамках методологии IDEF0 [248]. Как процесс, СМО задается своим алгоритмом – набором БО с системой правил, условий и ограничений – информацией, содержащейся в БКФЭ согласно выражению (3.7), что поясняется рисунком 3.2.

Структурную основу БКФЭ, как видно на рисунке 3.2, составляет динамический набор СМО, каждая из которого определяется собственными (зачастую уникальными) маршрутами конструирования и классом формируемых СМЭГ.

Для каждого $MK_j \in CMO_i$ формируются последовательности $\left\langle EO_p \right\rangle$, которые обеспечивают построение класса конструкторских решений $K_j^{CM\Im\Gamma} = \{CM\Im\Gamma_q\}$. В рамках одного класса СМЭГ отличаются друг от друга значениями параметров БО. При построении таких последовательностей задаются отношения между БО. Отдельные параметры БО и отношений между ними выделяются в т.н. *«внутренние»* переменные nap_v^{EO} , определяемые задаваемыми в САПР выражениями.

На основе *«внутренних»* переменных nap_v^{EO} формируется множество семантических параметров СМО nap_w^{CMO} , которые отличаются тем, что обладают кон-

структивно-функциональным смыслом в заданной предметной области. Для них также задаются наименование, допустимые значения и взаимные зависимости: как между nap_w^{CMO} , так и между nap_w^{EO} . Данные параметры являются *«внешними»*, представляя собой входные данные к выполнению СМО [245].

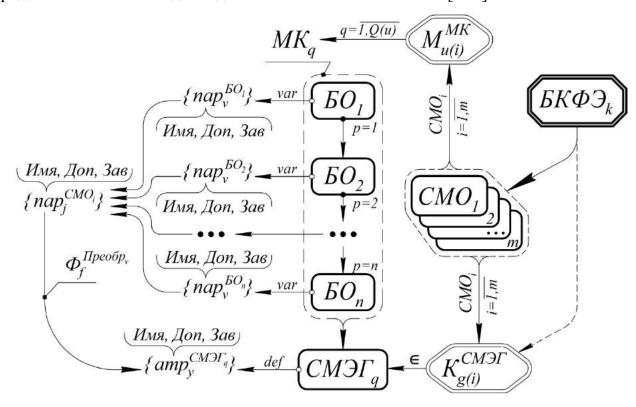


Рисунок 3.2 – Структура СМО как элемента БКФЭ

Правила, задаваемые на поведение параметров nap_w^{CMO} , определяют атрибуты формируемого СМЭГ amp_g^{CMO} , обеспечивая не только его геометрическую корректность с точки зрения САD-системы, но и смысловое содержанием в заданной предметной области. Атрибуты СМЭГ определяются своим наименованием, допустимыми значениями и взаимозависимостями и связями друг с другом.

Для описываемой $CMO_i \in \mathit{БK\Phi}\mathcal{P}$ выделяется множество параметров $\mathit{nap}_w^{\mathit{CMO}}$, наследуемых из входящих в нее $\{\mathit{MK}_j\}$ так, что некоторое множество $\{\mathit{nap}_w^{\mathit{CMO}}\}$, общее для всех $\mathit{MK}_j \in \mathit{CMO}_i$, является $\mathit{«базовым»}$ набором входных данных, задающим конструктивно-функциональную специфику класса отображаемых КФЭ.

Другая часть входных данных, определяемая в зависимости от заданных значений *«базовых»* параметров, определяет конфигурацию формируемого СМЭГ как

экземпляра класса $K_j^{\mathit{CM}\!\mathit{Э}\!\mathit{\Gamma}}$ и, следовательно, соответствующий ему маршрут конструирования.

Установление зависимостей между nap_w^{CMO} и nap_v^{EMO} позволяет перестраивать сформированный СМЭГ, оперируя только значениями nap_w^{CMO} , несущих, как уже было отмечено, строго определенный технический смысл [245].

Управляющие значения nap_w^{CMO} и nap_v^{EO} (ограничения на принимаемые значения), наименования и зависимости хранятся в базе данных, обеспечивающей доступ к ним, а также их обработку и редактирование (модифицирование).

Для отображения выходных данных СМО в виде структурно и геометрически различных СМЭГ, формируемых различающимися маршрутами конструирования, последняя может быть рассмотрена как процесс в нотации <u>IDEF3</u>, в которой очередность БО и их ветвления в МК реализуются посредством «И» и «ИЛIИ» перекрестков соответственно [137, 157]. Такое представление удобно при программной реализации отдельных МК и их последующего обобщения в i-ой СМО [161]. Однако, являясь для пользователя целостной единицей, каждая СМО характеризуется единым <u>классом</u> семантически обобщенных выходных данных в виде $K_i^{CMЭГ}$.

Фрагменты исходного кода разработанной Библиотеки КФЭ – процедуры построения СМЭГ (геометрической составляющей) представлены в приложении Γ.

На основе такого представления семантической макрооперации в БКФЭ разрабатываются ее основные компоненты и графический интерфейс пользователя.

3.1.3 Структура и состав БКФЭ

Библиотека КФЭ состоит из структурных компонент двух уровней (внешнего и внутреннего), которые были выделены в предыдущем подразделе:

► <u>На внешнем уровне</u> БКФЭ представлена *окном библиотеки*, которое изображено на рисунке 3.3. Данное окно содержит наименование библиотеки, дающее представление о предметной области проектируемых изделий. Двумя отдельными списками представлены входящие в библиотеку конструктивно-функциональные

элементы: КФБ и КФФ. Каждый элемент такого списка соответствует некоторому классу КФЭ, обобщенному по конструктивному исполнению и функциональному назначению. После выбора КФЭ отображается его текстовое описание: функциональное назначение и особенности применения в различных конструкциях изделий, кроме того, после выбора КФЭ выводится его обобщенный информационный 3D-образ. Текстовое и геометрическое описание КФЭ обеспечивает пользователя наиболее подробным комплектом исходных данных к конструированию.

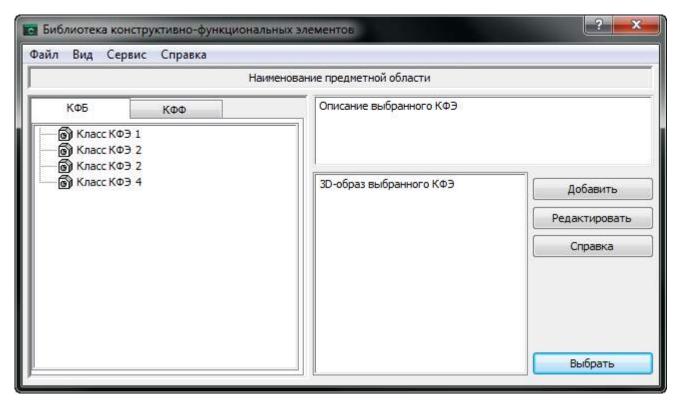


Рисунок 3.3 – Структурные компоненты БКФЭ. Окно библиотеки

Открытая БКФЭ предоставляет пользователю доступ к ряду действий:

- о Выбор КФЭ для построения его информационного 3D-образа (СМЭГ);
- Редактирование уже имеющегося в библиотеки КФЭ (в т.ч. его удаления);
- Добавление нового КФЭ в библиотеку (в т.ч. модификацией уже имеющихся);
- Вызов справки и руководства пользователя, а также закрытие библиотеки.

Все указанные выше действия реализуются посредством нажатия на соответствующие кнопки, представленные в окне *«Библиотека»* на рисунке 3.3.

▶ <u>На внутреннем уровне</u> БКФЭ представлена *окном построения 3D-образа* $K\Phi$ Э, которое изображено на рисунке 3.4. Окно содержит наименование форми-

руемого КФЭ, поля задания значений проектных параметров – входных данных к построению СМЭГ, а также графические пояснения к этим параметрам.

После ввода всех значений производится их проверка (одноименная кнопка на рисунке 3.4.), т.е. оценка корректности формируемого КФЭ, результаты которой могут быть выражены в виде связки *«корректно/некорректно»* или в виде коэффициента из градуированной шкалы, задаваемой конструктором напрямую. В случае удовлетворяющих показателей производится запись введенных значений (кнопка *«Записать значения»* на рисунке 3.4).

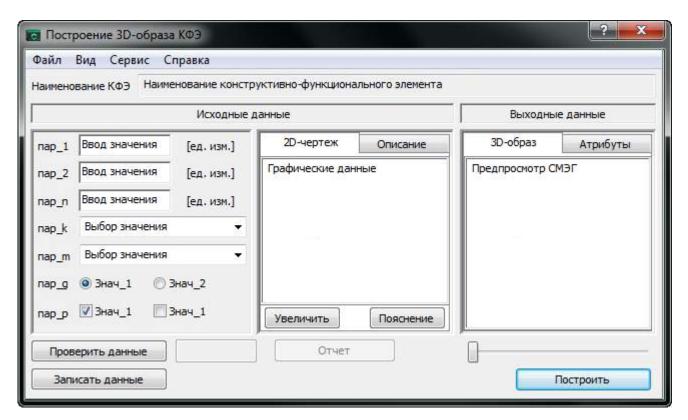


Рисунок 3.4 – Структурные компоненты БКФЭ. Окно построения 3D-образа КФЭ

На основе записанных значений исходных данных в окне предварительного просмотра генерируется фантом геометрического 3D-образа формируемого КФЭ. Фантом представляется как твердотельный 3D-объект (в т.ч. в случае его булевого вычитания из уже построенной 3D-модели). Кроме фантома формируется выходные семантические атрибуты КФЭ, геометрически не отображаемые в СМЭГ.

По итогам визуальной оценки фантома СМЭГ и анализа выходных атрибутов КФЭ (в случае удовлетворяющих конструктора показателей) нажимается кнопка *«Построить»* (см. рисунок 3.4) и сформированный 3D-образ КФЭ добавляется в файл уровня *«Деталь»*, открытый в САПР Компас-3D.

Также <u>на внутреннем уровне</u> БКФЭ представлена *окном управления КФЭ*. Данное окно обеспечивает функции создания нового и редактирования (корректировки, модификации, удаления) уже имеющегося в библиотеке КФЭ.

Окно управления КФЭ представлено на рисунке 3.5; оно содержит наименование взятого в работу КФЭ, порядковый номер и наименование (при наличии) текущей конфигурации, а также рабочую область, которая содержит три вкладки:

- ∘ Вкладка 3D-моделирования, в которой происходит построение СМЭГ;
- Вкладка внутренних переменных, предоставляющая работу с параметрами БО;
- Вкладка внешних параметров, задающая входные данные к выполнению СМО.

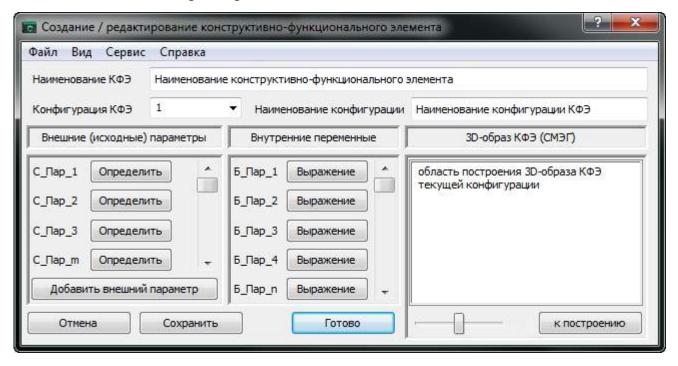


Рисунок 3.5 – Структурные компоненты БКФЭ. Окно управления КФЭ

Вкладка построения 3D-образа КФЭ обеспечивает формирование СМЭГ; реализуется это непосредственно в САПР «Компас-3D» последовательностью БО из ее функционала. При построении задаются внешние параметры для внутренней параметризации и геометрические ограничения, обеспечивающие корректное поведение СМЭГ при его автоматической модификации.

Выделенные при построении СМЭГ *внешние* переменные определяются как *внутренние параметры* СМО, т.к. являются абстрактными и несут только геомет-

рический смысл. Все внутренние параметры отображаются списком в соответствующей вкладке вместе с определяющими взаимозависимостями между ними, заданными в CAD-системе при построении 3D-образа. Данные зависимости могут быть просмотрены и отредактированы нажатием кнопки «Выражение».

Для каждого КФЭ задается набор *семантических* (логических) исходных параметров, также отображаемых списком в соответствующей вкладке. Их количество определяется пользователем (и может редактироваться) для наиболее полного информационного описания КФЭ. Каждый семантический параметр характеризуется своим *наименованием*, несущим смысл в заданной предметной области, а также *ограничениями* на принимаемые им значения и *правилами*, связывающими введенное значение с внутренними параметрами СМО [245].

При создании и редактировании КФЭ как элемента библиотеки также выбирается поясняющий графический материал (2D-чертеж и описание исходных параметров) и обобщенный информационный 3D-образ.

В окне управления реализован механизм обеспечения семантического обобщения СМЭГ в один класс. Это обеспечивается вкладкой «Конфигурация КФЭ», задаваемой при создании/редактировании элемента библиотеки, следующим образом: номер конфигурации отображает маршрут конструирования и характеризуется собственным СМЭГ, отличающимся структурно от СМЭГ других конфигураций (в рамках одной конфигурации СМЭГ отличаются лишь геометрически). Для каждой конфигурации выбираются и устанавливаются значения исходных данных, при которых конструкторское решение будет формироваться по заданному маршруту. Очевидно, что главное требование — это оригинальность набора таких граничных значений. При этом заданный набор исходных параметров к построению 3D-образа КФЭ является общей характеристикой всего класса СМЭГ.

Таким образом, в рамках одного элемента библиотеки КФЭ (формируемого в САD-системе одной СМО) реализуется обобщение структурно и геометрически различающихся СМЭГ, обобщенных по их семантическому содержанию [217], заключающемся в конструктивном исполнении и функциональном назначении.

3.1.4 Порядок работы с БКФЭ

В данном подразделе описывается порядок работы с реализованной библиотекой КФЭ при конструировании изделия в САD-системе. В качестве примеров рассматриваются наиболее наглядные и информативные процессы выбора и построения 3D-образа КФЭ, а также добавления нового КФЭ в библиотеку.

• Построение 3D-образа КФЭ

В настоящем примере рассматривается библиотека КФЭ предметной области «Устройства (модули) СВЧ микрополосковые». Результат открытия заполненной проектными данными БКФЭ с предварительным выбором КФЭ «Отсек под плату микрополосковую» представлен на рисунке 3.6.

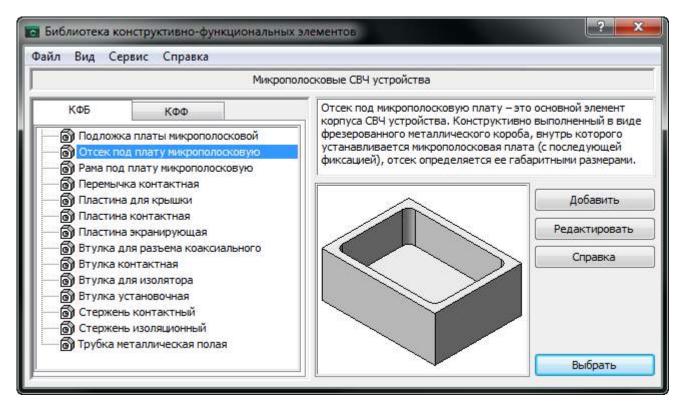


Рисунок 3.6 – Стартовое окно БКФЭ «Микрополосковые СВЧ устройства»

При первичном вызове и открытии БКФЭ для выбора и построения доступны только КФБ — именно они являются структурной «основой» формируемой конструкции изделия, отображаемой в CAD-системе 3D-моделью.

После окончательного выбора КФЭ «Отсек под плату микрополосковую» и перехода к его построению наступает очередь задания исходных данных.

К задаваемым пользователем значениям исходных параметров относятся:

- <u>числовые значения</u>, определяющие количественные характеристики СМЭГ и входящих в его состав ГЭ: длина, ширина, высота, радиус скругления и др.;
- качественные значения, определяющие характерные признаки СМЭГ и входящих в его состав ГЭ: материал, наличие выборок, тип рифления и др.;
- ∘ <u>геометрические элементы</u>, определяющие СМЭГ в ассоциативно-геометрическом виде: базовая плоскость, точка привязки, элемент сопряжения и др.

Значениями входных данных, перечисленных выше типов, зачастую являются атрибуты построенных ранее СМЭГ (КФБ или КФФ).

После ввода значений всех параметров проверяется конструкторская грамотность: значение *«корректно»* ($Q_K = I$) говорит о том, что противоречия в исходных данных отсутствуют, а следовательно, формируемый элемент геометрически и конструктивно корректен.

Результат наполнения семантической макрооперации построения 3D-образа КФЭ «*Отсек под плату микрополосковую*» представлен на рисунке 3.7. Также на данном рисунке представлен фантом сформированного СМЭГ.

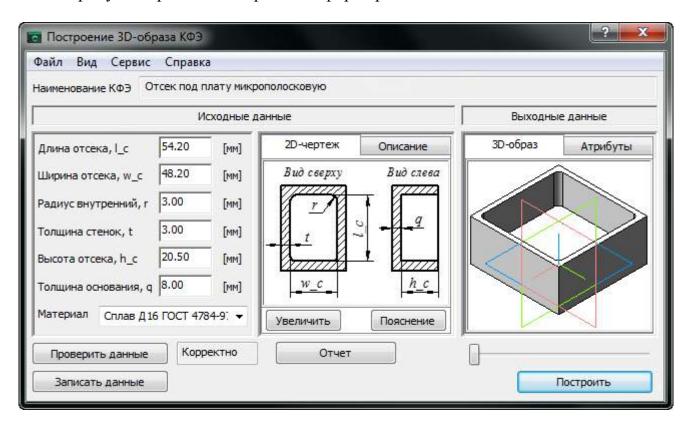


Рисунок 3.7 – Построение 3D-образа КФЭ «Отсек под плату микрополосковую»

В случае удовлетворяющих конструктора показателей предварительно сформированного СМЭГ нажимается кнопка *«Построить»*, после чего он добавляется в 3D-модель уровня *«Деталь»*, открытую для работы в САПР *«Компас-3D»*.

• Добавление нового КФЭ в библиотеку

Обеспечение актуальности содержащихся в БКФЭ данных, являющееся одним из важнейших аспектов использования БКФЭ в процессе конструирования, сводится к возможностям создания (добавления) новых КФЭ в библиотеку, а также их модификации. Очевидно, что для построения СМЭГ соответствующий КФЭ должен быть введен в библиотеку; это осуществляется следующим образом.

В рабочем окне библиотеки КФЭ (см. рисунок 3.3) нажимается кнопка *«Добавить»*, после чего открывается окно добавления нового КФЭ (шаблон данного окна был представлен на рисунке 3.5). После ввода наименования КФЭ и текущей конфигурации во вкладке 3D-моделирования вызывается САПР *«Компас-3D»* и формируется экземпляр СМЭГ, при этом процесс построения как последовательность БО выбирается на усмотрение конструктора. Производится параметризация по требуемым параметрам БО, определяемым как *внутренние переменные*, которые после построения 3D-образа отображаются в соответствующей вкладке. Геометрические сопряжения, задаваемые при построении двумерных эскизов и трехмерных тел, фиксируются непосредственно в алгоритме построения в САПР.

Заключительным этапом является определение внешних переменных, являющихся исходными параметрами к выполнению СМО. Каждый внешний параметр характеризуется своим наименованием, несущим конструктивно-функциональный смысл; общее количество внешних параметров определяется пользователем, что позволяет наиболее подробно и информативно описывать выбранные элементы с требуемой степенью вариативности. Пример определения внешних параметров представлен на рисунке 3.8.

На рисунке 3.8 видно, что для каждого параметра, выделяемого в качестве «исходного», задаются ограничения на принимаемые им значения: он может принимать как диапазоны значений (от x_1 до x_2 , в т.ч. за исключением / с добавлением

диапазона от x_3 до x_4), так и дискретные значения, предварительно заданные пользователем. В соответствии с выбранными ограничениями указывается тип принимаемых значений (целые / десятичные числа, текст и др.). После установления всех ограничений и типов принимаемых значений устанавливаются взаимосвязи между внешними параметрами: как друг с другом, так и с внутренними переменными (при этом используется уже зафиксированное обозначение внутренней переменной). Взаимосвязи реализуются посредством стандартных математических операций, а также условной связки *«если - то»*. Все заданные взаимосвязи проверяются на корректность используемых операторов и обозначенных переменных; в случае успешной проверки внешний параметр сохраняется и становится доступен для ссылки на него последующих (введенных уже после него) параметров.

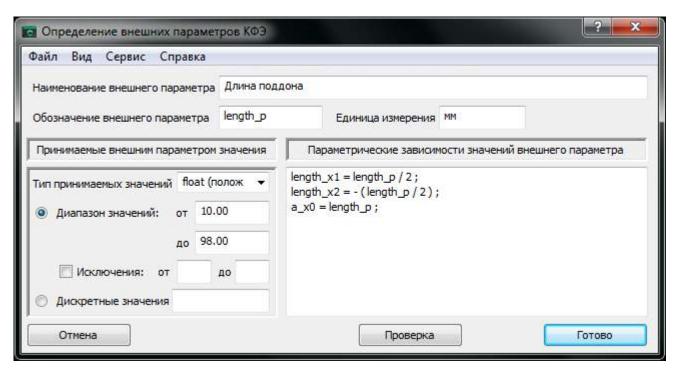


Рисунок 3.8 – Определение внешних параметров КФЭ «Поддон под плату микрополосковую»

После определения всех параметров СМО формируются маршруты конструирования; построенный прежде СМЭГ соответствует первому (основному) маршруту конструирования. В поле «Конфигурация КФЭ» выбирается пункт «Добавить конфигурацию», после чего задается ее наименование и повторяются манипуляции с внешними параметрами. При этом информация об их поведении наследуется с основной конфигурации, т.е. необходимо изменить граничные условия для параметров СМО, в зависимости от которых выбирается требуемый маршрут конструирования, определяющий формируемый 3D-образ СМЭГ.

По окончанию определения маршрутов конструирования завершается создание КФЭ как элемента библиотеки. Заполненное окно добавления в БКФЭ нового КФЭ «Поддон под плату микрополосковую» представлено на рисунке 3.9.

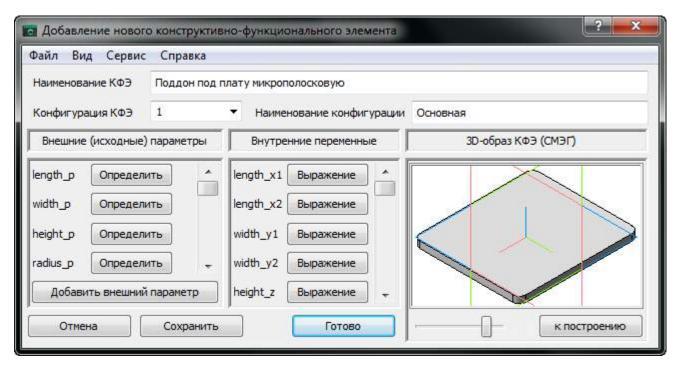


Рисунок 3.9 – Добавление в библиотеку КФЭ «Поддон под плату микрополосковую»

Процесс конструирования в САD-системе сводится к последовательному построению КФЭ из состава библиотеки для формирования законченного конструкторского решения в соответствии с выражением (2.13). Однако в рамках стандартного подхода сформированное конструкторское решение отображается в САПР суперпозицией КФЭ [230], и оно не содержит информации о конструкторской структуре изделия. Требуемую функциональность (предоставление информации о КСИ) библиотека КФЭ обеспечивает совместно с модулем управления конструкторской структурой изделия, разработка которого описывается в последующем разделе.

3.2 Разработка модуля управления конструкторской структурой изделия

Модуль управления конструкторской структурой изделия (МУКСИ) представляет собой компоненту САD-системы, обеспечивающую описание 3D-модели (как набора КФЭ) в структурно-параметрическом и ассоциативном виде. Вывод и отображение информации о 3D-модели реализуется в рамках обобщенного дерева конструирования, подробно рассмотренного в подразделе 2.4.6 второй Главы.

3.2.1 Представление конструкторской структуры изделия в МУКСИ

Изделие, КС которого отображается данной структурой, традиционно описывается в САПР децимальным номером и наименованием. Если дерево построения описывает 3D-модель совокупностью КЭГ (что было рассмотрено в разделе 2.2), то в МУКСИ последняя описывается как иерархическая система КФЭ, представляющая информацию непосредственно *о конструкции проектируемого изделия* за счет отображения как самого набора КФЭ, так и связей между ними.

Отображение КСИ на основе ее системного описания (см. запись (2.9)) в САD-системе посредством МУКСИ представлено на рисунке 3.10.

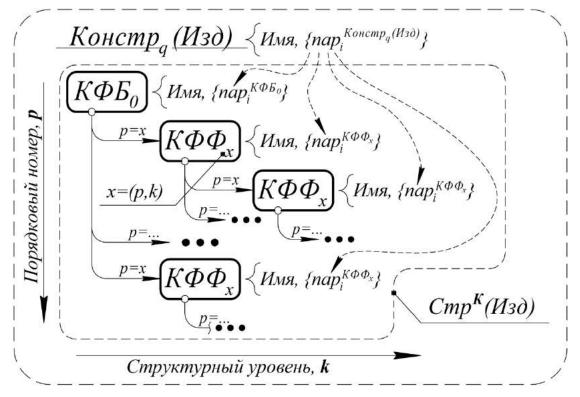


Рисунок 3.10 – Представление конструкторской структуры изделия в МУКСИ

На данном рисунке видно, что иерархичность КСИ как набора КФЭ достигается структурным уровнем КФЭ k, а также его порядковым номером p. Для однозначно верной идентификации КФЭ, его порядковый номер p имеет сквозную нумерацию (в рамках текущего структурного уровня k). Как было отмечено в подразделе 2.2.3, структурный уровень k=0 соответствует КФБ, являющейся структурной базой изделия (уровня «Деталь»). С увеличением количества КФЭ формируется «история» их добавления в КСИ, обеспечивающая установление связей типа «родитель-потомок» между КФБ и КФФ, а также только между КФФ [213].

Каждый КФЭ описывается согласно записи (2.8), т.е. пользователю предоставляется наименование элемента, несущее конструктивно-функциональную информацию, а также набор атрибутов, посредством значений которых устанавливаются структурно-ассоциативные связи между всеми $K\Phi \ni_i \in Cmp^K(U \exists \delta)$.

Конструкция изделия как система КФЭ в соответствии с рисунком 3.10 также описывается аналогично выражению (2.8) следующим образом:

$$Kohcmp_q(\mathit{И}3\partial) = \{\mathit{Им}\mathfrak{s}, \mathit{nap}_j^{\mathit{Kohcmp}_q(\mathit{И}3\partial)} < 3\mathit{ha}\mathit{u} > \}, j = \overline{\mathit{I},\mathit{m}},$$
 (3.8)

где $\mathit{Имя}$ – обозначение конструкции изделия, имеющее вид: [децимальный номер] + [наименование изделия], а $\mathit{nap}_{j}^{\mathit{Констр}_q(\mathit{Изд})}$ – это фиксированный набор параметров, описывающих $\mathit{Констp}(\mathit{Изд})_i$ посредством наследования от параметров КФБ и КФФ [215], на основании которого может быть определен комплект значений параметров, описывающих все $\mathit{KФЭ}_i \in \mathit{Cmp}^{\mathit{K}}(\mathit{Изд})$.

Согласно формуле (1.19) конструкция изделия отображается в САD-системе как целостная единица; в МУКСИ же она отображается следующим образом:

$$MУКСИ : Констр(Изд) \rightarrow Cmp^{\kappa}(Изд),$$
 (3.9)

т.е. реализуется структурная декомпозиция конструкторского решения на семантические единицы, роль которых (в соответствии с записью (2.9)) играют КФЭ.

СМЭГ, отображающие КФЭ в *обобщенном дереве конструирования* на основе технологии CSG формируют конструкторское решение в виде 3D-модели, т.е.:

$$\mathcal{A}ep^{K}(Mo\partial_{Hs\partial}^{3D}): Cmp^{K}(Hs\partial) \rightarrow Mo\partial_{Hs\partial}^{3D},$$
 (3.10)

с учетом выражения (3.9), а также системного описания КСИ (см. запись (2.9)) и конструктивно-функционального представления 3D-модели (см. выражение (2.4)), представленное выше выражение (3.10) приобретает следующий вид:

$$MVKCU: \{ K\Phi \ni_{i}, Ce_{i,j}^{K\Phi \ni} \} \xrightarrow{\mathcal{A}ep^{K}(Mo\partial_{H30}^{3D})} \{ CM \ni \Gamma_{k}, Ce_{k,q}^{CM \ni \Gamma} \}, \qquad (3.11)$$

где все обозначения – в соответствии с записями (2.4) и (2.9).

Таким образом, метод структурного соответствия между *«семантическим»* (КСИ) и *«геометрическим»* (3D-модель) представлениями изделия сводится к «биекции» [218] между КФЭ и СМЭГ (как элементами соответствующих систем), реализуемой в модуле управления конструкторской структурой изделия.

3.2.2 Структура МУКСИ и состав отображаемой информации

Модуль управления конструкторской структурой изделия является надстройкой к САПР «Компас-3D» и интегрируется с ней в окне «Дерево модели», формируя новую вкладку — «Конструкторская структура». Информация о 3D-модели в данной вкладке отображается в виде, представленном на рисунке 3.11.

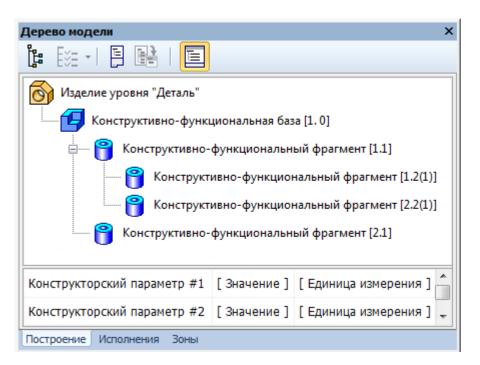


Рисунок 3.11 – Рабочая область модуля управления конструкторской структурой изделия

Как видно на данном рисунке, вкладка *«Конструкторская структура»* состоит из двух рабочих областей:

- **1.** <u>Конструктивно-функциональный состав изделия</u>: в данной области отображается непосредственно сама КСИ (как система КФЭ в соответствии с выражением (2.9)), а следовательно, пользователю предоставляется следующая информация о конструкторском решении:
 - основная (первичная) наименование КФЭ и его тип (КФБ/КФФ);
 - ∘ структурная иерархия и взаимосвязи между КФЭ.

Данная информация однозначно верно определяет конструкторское решение в плане функционального назначения и / или конструктивного исполнения. КФБ и КФЭ отличаются как по условно обозначаемому их тип значку, так и парой значений: *порядковым номером* и *структурным уровнем*. Пунктирные линии, обозначающие взаимосвязи между КФЭ, ведут от родительского элемента к дочернему с обязательным понижением его структурного уровня.

Такая иерархическая структура есть не что иное, как *обобщенное дерево конструирования*, детально рассмотренное в подразделе 2.4.6 второй Главы.

- **2.** Свойства изделия/конструктивно-функционального элемента: данная область содержит формы с конструкторскими параметрами, выделенными в подразделе 3.1.4, таким образом, пользователю предоставляется следующая информация о конструкторском решении:
- \circ *конструктивно-функциональная* значения конструкторских параметров, описывающих решение в виде *Констр(Изд)*, а также входящие в его состав КФЭ.

Данная информация (задаваемая путем ввода исходных данных к выполнению СМО) характеризует текущую конфигурацию конструкции изделия как экземпляр класса геометрически и структурно подобных конструкторских решений.

Возможность редактирования конструкции изделия в МУКСИ как путем изменения иерархии КФЭ, так и оперирования значениями конструкторских параметров способствует формированию класса семантически подобных конструкций, задаваемого обобщенным деревом конструирования в САD-системе [247].

3.2.3 Функционал, предоставляемый МУКСИ

Применение модуля управления конструкторской структурой изделия, являющегося компонентой CAD-системы, на этапе конструкторского проектирования способствует повышению эффективности автоматизации, а также интеллектуализации инженерной деятельности.

Модуль обеспечивает выполнение следующих функций:

- ► <u>Отпображение КСИ</u>. Очевидный функционал, достигаемый за счет представления конструкторской структуры как системы КФЭ в соответствии с выражением (2.9). Такое представление, впервые описанное в работе [160], позволяет проектировщику однозначно верно воспринимать как конструкторский замысел решения, так и изначально заложенное в него семантическое содержание.
- ► Конструктивно-функциональное проектирование. В процессе проектирования в САD-системе пользователь оперирует реальными техническими элементами (хранящимися в библиотеке КФЭ) и их атрибутами с последующим упорядочиванием и заданием иерархии для получения требуемой конфигурации проектного решения. Такой подход в значительной мере освобождает инженера от рутинных операций геометрического моделирования, позволяя заниматься непосредственно конструированием [214].
- ▶ Формирование обобщенного дерева конструирования. Каждый СМЭГ, построенный в результате выполнения СМО, отображает КФЭ как некий экземпляр класса; таким образом, текущая конструкция изделия также представляет собой экземпляр класса семантического подобия [218]. Выбор экземпляра конструкции реализуется посредством модификации КФЭ.
- ► Обеспечение конструктивно-функциональной целостности проектного решения. В задаче редактирования сформированной конструкции инженеру нет нужды обращаться напрямую к геометрии. Оперирование конструкторскими параметрами позволяет получать новый результат, сохраняющий геометрическую и структурную корректность и без необходимости его ручной доработки [247].
- ► <u>Оценка конструкторского решения</u>. Каждый экземпляр конструкции из всего множества, задаваемого классом семантического подобия, может быть оце-

нен по конструктивно-функциональным, технологическим, эстетическим и другим критериям [15, 72, 159]. В качестве показателя используется градуированная шкала, задаваемая конструктором напрямую при выделении положительных / отрицательных аспектов в конструкции с их удельным «весом», определяющим результирующую корректность и грамотность конструкторского решения.

► <u>Распознавание конструкторского решения</u>. Решение, сохраненное в файл формата, инвариантного к конкретной САПР (ISO 10303 STEP, IGES и др.), в работе [200] называемое термином *«немая геометрия»*, теряет традиционное дерево построения [30]. Конструкторский замысел, заложенный в решение, может быть воссоздан — не в виде системы конструктивных элементов [105, 187], а в виде конструкторского дерева построения (на основе наполнения БКФЭ); при этом сложностью является воссоздание взаимосвязей между КФЭ. Решение данной проблемы выходит за рамки настоящего диссертационного исследования.

Далее рассматривается порядок работы с модулем управления конструкторской структурой изделия в процессе конструирования в САD-системе, затрагивающем отмеченные выше (за исключением последней) функции.

3.2.4 Порядок работы с МУКСИ

Работа в CAD-системе с использованием модуля управления КСИ начинается с определения и построения конструктивно-функциональной базы, задающей структурную основу будущего изделия.

После построения КФБ дерево 3D-модели во вкладке *«Конструкторская структура»* (см. рисунок 3.11) приобретает вид, представленный на рисунке 3.12 (слева). В качестве КФБ использовался элемент *«Поддон под плату микрополосковую»*, добавление которого в библиотеку КФЭ было описано в подразделе 3.1.4; его сформированный 3D-образ также представлен на рисунке 3.12 (справа).

Конструктивно-функциональная база строится как первое твердое тело в составе 3D-модели; ее привязка осуществляется только к началу координат в САПР, при этом в качестве точки привязки, как правило, используется геометрический центр элемента.

Сформированная 3D-модель, в составе которой был построен элемент, имеет наименование «Основание», по назначению являясь основанием под плату микро-полосковую [191]. Имея в составе только КФБ, 3D-модель обладает свойствами изделия: при выборе символа модели заполняется рабочая область «Свойства изделия» как это видно на рисунке 3.12. Уже на данной стадии можно проверить конструкторскую грамотность и выполнить модификацию проектного решения.

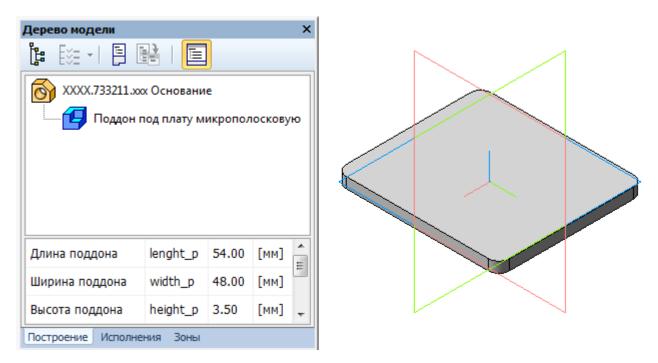


Рисунок 3.12 – Формирование конструкторского решения. Добавление КФБ в 3D-модель

Следующим шагом является добавление в формируемую 3D-модель необходимых конструктивно-функциональных фрагментов. После открытия библиотеки КФЭ выбирается вкладка $«К\Phi\Phi»$, в которой представлены все КФФ из заданной предметной области.

Выбрав необходимый КФФ, выполняется переход к заданию описывающих его параметров: он отличается от построения КФБ и состоит из ∂syx этапов:

- \circ Ввод значений параметров КФЭ, определяющих его как экземпляр класса, формируемых в результате выполнения СМО;
- о *Установление ассоциативных зависимостей* (структурно-геометрических сопряжений) между уже построенными и формируемым КФЭ.

Результат добавления в создаваемую 3D-модель *«Основание»* КФФ *«Отверстия монтажные»* представлен на рисунке 3.13. Как видно, в КСИ произошло

два изменения: добавляемый элемент добавился в дерево модели (как дочерний — на структурном уровне k=1), а также к параметрам в области «Свойства изделия» добавились параметры построенного КФФ.

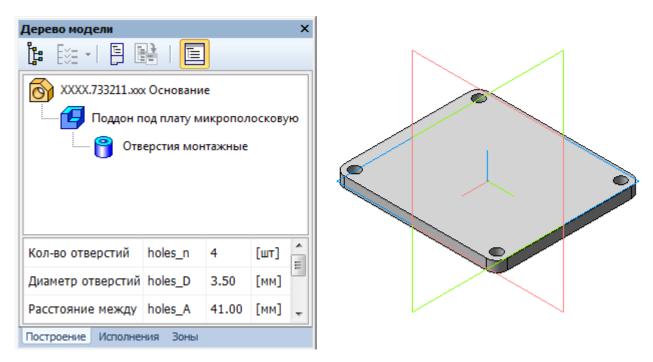


Рисунок 3.13 – Формирование конструкторского решения. Добавление КФФ в 3D-модель

Результат добавления в создаваемую 3D-модель «Основание» еще двух элементов – КФФ «Окно сквозное под пайку» и «Выборка под плату микрополосковую» представлен на рисунке 3.14.

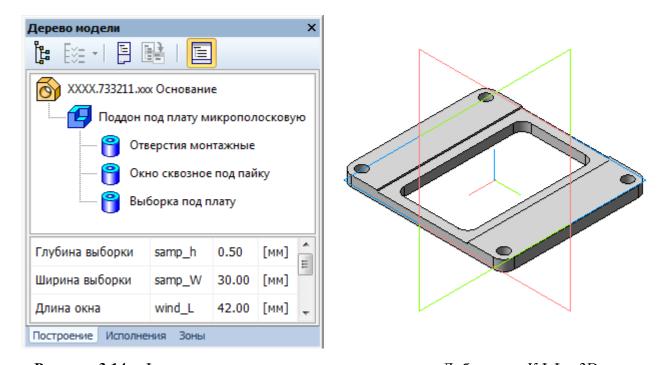


Рисунок 3.14 — Формирование конструкторского решения. Добавление КФФ в 3D-модель

При добавлении второго и последующих КФФ в качестве исходных данных для сопряжений могут быть заданы как ГЭ КФБ, так и последующих КФФ; очевидно, что добавляемый КФФ зависит от нижайшего родительского элемента, а следовательно, и от всех элементов, ему предшествующих.

Далее производится оценка конструкторской грамотности сформированной 3D-модели *«Основание»*; окно с результатами проведенной оценки представлено на рисунке 3.15; как видно, конструкторское решение полностью корректно.

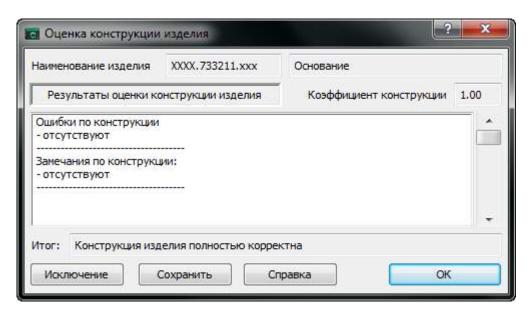


Рисунок 3.15 – Оценка конструкции изделия. Подтверждение корректности

Модификация конструкторского решения в САD-системе на основе модуля управления конструкторской структурой изделия реализуется тремя способами:

- Изменение значений конструкторских параметров: как на уровне результирующей конструкции, так и на уровне входящих в ее состав КФБ и КФФ такая модификация подразумевает получение как геометрически, так и структурно подобных конструкторских решений;
- Изменение значений атрибутов геометрических сопряжений между КФЭ, в общем случае приводящих к изменению порядка и иерархии КФЭ в дереве конструирования, такой тип модификации практически всегда подразумевает получение геометрически подобных конструкторских решений;
- *Изменение состава КФЭ*: добавление новых КФЭ и / или удаление уже построенных КФЭ – данный тип модификации подразумевает получение семантиче-

ски подобных конструкторских решений, которые отличаются друг от друга как структурно, так и геометрически.

Пример модификации сформированной 3D-модели изделия *«Основание»* (см. рисунок 3.14) представлен на рисунке 3.16. В данном примере используется: изменение параметров КФЭ (длины, ширины и радиуса скругления у КФБ *«Поддон под плату микрополосковую»* и других параметров прочих КФЭ), изменение состава КФЭ (добавление КФФ *«Лапки монтажные»*).

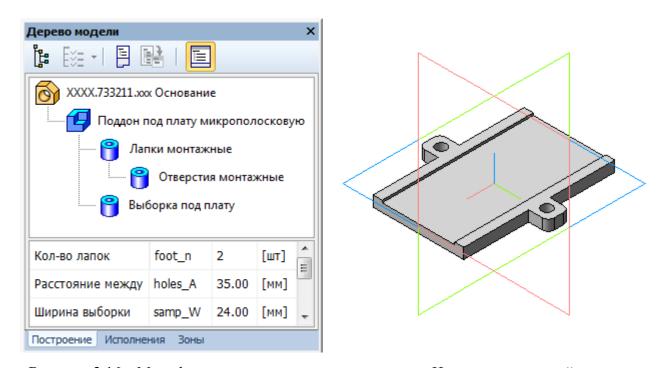


Рисунок 3.16 – Модификация конструкторского решения. Изменение значений параметров КФЭ и их состава в 3D-модели

Конструкторское решение, представленное на рисунке 3.16, является грамотным как *в геометрическом плане* (отсутствуют пересечения/наложения элементов, многотельность и др.), так и *в структурном плане* (противоречия в значениях параметров сопряжений и др.). Однако в плане семантического (конструктивнофункционального) содержания данное решение не является корректным, о чем свидетельствует проведение его оценки, результат которой в виде отчета представлен на рисунке 3.17.

На данном рисунке видно, что все выявленные по результатам оценки замечания относятся исключительно *к внутреннему содержанию* конструкторского решения и определяются предметной областью проектируемого изделия.

Для каждого отмеченного замечания выводятся способы его устранения: изменение значений входных данных (при этом показываются ближайшие допустимые значения), а также замена КФЭ (при этом выводится список КФЭ, рекомендуемых к замене) и т.п. После исправления указанных замечаний конструкторское решение необходимо повторно проверить для уточнения корреляции вновь введенных значений друг с другом, т.к. подобная проверка не реализуется в режиме реального времени при модификации.

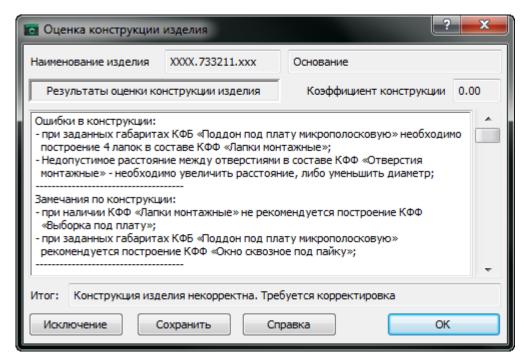


Рисунок 3.17 – Оценка конструкции изделия. Некорректная конструкция

В отдельных случаях сформированное решение можно добавить в *«Исключения»*, что позволит оценить 3D-модель как корректную, и впоследствии, при дальнейших построениях решений с такими же значениями параметров будет отображаться как корректные (но с перечнем выделенных замечаний и ошибок).

Сформированный экземпляр конструкции может быть сохранен с заданным именем (отражающим некую специфику текущего решения) и добавлен в список *«Избранное»* в библиотеки КФЭ. В этом случае будет предоставлен быстрый доступ к заданному решению как удовлетворяющему конкретным требованиям.

Один из возможных вариантов исправления выявленных на рисунке 3.16 замечаний представлен на рисунке 3.18; данное конструкторское решение обладает конструктивно-функциональной целостностью (семантической корректностью) по результатам проведенной оценки конструкции и сохраняется в формате используемой САD-системы.

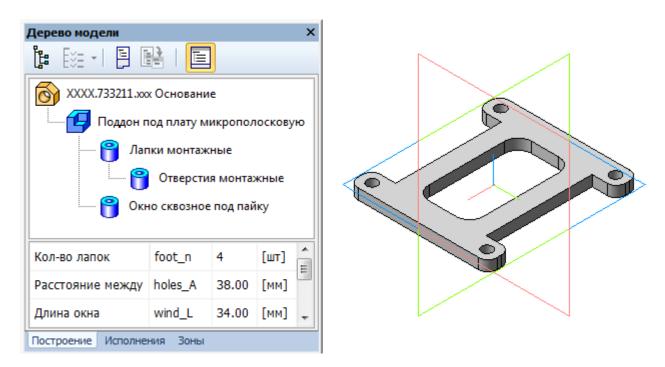


Рисунок 3.18 – Модификация конструкторского решения. Устранение выявленных в результате оценки замечаний

МУКСИ программно реализован с использованием программного средства Microsoft Visual Studio на языке программирования C++, а также библиотеки MFC и двух геометрических ядер: *C3D Toolkit* и *Open CASCADE Technology*.

Геометрическое ядро **C3D Toolkit** – это специализированный инструмент для разработки программного обеспечения, состоящий из четырех базовых модулей, отвечающих за построение геометрической модели, управление построенной моделью и выполнение других функций [2, 87]. Данное ядро разрабатывается и поддерживается ООО «C3D Labs» – дочерним подразделением ЗАО «Аскон». Структура ядра C3D и реализация на его основе справочников 3D-моделей стандартных изделий описывается в работе [149], а разработке модулей построения конструктивных 3D-элементов на основе данного ядра посвящена работа [225].

Платформа **Open CASCADE Technology** представляет собой набор библиотек для геометрического моделирования, полученных на базе языка программирования C++; каждая из библиотек представляет собой набор функций и объектов для разработки специализированных программных средств [31, 186]. Использова-

ние платформы Open CASCADE для разработки приложений описано в работах [34, 224]; на данной платформе основана технология функционально-адаптивного представления проектных процедур [53] и ФА САПР [50].

Как отмечается [2, 31], оба ядра применяются, прежде всего, при разработке систем автоматизированного проектирования.

После описания основных функциональных возможностей обеих компонент, реализующих конструктивно-функциональное проектирование в CAD-системе, а также порядка работы с каждым из них наступает очередь рассмотрения их совместного применения в различных процессах проектной деятельности.

3.3 Конструктивно-функциональное проектирование в САПР с использованием МУКСИ и БКФЭ

Под различными процессами проектной деятельности в САПР понимается конструкторское проектирование изделий двух уровней: *«Деталь»* и *«Сборочная единица»* (*«Узел»*, *«Подузел»*), каждый из которых состоит из формирования различных типов конструкторских документов (КД).

3.3.1 Проектирование изделий уровня «Деталь»

Изделие уровня «Деталь», понятие которому дано в подразделе 1.1 первой Главы, в процессе проектирования, как правило, описывается двумя документами – 2D-чертежом детали и 3D-моделью (также имеющую уровень «Деталь»).

• Разработка КД в виде 3D-модели детали

Процесс формирования проектного решения подробно представлен в подразделе 3.2.4 настоящей Главы.

После определения конструктивно-функциональной специфики изделия (что может быть сделано непосредственно перед построением геометрии) и формирования 3D-модели изделия задаются ее наименование, децимальный номер и (при наличии) номер исполнения, а также технические требования. В сформированную

3D-модель посредством РМІ-данных [131] закладывается конструкторская информация: размерные линии (исполнительные и справочные), обозначения (базы, допуска, шероховатости и др.) и другие технические данные.

Все конструкторские РМІ-данные задаются на уровне КФЭ при их определении как элемента БКФЭ; в таком случае конструкторское решение визуализирует эти данные, а пользователю остается расположить их для лучшей читаемости.

В качестве наглядного примера на рисунке 3.19 представлена сформированная методом конструктивно-функционального проектирования (с визуализацией заложенных РМІ-данных) 3D-модель изделия *«Корпус»*, в который устанавливаются плата микрополосковая и два высокочастотных разъема [110, 141, 156].

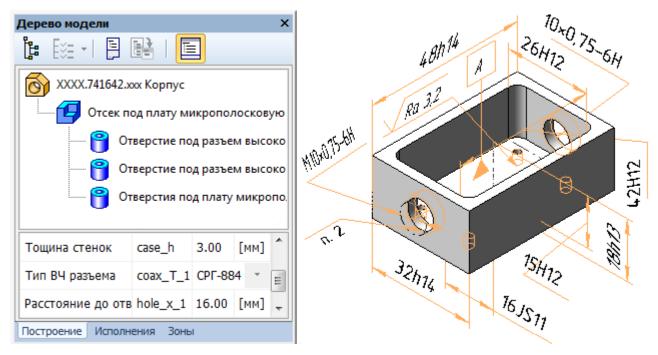


Рисунок 3.19 – Конструкторское решение в виде 3D-модели детали *«Корпус»*

Как видно на данном рисунке, КФЭ *«Отверстие под разъем высокочастотный»* описывается двумя исполнительными размерами: диаметром и резьбой отверстия, а также привязками по горизонтали и вертикали к внутренним стенкам корпуса; данные размеры автоматически формируются после выполнения СМО.

Таким образом, 3D-модель, представленная на рисунке 3.19, содержит в себе всю необходимую для изготовления изделия и его последующей сдачи информацию, а следовательно, в полной мере является конструкторским документом.

• Разработка КД в виде 2D-чертежа детали

Зачастую инструментарий 3D-моделирования является лишь вспомогательным для более наглядного представления будущей конструкции и не используется в полной мере на производстве [231]. В таких случаях 2D-чертежи остаются основным конструкторским документом [220].

Функционал всех современных САD-систем, в том числе и САПР *«Компас-3D»*, обеспечивает автоматизированную генерацию чертежей из 3D-моделей, при этом сформированный чертеж требует обязательной ручной доработки инженера.

Поскольку каждый КФЭ содержит в себе конструкторские данные, при формировании чертежа последние автоматически наследуются при построении видов и сечений. Пользователю необходимо убрать дублирующие размеры и расположить все обозначения в удобном для чтения виде.

В продолжение примера, представленного на предыдущем рисунке, на рисунке 3.20 представлены два 2D-фрагмента изделия *«Корпус»*: основной вид (спереди) и разрез; оба фрагмента автоматически сформированы по конструкторской 3D-модели (см. рисунок 3.19) и впоследствии доработаны вручную.

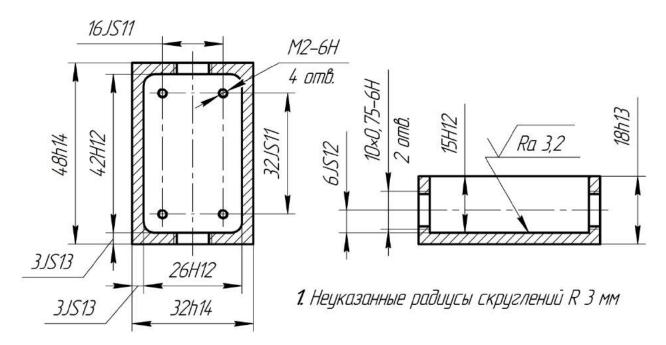


Рисунок 3.20 – Конструкторские 2D-фрагменты детали *«Корпус»*

Также на уровне КФЭ (посредством СМО) в процессе построения 3D-модели задается и некоторый набор технических требований, впоследствии обобщаемый

при формировании конструкторского решения и выводимый при оформлении конструкторской документации.

Таким образом, при автоматизированном построении 2D-чертежа нет необходимости дублировать уже заложенные на уровне КФЭ размеры, а необходимо только установить привязку к базовым структурным элементам изделия.

Сформированный 2D-чертеж ассоциативно связан с 3D-моделью: при внесении изменений в последнюю, чертеж перестраивается, после чего необходимо повторение проделанных манипуляций с новым набором конструкторских данных, выводимых на оформляемом чертеже.

3.3.2 Проектирование изделий уровня «Сборочная единица»

В настоящее время подавляющее большинство проектируемых изделий являются сборочными единицами (узлами). В связи с чем, при разработке комплекса программных средств особое внимание уделялось снижению трудоемкости и интеллектуальной нагрузки на пользователя в процессах построения и модификации КД на сборочные единицы – узлы и подузлы.

• Разработка КД в виде сборочной 3D-модели

Формирование сборочной 3D-модели в САПР состоит из двух этапов [98]:

- ∘ Добавление 3D-моделей уровня «Деталь» и «Сборочная единица»;
- Установление сопряжений между 3D-моделями (и / или системой координат).

При конструировании посредством модуля управления КСИ и библиотеки КФЭ 3D-модели компонент также добавляются в формируемую 3D-сборку; отличием же является то, что сопряжения выполняются к структурным элементам соответствующих КФЭ в составе используемых 3D-моделей (а не к геометрическим элементам друг друга). Такой способ построения основан на предварительно заданных правилах — аналогично порядку построения 3D-модели как системы КФЭ.

Правила регламентируют как сопрягаемые компоненты в составе входящих в сборочную модель изделий, так и допустимые значения данных сопряжений. Т.е. каждое конструкторское решение в виде 3D-модели в зависимости от конструк-

тивно-функциональной специфики имеет собственные исходные данные для сопряжений, в процессе задания которых производится проверка их корректности.

Все обнаруженные несоответствия и ошибки выводятся пользователю для их решения. А формируемая сборочная 3D-модель сохраняет корректность и конструктивно-функциональную целостность в заданной предметной области.

Сформированной 3D-модели изделия уровня «Сборочная единица» также задаются наименование, децимальный номер и технические требования, а также (при наличии) номер исполнения и технические характеристики. Номера позиций компонент, способы и условия их установки (пайка, сварка и др.), исполнительные размеры и другая информация задаются посредством РМІ-данных [131].

На рисунке 3.21 представлена сформированная на основе конструктивнофункционального проектирования сборочная 3D-модель **подузла** *«Корпус»*, состоящего из одной детали *«Корпус»* (см. рисунок 3.19) и двух сборочных единиц *«Разъем СРГ-50-884ФВ»*. Такие подузлы используются при проектировании для предварительного контроля электрических параметров [110, 141].

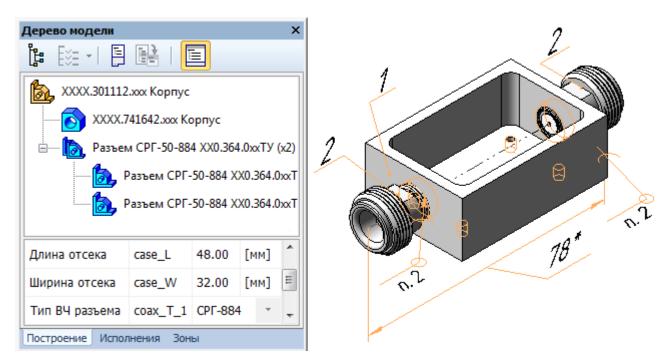


Рисунок 3.21 – Конструкторское решение в виде 3D-модели подузла *«Корпус»*

На рисунке 3.21 видно, что сформированная сборочная 3D-модель содержит все необходимые и достаточные данные для изготовления (сборки) и сдачи изде-

лия, следовательно, также и как 3D-модель, представленная на рисунке 3.19, в полной мере является *конструкторским документом*.

• Разработка КД в виде сборочного 2D-чертежа и спецификации

К основным конструкторским документам, описывающим СЕ (узел/подузел) на этапе конструирования, относятся *сборочный чертеж* и *спецификация*.

Сборочный чертеж — основной документ, регламентирующий изготовление сборочной единицы. К отображаемой информации относятся взаимное расположение, установка и фиксация компонентов и при необходимости их обработка.

Также как в случае с чертежами деталей, все САПР обеспечивают автоматизированную генерацию чертежей по сформированным сборочным 3D-моделям.

Задаваемые при построении 3D-модели способы установки пары компонентов: резьбовое соединение, склейка, сварка, пайка и др., обеспечивают формирование соответствующих выносных линий, обозначаемых на чертеже.

На рисунке 3.22 представлен сформированный фрагмент 2D-чертежа подузла *«Корпус»*, представленного ранее на рисунке 3.21.

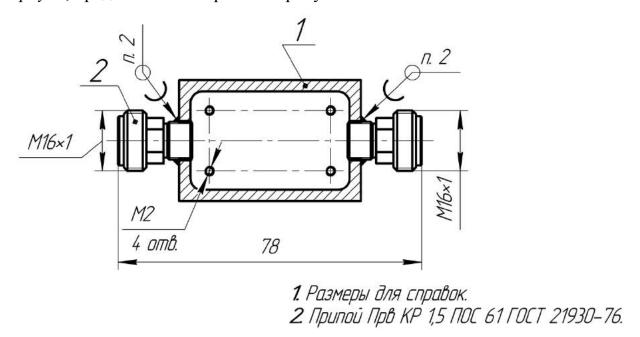


Рисунок 3.22 – Конструкторские 2D-фрагменты подузла *«Корпус»*

Обработка изначально сформированного 2D-фрагмента сводилась лишь к расположению соответствующих обозначающих элементов для удобного чтения.

Применение МУКСИ и БКФЭ позволяют в режиме реального времени модифицировать сборочные чертежи посредством управления конструкторскими параметрами, выделенными на уровне сборочной 3D-модели; при этом и 3D-сборка, и сформированные чертежи сохраняют конструктивную и смысловую корректность за счет сопряжения компонент к структурным элементам друг друга.

Спецификация – текстовый конструкторский документ, содержащий в себе информацию о составе сборочной единицы в плане ее конструкции, а также иные документы, описывающие ее в различных аспектах.

Спецификация автоматически генерируется из сформированной сборочной 3D-модели. Отдельные функции, предоставляемые модулем управления КСИ или библиотекой КФЭ, для этого не требуются.

Каждый из сформированных конструкторских документов, представленных на рисунках 3.19 — 3.22, обладая всей необходимой конструкторской информацией на заданном этапе, может быть загружен в PLM-систему как рабочий документ, по которому уже можно изготавливать изделие.

В рамках программной реализации были разработаны и зарегистрированы: две программы для ЭВМ: «Модуль семантического конструирования микрополосковых СВЧ устройств» [175] и «Модуль конструкторского проектирования соединителей радиочастотных коаксиальных» [176], представляющие собой комплекс из МУКСИ и БКФЭ, адаптированный под конкретную предметную область, а также база данных «Библиотека семантически обобщаемых базовых операций САD-системы» [177], предназначенная для управления конструкторскими данными библиотеки КФЭ в составе обозначенного выше модуля.

Для наглядности в приложениях представлены экранные снимки, демонстрирующие порядок работы с реализованным комплексом программных средств:

- о в приложении А представлен процесс формирования проектного решения;
- о в приложении Б представлено отображение проектных решений;
- о в приложении В представлен процесс модификации проектных решений;

3.4 Выводы и рекомендации по Главе 3

В процессе и по результатам разработки комплекса программных средств, реализующего конструктивно-функциональную поддержку процесса проектирования в САПР, формируются следующие выводы:

- 1. Библиотека конструктивно-функциональных элементов, имеющая признаки и библиотеки шаблонов и специализированной библиотеки, содержит в себе процессы построения КФЭ в виде семантических макроопераций, формируемых путем обобщения базовых операций CAD-системы по их смысловому содержанию, и отображаемых как целостная единица в дереве построения 3D-модели;
- **2.** 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;
- **3.** Модуль управления конструкторской структурой изделия, выполненный как надстройка к САПР *«Компас-3D»*, обеспечивает отображение (с возможностью управления, т.е. модификации) конструкторской структуры изделия иерархической структуры, описывающей конструкторское решение как систему конструктивно-функциональных элементов, что позволяет фиксировать и воспроизводить ее смысловое содержание в заданной предметной области;
- **4.** Применение МУКСИ задает модульный принцип процесса конструирования в САD-системе, обеспечивая формирование обобщенного дерева конструирования, представляющего собой класс семантически подобных решений;
- **5.** Комплекс программных средств в виде БКФЭ и МУКСИ в полной мере реализует конструктивно-функциональную поддержку этапа конструкторского проектирования в САПР: как изделий уровня *«Деталь»*, так и изделий уровня *«Сборочная единица (узел/подузел)»*.

Поскольку результаты программной реализации соответствуют изначальным целям и требованиям, то следующим и заключительным шагом является исследование эффективности применения средств конструктивно-функциональной поддержки проектирования в процессах проектной деятельности в CAD-системе.

ГЛАВА 4 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНСТРУКТИВНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ЭТАПА КОНСТРУКТОРСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В данной Главе проводится исследование эффективности *конструктивно- функционального проектирования* (**КФП**) в сравнении со следующими подходами к конструкторской деятельности в САПР (рассмотренными ранее в Главе 1):

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

В качестве инструментов при проведении исследования используются реализованные в рамках диссертационной работы программы для ЭВМ [175, 176] и база данных [177] (подробно описанные в Главе 3), а также система автоматизированного проектирования «Компас-3D».

Основным показателем эффективности выступает следующий параметр:

 ○ <u>Временные ресурсы</u> – время, затрачиваемое на формирование проектного решения в виде 3D-модели проектируемого изделия.

На основе анализов результатов проведенного исследования формируются дополнительные показатели, характеризующие эффективность применения той или иной технологии в решении конкретной из рассматриваемых задач.

Проводимое исследование состоит из двух частей, в зависимости от уровня проектируемого изделия. Первая часть посвящена изделиям уровня *«Деталь»*.

4.1 Конструкторское проектирование изделий уровня «Деталь»

В рамках проводимого исследования проектирование изделий уровня *«Де- таль»* представляет собой построение 3D-модели, описывающей его конструкцию и удовлетворяющей заданному ТЗ в виде набора конструкторских параметров.

В первой части исследования рассматривается сравнение обозначенных ранее подходов в решении двух практических задач, а именно:

- Формирование новой 3D-модели изделия;
- Модификация сформированной 3D-модели изделия.

Перед переходом непосредственно к этим задачам отдельно рассматриваются исходные данные, являющиеся общими к первой части настоящего исследования.

4.1.1 Исходные данные к экспериментам

В первой части исследования в качестве проектируемых изделий использовались детали — компоненты микрополосковых модулей СВЧ в количестве 57 единиц, а также компоненты радиочастотных коаксиальных соединителей в количестве 26 единиц, некоторые из данных изделий представлены на рисунке 4.1.

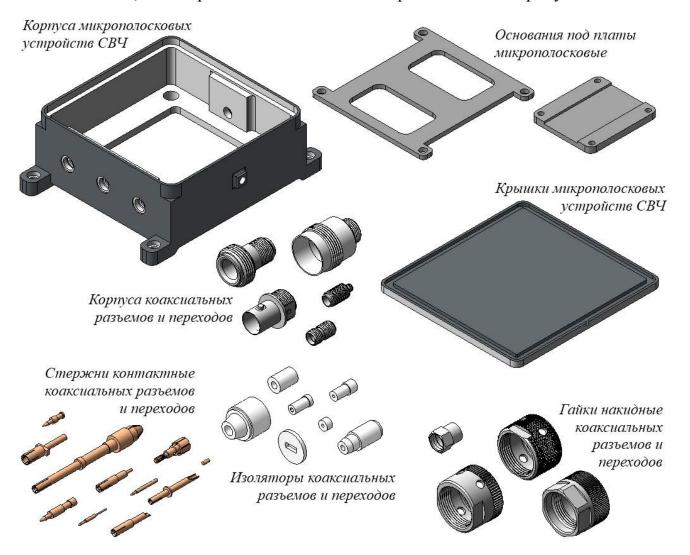


Рисунок 4.1 – 3D-модели деталей, участвующие в первой части эксперимента

Как видно на данном рисунке, представленные 3D-модели сильно отличаются друг от друга: как структурой (количеством и составом геометрических элементов), так и способом и историей построения (количеством и набором базовых операций). Такой дифференцированный состав 3D-моделей задает наиболее подробный и информативный характер всего исследования.

Соответствующее каждому Т3 конструкторское решение в виде 3D-модели поочередно формировалось посредством каждой из сравниваемых технологий.

Ввиду сильной дифференциации рассматриваемых 3D-моделей, а также уникальности каждого конструкторского решения отдельного проектировщика, отличающегося от других (при этом удовлетворяющего требованиям ТЗ), в качестве выходных данных эксперимента выступает следующая зависимость:

зависимость временных ресурсов (t), необходимых на формирование проектного решения, **от его геометрической сложности** – **количества геометрических элементов (n)**, составляющих 3D-модель.

После определения исходных данных к первой части исследования настает очередь перехода к экспериментам непосредственно.

4.1.2 Формирование новой 3D-модели

Первая экспериментальная задача заключалась в построении по заданным в техническом задании конструкторским параметрам конструкции изделия в виде 3D-модели. Структура данного эксперимента представлена на рисунке 4.2.

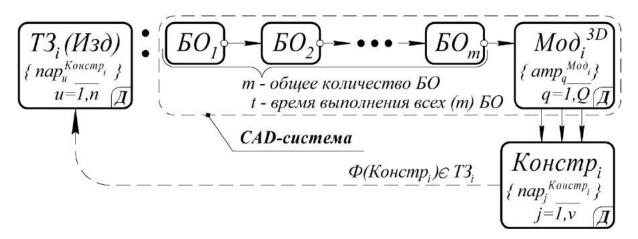


Рисунок 4.2 – Структурная схема эксперимента формирования новой 3D-модели

Полученные графики — зависимости времени формирования удовлетворяющей ТЗ 3D-модели изделия уровня *«Деталь»* от уровня ее геометрической сложности (количества ГЭ в ее составе) для каждого из рассматриваемых подходов к конструкторской деятельности в САПР представлены на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 – Графики зависимости времени, затрачиваемого на формирование новой 3D-модели **(t)** изделия уровня *«Деталь»* от количества ГЭ в ее составе **(n)**

Представленные на рисунке 4.3 графики-зависимости несут первичную информацию о том, что все сравниваемые технологии имеют различные показатели эффективности в решении поставленной задачи, зависящие от ее геометрической сложности. Вполне очевидной является общая тенденция увеличения затрачиваемых временных ресурсов по мере усложнения формируемой 3D-модели.

Среди известных подходов в решении данной задачи наиболее эффективной является технология традиционного параметрического моделирования, ввиду того, что 3D-модель в подавляющем большинстве случаев строится по принципу геометрического соответствия, рассмотренного в подразделе 1.5.3.

Технологии конструирования по базе знаний и функционально-адаптивного представления требуют наибольших временных затрат, требуемых на установление параметрических зависимостей. При этом последняя из них показывает лучшие показатели за счет интуитивно понятного интерфейса исполнительной среды построения ФА САПР, а также работой с 3D-геометрией непосредственно.

Графики для технологии прямого вариационного моделирования совпадают с традиционным параметрическим моделированием, т.к. формирование новых 3D-объектов реализуется посредством базовых операций CAD-системы.

Конструктивно-функциональное проектирование в сравнении с обозначенными подходами показывает свою эффективность только при построении *«сложеных»* 3D-моделей, критерием которых является среднее количество геометрических элементов n > 64. Числовые показатели, характеризующие эффективность Конструктивно-функционального проектирования относительно каждого из представленных подходов в решении данной задачи рассчитываются после описания обеих частей исследования – в разделе 4.3.

Конструкторское решение не всегда формируется с нуля, – часто за его основу берется ранее полученный результат, что рассматривается во второй задаче.

4.1.3 Модификация сформированной 3D-модели

Вторая экспериментальная задача заключалась в модификации заданной конструкции изделия в виде 3D-модели, удовлетворяя уже новому техническому заданию. Структура данного эксперимента представлена на рисунке 4.4.

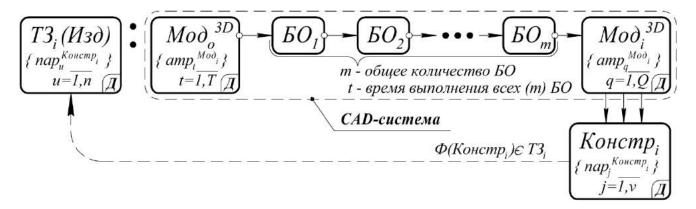


Рисунок 4.4 – Структурная схема эксперимента модификации сформированной 3D-модели

Полученные графики — зависимости времени, необходимого на модификацию исходной 3D-модели изделия уровня *«Деталь»* до соответствия ТЗ, от ее геометрической сложности для каждого из рассматриваемых подходов к конструкторской деятельности в САПР представлены на рисунке 4.5.

На рисунке 4.5 представлены результаты соответствующие частному случаю, при котором исходная 3D-модель модифицировалась проектировщиками, являющимися ее авторами. Однако на производстве так бывает далеко не всегда. В связи с этим, для наиболее подробного исследования был проведен еще один эксперимент, при котором проектировщик, модифицирующий исходную 3D-модель, не являлся ее автором. Полученный график представлен на рисунке 4.6.

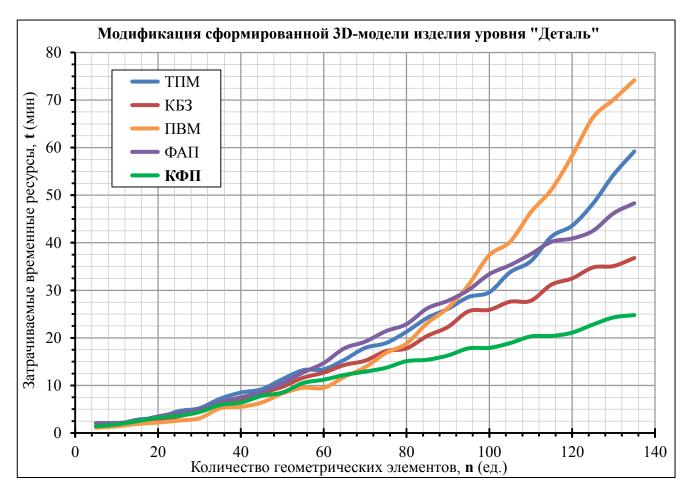


Рисунок 4.5 – Графики зависимости времени, затрачиваемого на модификацию сформированной 3D-модели (t) изделия уровня *«Деталь»* от количества Γ Э в ее составе (n)

Все представленные на рисунках 4.5 и 4.6 графики-зависимости также отображают очевидную тенденцию увеличения затрачиваемых временных ресурсов по мере усложнения формируемой 3D-модели. Особо это заметно в том случае, если

проектировщик не является автором исходной 3D-модели (см. рисунок 4.6). Однако в обоих случаях важен характер данных зависимостей.

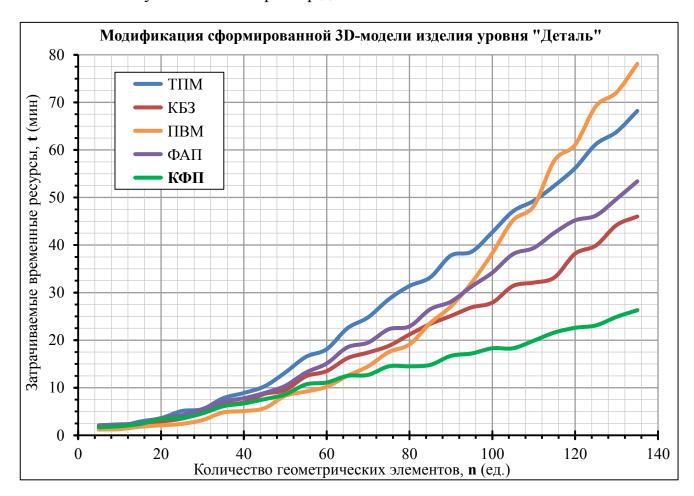


Рисунок 4.6 – Графики зависимости времени, затрачиваемого на модификацию сформированной 3D-модели (t) изделия уровня *«Деталь»* от количества Γ Э в ее составе (n)

Ввиду сложности и трудоемкости процесса полной параметризации 3D-модели в настоящем эксперименте были использованы 3D-модели, параметризованные таким образом, что после изменения значений выделенных параметров, их необходимо было дополнительно подкорректировать вручную – поскольку именно такой способ больше соответствует производственной действительности.

Традиционное параметрическое моделирование является наиболее затратным по временным ресурсам в решении данной задачи. И если в первом случае — при совпадении проектировщика и автора исходной 3D-модели (см. рисунок 4.5) данные затраты сопоставимы с затратами других подходов, то во втором случае — при несовпадении проектировщика и автора (см. рисунок 4.6) данные затраты превосходят затраты других подходов на 14% — 27%. Такой эффект объясняется потерей

конструктивной концепции 3D-модели и невозможностью ее достоверного восстановления сторонним инженером.

Технологии конструирования по базе знаний и функционально-адаптивного проектирования требуют наименьших временные затрат при решении данной задачи. При этом во втором случае (см. рисунок 4.6) технология ФАП является более затратной, что объясняется отсутствием облегчающей восприятие информации о выделенных проектных параметрах (например, привязке к дереву построения, как это реализовано в технологии конструирование по базе знаний).

Прямое вариационное моделирование имеет практически идентичные зависимости в обоих случаях: как при совпадении, так и при несовпадении проектировщика и автора исходной 3D-модели. Это вызвано отсутствием дерева построения, фиксирующего конструкторский замысел, а также работой непосредственно с 3D-геометрией. Однако, по мере увеличения числа геометрических элементов, экспоненциально возрастает количество необходимых накладываемых ограничений, что значительно увеличивает временные ресурсы, при n>90 и n>110 (для первого и второго случаев соответственно) превосходящие традиционное параметрическое моделирование.

Конструктивно-функциональное проектирование в сравнении с обозначенными подходами вновь показывает себя эффективной только при модификации *«сложных»* 3D-моделей, критерием которых в данной задаче является количество геометрических элементов n > 67. Обе зависимости, представленные на рисунках 4.5 и 4.6, отличаются слабо, т.к. выделенные семантические макрооперации обладают фиксированным смысловым содержанием, подтверждаемым геометрией, в связи с чем, пользователь оперирует конструкторским содержанием СМО. Показатели эффективности конструктивно-функционального проектирования относительно каждого из представленных подходов в решении данной задачи рассчитываются после описания обеих частей исследования – в разделе 4.3.

Далее выполняется переход ко второй части исследования, которая посвящена изделиям уровня «Сборочная единица».

4.2 Конструкторское проектирование изделий уровня «Сборочная единица»

В рамках проводимого исследования проектирование изделий уровня *«Сбо-рочная единица»* представляет собой построение сборочной 3D-модели, состоящей из набора 3D-моделей деталей-компонент, описывающей его конструкцию и удовлетворяющей заданному ТЗ в виде набора конструкторских параметров.

Во второй части исследования рассматривается сравнение обозначенных в начале данной Главы подходов в решении двух практических задач, а именно:

- Формирование новой сборочной 3D-модели изделия;
- Модификация сформированной сборочной 3D-модели изделия.

Перед переходом непосредственно к обозначенным задачам рассматриваются исходные данные — общие ко всей второй части настоящего исследования.

4.2.1 Исходные данные к экспериментам

Во второй части исследования в качестве проектируемых изделий использовались сборочные единицы — узлы и подузлы микрополосковых модулей СВЧ в количестве 34 единицы, а также узлы и подузлы радиочастотных коаксиальных соединителей в количестве 19 единиц. Подузлы представляли собой сборочные единицы, являющимися компонентами узлов — конструктивно законченных изделий, выполняющих определенные функции. Некоторые из данных изделий (узлов и подузлов) представлены на рисунке 4.7.

На данном рисунке видно, что представленные сборочные 3D-модели отличаются друг от друга, прежде всего, количеством входящих в них компонент. При этом сами компоненты отличаются как геометрически, так и структурно, и, как следствие требуют применения разнообразных сопряжений (задаваемых посредством БО); полное определение расположения каждого компонента требует разного набора БО. Такой дифференцированный состав сборочных 3D-моделей задает наиболее подробный и информативный характер всего исследования.

Также как и в первой части исследования (см. раздел 4.1), соответствующее каждому ТЗ конструкторское решение в виде сборочной 3D-модели проектируе-

мого изделия поочередно формировалось (или модифицировалось) посредством каждой из сравниваемых технологий.

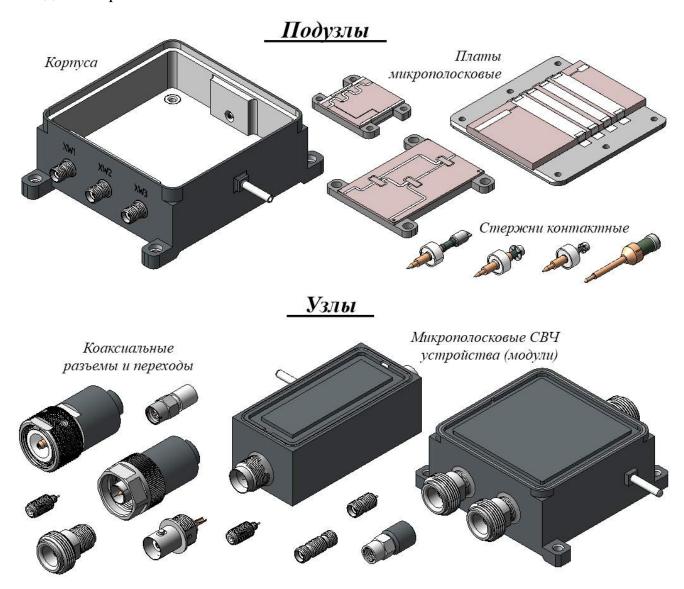


Рисунок 4.7 – 3D-модели сборочных единиц, участвующие во второй части эксперимента

Ввиду сильной дифференциации рассматриваемых сборочных 3D-моделей, а также уникальности каждого конструкторского решения отдельного проектировщика, отличающегося от других (при этом удовлетворяющего требованиям Т3), в качестве выходных данных эксперимента выступает следующая зависимость:

▶ зависимость временных ресурсов (t), необходимых для формирования проектного решения, от его структурной сложности – количества компонент (w), входящих в состав результирующей 3D-сборки.

После определения исходных данных ко второй части исследования настает очередь перехода к экспериментам непосредственно.

4.2.2 Формирование новой сборочной 3D-модели

Первая экспериментальная задача заключалась в построении по заданным в техническом задании конструкторским параметрам конструкции изделия в виде сборочной 3D-модели. Структура эксперимента представлена на рисунке 4.8.

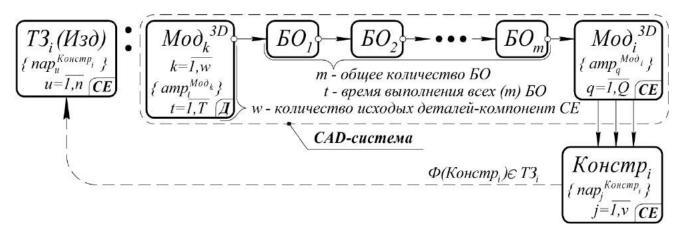


Рисунок 4.8 – Структурная схема эксперимента формирования новой 3D-сборки

Полученные графики — зависимости времени формирования удовлетворяющей ТЗ сборочной 3D-модели изделия уровня «Узел» или «Подузел» от уровня ее структурной сложности (количества компонент в ее составе) для каждого из рассматриваемых подходов к конструированию представлены на рисунке 4.9.

Представленные на рисунке 4.9 графики-зависимости несут первичную информацию о том, что временные ресурсы линейно возрастают по мере увеличения числа компонент в проектируемом изделии уровня *«Сборочная единица»* вне зависимости от выбранного подхода к конструированию в САПР.

Технология прямого вариационного моделирования используется исключительно при работе с 3D-моделями изделий уровня *«Деталь»*, а в связи с этим, во второй части исследования данный подход более не рассматривается.

Технология традиционного параметрического моделирования характеризуется наибольшими затрачиваемыми временными ресурсами, поскольку общее число БО, участвующих в определении положения каждого компонента является примерно одинаковым (в среднем от 2 до 5) и пользователю необходимо выполнить их все для определения взаимоположений набора компонента. Важно отметить, что компоненты сопрягаются геометрическими элементами друг к другу.

Конструирование по базе знаний характеризуется меньшими временными затратами, чем традиционное параметрическое моделирование, что особенно заметно проявляется с увеличением числа компонент сборочной единицы. Это объясняется установлением зависимостей на параметры сопряжений. При этом компоненты сопрягаются с геометрическими и структурными элементами друг друга.

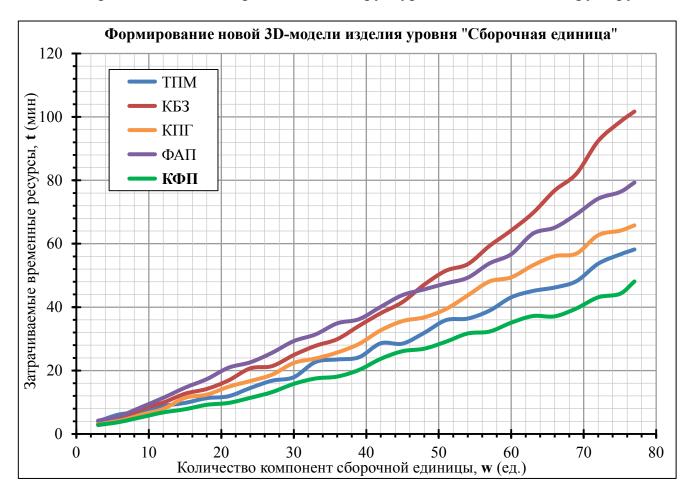


Рисунок 4.9 – Графики зависимости времени, затрачиваемого на формирование новой 3D-сборки **(t)** изделия уровня «*Узел»* и «*Подузел»* от количества компонент в ее составе **(w)**

Функционально адаптивное представление отличается от рассматриваемых подходов наименьшими временными ресурсами, необходимыми на формирование сборочной 3D-модели, за счет того, что расположение каждого компонента задается программными зависимостями. Однако, при этом, компоненты оказываются привязаны к заданным координатам (области пространства), но не к геометрическим элементам друг друга.

Технология компоновочной геометрии характеризуется более высокими временными затратами, чем традиционное параметрическое моделирование, и мень-

шими, чем конструирование по базе знаний и функционально адаптивное представление. При этом сама компоновочная 3D-геометрия, описывающая формируемую сборку обеспечивает привязку компонент к заданному положению в пространстве, но не к структурным и геометрическим элементам друг друга.

Конструктивно-функциональное проектирование проявляет себя как наименее затратный по временным ресурсам подход к построению сборочной 3D-модели. Данное явление справедливо для 3D-сборок, имеющих в своем составе количество компонент $w \in (3, 77)$, т.е. на всем исследуемом диапазоне. Это достигается за счет сопряжений компонент не к геометрическим и структурным (требующим выполнения набора БО), а к конструктивным элементам друг друга, а это, в свою очередь, требует выполнения лишь одной СМО. Расчет показателей эффективности конструктивно-функционального проектирования относительно представленных подходов в решении данной задачи представлен в разделе 4.3.

Сборочные единицы, как и детали, нередко приходится модифицировать – в основном при использовании в качестве основы под новое конструкторское решение. Данный случай соответствует второй задаче и рассматривается далее.

4.2.3 Модификация сформированной сборочной 3D-модели

Вторая экспериментальная задача заключалась в модификации заданной конструкции изделия в виде сборочной 3D-модели, удовлетворяя уже новому техническому заданию. Структура данного эксперимента представлена на рисунке 4.10.

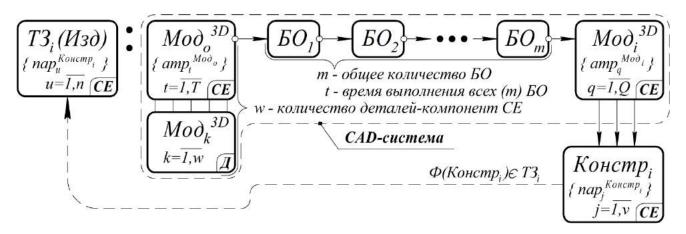


Рисунок 4.10 – Структурная схема эксперимента модификации сформированной 3D-сборки

Полученные графики — зависимости времени, необходимого на модификацию исходной сборочной 3D-модели изделия уровня «Узел» или «Подузел» до соответствия ТЗ, от уровня ее структурной сложности для каждого из рассматриваемых подходов представлены на рисунках 4.11 и 4.12. Также как и в первой части исследования, рассматриваются два частных случая модификации 3D-сборки: в первом случае проектировщик является автором исходного конструкторского решения (см. рисунок 4.11), во втором же — не является (см. рисунок 4.12).

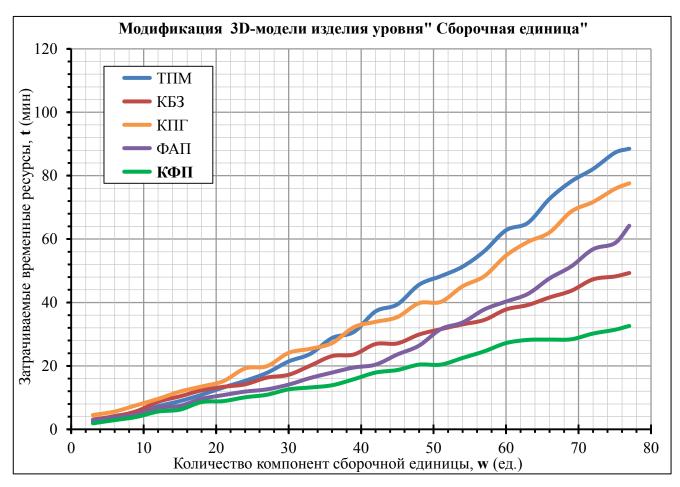


Рисунок 4.11 — Графики зависимости времени, затрачиваемого на модификацию сформированной 3D-сборки (t) изделия уровня «Vзел» и « Π о θ узел» от количества компонент в ее составе (w)

Графики на обоих рисунках демонстрируют увеличение времени, необходимого на модификацию сборочной 3D-модели для ее соответствия новому ТЗ. Также как и у изделий уровня *«Деталь»* (см. рисунки 4.5 и 4.6) в случае несовпадения автора исходного конструкторского решения и проектировщика, затрачиваемые временные ресурсы нелинейно возрастают по мере увеличения структурной сложности 3D-сборки.

Технология традиционного параметрического моделирования характеризуется высокими временными затратами, что особенно ярко проявляется в случае несовпадения автора решения и проектировщика, его модифицирующего (см. рисунок 4.12). Это объясняется потерей конструктивной концепцией и, как следствие, необходимостью перестройки всех сопряжений. Кроме того, при последовательном изменении параметров сопряжений, возможны ситуации с их противоречием друг другу, устранение которых требует дополнительных временных ресурсов. При увеличении числа компонент: при w>24 — по рисунку 4.11; и w>22 — по рисунку 4.12, проще и эффективнее (по временным ресурсам) выполнить формирование 3D-сборки заново, нежели изменять параметры соответствующих БО.

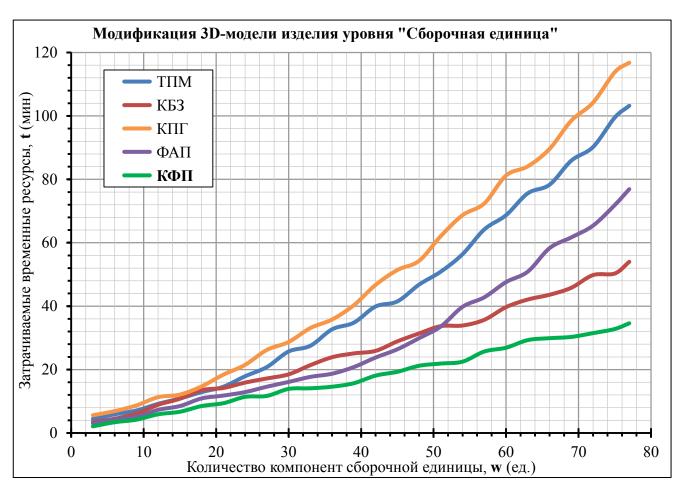


Рисунок 4.12 — Графики зависимости времени, затрачиваемого на модификацию сформированной 3D-сборки (t) изделия уровня «*Узел*» и «*Подузел*» от количества компонент в ее составе (w)

Компоновочная геометрия требует высоких временных затрат: в первом случае (см. рисунок 4.11) – при количестве компонент сборки w < 36 (при увеличении их количества данный подход уступает только лишь традиционному параметри-

ческому моделированию); во втором случае — во всем диапазоне количества компонент $w \in (3, 77)$. Такой эффект объясняется тем, что файл компоновочной геометрии представляет собой набор эскизов, определяющих расположение компонент, привязка которых друг к другу осуществляется к области пространства, задаваемого данными эскизами. Распознать и принять в работу компоновочную геометрию проектировщику, не являющемуся ее автором, крайне затруднительно.

Конструирование по базе знаний является наиболее эффективным подходом модификации 3D-сборки за счет привязки компонент к структурным элементам друг друга. Такой подход позволяет обеспечивать и геометрическую и структурную модификацию конструкторского решения. При этом нередки случае доработки сопряжений вручную (ввиду изменяющихся входных данных к сопряжениям), на что тратятся дополнительные временные ресурсы. При данном подходе как в случае совпадения автора исходной 3D-модели и проектировщика, ее модифицирующего, так и в случае их несовпадения, графики слабо отличаются друг от друга в сторону увеличения временных ресурсов во втором случае.

Функционально адаптивное представление в решении данной задачи характеризуется более высокими временными затратами, чем конструирование по базе знаний (при w>52), что объясняется отсутствием привязок компонент сборки друг к другу. Таким образом, при модификации изменяется только структура компонент, но не их расположение, которое пользователю необходимо задавать вручную, а это в свою очередь требует наибольших временных ресурсов, порой сравнимых с технологией традиционного параметрического моделирования. В случае несовпадения автора конструкторского решения и проектировщика, его модифицирующего, затрачиваемые временные ресурсы значительно возрастают.

Конструктивно-функциональное проектирование отличается наименьшими временными ресурсами, затрачиваемыми на модификацию сборочной 3D-модели на всем исследуемом диапазоне структурной сложности (w ∈ (3, 77)) за счет того, что положение каждого компонента в сборке определяется набором параметров одной СМО. Данная тенденция справедлива для обоих случаев: совпадения и несовпадения автора и проектировщика.

После проведения обоих экспериментов и описания полученных выходных данных, наступает очередь их анализа с целью определения относительных показателей эффективности конструктивно-функциональной поддержки этапа конструкторского проектирования в САПР, что представлено далее.

4.3 Анализ результатов исследования

Оценка эффективности конструктивно-функциональной поддержки проектирования в САПР наиболее информативна при представлении результатов анализа выходных данных проведенных исследований в виде сравнении с каждым из примененных подходов, в связи с чем, наилучшая форма их отображения — <u>таблица</u>.

Показателями, количественно характеризующими эффективность конструктивно-функционального проектирования в САПР, являются:

- ▶ Диапазон эффективности диапазон значений, определяющих уровень сложности: геометрической (для изделий уровня «Деталь») и структурной (для изделий уровня «Сборочная единица»), в котором наблюдаются более низкие значения временных ресурсов, затрачиваемых на формирование конструкторского решения, в сравнении с выбранным подходом.
- ▶ Относительная эффективность разница во временных ресурсах, затрачиваемых на формирование конструкторского решения, в сравнении с выбранным подходом, выраженная в процентах (в виде минимального и максимального значений в обозначенном диапазоне эффективности).
- ► Средняя эффективность среднее значение относительной эффективности в обозначенном диапазоне эффективности (по сути, это показатель снижения затрачиваемых временных ресурсов).

Так как все показатели эффективности формируются на основе сравнения, то далее по тексту они обозначаются термином *«относительные показатели»*.

Далее представлена оценка эффективности конструктивно-функционального проектирования в CAD-системе изделий уровня *«Деталь»*.

4.3.1 Эффективность конструкторского проектирования изделий уровня «Деталь»

Относительные показатели эффективности конструктивно-функционального проектирования в САПР применительно к изделиям уровня *«Деталь»* рассчитываются по графикам, представленным на рисунках 4.3, 4.5 и 4.6.

Особенностью конструктивно-функциональной поддержки проектирования изделий уровня *«Деталь»* является ее эффективность только при работе со геометрически сложными (содержащими определенное количество ГЭ) изделиями.

Конкретные значения показателей сильно отличаются друг от друга, в зависимости от специфики решаемых задач. Данные показатели описываются далее – отдельно для каждой решенной задачи.

• Формирование новой 3D-модели

В задачах формирования в САD-системе новых конструкторских решений конструктивно-функциональная поддержка проектирования показывает себя эффективной лишь при работе с 3D-моделями деталей со средним количеством ГЭ более n>62. Относительная эффективность при этом сильно отличается у различных подходов.

Наиболее близкой по затратам временных ресурсов является традиционное параметрическое моделирование, однако при увеличении количества геометрических элементов в 3D-модели, требуется выполнение большего числа БО, каждая из которых требует задания фиксированного набора исходных данных. В отличие от такого стандартного подхода, в результате выполнения СМО формируется СМЭГ, состоящий из некоторого набора ГЭ (как правило, больших, чем у КЭГ), в связи с чем, для построения 3D-модели требуется меньшее количество СМО, чем БО. К тому же за счет семантического содержания СМО их построение сопровождается низкой интеллектуальной нагрузкой на пользователя. Рассчитанная по графикам, представленным на рисунке 4.3, максимальная разница в затрачиваемых временных ресурсах в диапазоне эффективности составляет 49,6%.

Задание параметрических зависимостей при конструктивно-функциональном проектировании имеет признаки двух подходов: внутренние зависимости задаются программным образом (аналогично функционально-адаптивному представлению), а внешние – геометрически (аналогично конструированию по базе знаний). При этом параметризации подвергается не вся 3D-модель, а лишь ее фрагменты (СМЭГ), обладающие меньшей геометрической сложностью и, как следствие, характеризуемые меньшей трудоемкостью (и временными ресурсами) в плане параметризации. Средняя эффективность конструктивно-функционального поддержки проектирования относительно технологий ФАП и КБЗ составляет 32,2% и 35,8% соответственно.

На основе анализа графиков, представленных на рисунке 4.3, получены числовые значения показателей, характеризующих относительную эффективность конструктивно-функциональной поддержки проектирования изделий уровня *«Деталь»*; они представлены в таблице 4.1 (страница 167).

• Модификация сформированной 3D-модели

В задачах модификации в CAD-системе уже сформированных конструкторских решений диапазон эффективности конструктивно-функциональной поддержки значительно меняется: среднее количество ГЭ в составе 3D-модели детали при различных условиях варьируется от n > 19 до n > 61. Разница в показателях относительной эффективности у различных подходов выражена более ярко, чем в предыдущей задаче.

Модификация конструкторского решения в САПР, основное преимущество которой заключается в экономии трудовых и временных ресурсов, характеризуется нелинейным возрастанием последних с увеличением геометрической сложности модифицируемой 3D-модели.

Наиболее близкими по затрачиваемым временным ресурсам являются конструирование по базе знаний и прямое вариационное моделирование. Первый из этих подходов показывает самые лучшие показатели при работе с 3D-моделями *«низкой сложности»* (при n < 62), экспоненциально увеличивая требуемые вре-

менные ресурсы по мере увеличения геометрической сложности. Второй же подход сохраняет более линейную зависимость на всем диапазоне входных данных $(n \in (5, 135))$, по мере увеличения геометрической сложности 3D-модели, становившуюся ближайшей к методу конструктивно-функциональной поддержке. Низкие показатели затрачиваемого времени на формирование конструкторского решения при конструктивно-функциональном проектировании объясняются следующим образом. Каждая СМО, участвующая в построении 3D-модели, описывается набором параметров, значения которых определяют экземпляр 3D-модели. В процессе изменения значений данных значений, противоречия между ними отсутствуют, ввиду того, что каждый СМЭГ описывается только одним набором параметров и его модификация не способна нарушить структурную целостность проектного решения. Таким образом реализуется модульный принцип процесса конструкторского проектирования в САПР, особо ярко проявляющийся с увеличением геометрической сложности проектного решения в виде 3D-модели. Средняя эффективность конструктивно-функциональной поддержки проектирования относительно технологий ПВМ и КБЗ составляет 45,4% и 23,9% соответственно.

Важной особенностью является формирование в результате модификации только конструктивно грамотного и верного проектного решения, за счет предопределенного поведения СМО (такой же принцип может быть реализован и в технологии конструирования по базе знаний). Таким образом, устраняется необходимость дальнейшей корректировки и доработки полученной 3D-геометрии.

На основе анализа графиков, представленных на рисунках 4.5 и 4.6 (соответствующих двум частным случаям), получены средние значения показателей относительной эффективности конструктивно-функциональной поддержки проектирования изделий уровня *«Деталь»*; они представлены в таблице 4.2 (страница 167).

Динамика анализируемых выходных данных экспериментов говорит о том, что при дальнейшем увеличении геометрической сложности 3D-модели изделия уровня *«Деталь»* (количества входящих в ее состав ГЭ), эффективность конструктивно-функциональной поддержки проектирования будет возрастать пропорционально количеству ГЭ.

Таблица 4.1 Относительные показатели эффективности конструктивно-функциональной поддержки проектирования в САПР при формировании новой 3D-модели уровня *«Деталь»*

П 11	Сравниваемые подходы, относительно которых рассчитаны показатели			
Показатели эффективности конструктивно-функционального проектирования	Традиционное параметрическое моделирование	Прямое вариационное моделирование	Конструирование по базе знаний	Функционально адаптивное представление
Диапазон эффективности, [количество ГЭ]	[62, 135 ⁺]	[62, 135 ⁺]	[57, 135 ⁺]	[53, 135 ⁺]
Относительная эффективность в диапазоне, [%]	2,4% – 29,7%	2,4% – 29,7%	8,5% – 42,4%	11,4% – 49,6%
Средняя эффективность в диапазоне, [%]	19,3%	19,3%	32,2%	35,8%

Таблица 4.2 Относительные показатели эффективности конструктивно-функциональной поддержки проектирования в САПР при модификации уже сформированной 3D-модели уровня *«Деталь»*

П 11	Сравниваемые подходы, относительно которых рассчитаны показатели			
Показатели эффективности - конструктивно-функционального проектирования	Традиционное параметрическое моделирование	Прямое вариационное моделирование	Конструирование по базе знаний	Функционально адаптивное представление
Диапазон эффективности, [количество ГЭ]	[19, 135 ⁺]	[61, 135 ⁺]	[41, 135 ⁺]	[22, 135 ⁺]
Относительная эффективность в диапазоне, [%]	9,3% – 60,2%	3,5% – 66,5%	2,7% – 39,4%	6,6% - 50,9%
Средняя эффективность в диапазоне, [%]	38,6%	45,4%	23,9%	32,5%

4.3.2 Эффективность конструкторского проектирования изделий уровня «Сборочная единица»

Относительные показатели эффективности конструктивно-функционального проектирования в САПР применительно к изделиям уровня *«Сборочная единица»* рассчитываются по графикам, представленным на рисунках 4.9, 4.11 и 4.12.

Особенностью конструктивно-функциональной поддержки конструкторского проектирования изделий уровня *«Сборочная единица»* является ее эффективность на всем диапазоне структурной сложности (независимо от количества компонент, входящих в состав сборочной единицы – узла или подузла).

Конкретные значения показателей, как и в предыдущем подразделе, сильно отличаются друг от друга, в зависимости от специфики решаемых задач. Данные показатели описываются далее – отдельно для каждой решенной задачи.

• Формирование новой сборочной 3D-модели

В задачах формирования в САD-системе новых конструкторских решений конструктивно-функциональная поддержка проектирования показывает себя эффективной при работе со сборочными 3D-моделями любой структурной сложности (с числом компонент $w \in (3, 77)$). Разница в относительной эффективности у различных подходов при этом выражена слабо.

Наиболее близким по затрачиваемым временным ресурсам подходом при формировании 3D-сборки является традиционное параметрическое моделирование, при котором расположение каждого компонента (кроме первого) определяется набором БО установки сопряжений. При формировании 3D-сборки согласно же конструктивно-функциональному проектированию каждый компонент определяется расположением одной макрооперацией (СМО), содержащей в себе набор правил, обеспечивающих привязку к конструктивным элементам соответствующих компонент. В связи с тем, что расположение каждого компонента определяется только одной операцией, то с ростом структурной сложности снижается время, затрачиваемое на их сопряжения. За счет такого эффекта максимальная разница во временных ресурсах с данным подходом составляет 38,6%; с другими

подходами данный показатель принимает большие значения. Кроме того, в отличие от функционально адаптивного представления и компоновочной геометрии, сформированная 3D-сборка обладает структурной целостностью, т.е. рассматривается как единый объект в САПР, что соответствует представлению сборочных единиц по ЕСКД.

Установление параметрических зависимостей также как и в задаче формирования 3D-моделей деталей имеет признаки функционально адаптивного представления и конструирования по базе знаний. Способы привязки компонент друг другу (определяемыми конкретными экземплярами компонент) задаются программно, тогда как параметры выбранного способа сопряжений (с учетом ветвей альтернатив) выводятся для их задания непосредственно пользователем. Средняя эффективность конструктивно-функциональной поддержки проектирования относительно технологий ФАП и КБЗ составляет 43,9% и 40,7% соответственно.

На основе анализа графиков, представленных на рисунке 4.9, получены числовые значения показателей, характеризующих относительную эффективность конструктивно-функциональной поддержки проектирования изделий уровня *«Сборочная единица»*; которые представлены в таблице 4.3 (страница 171).

• Модификация сформированной сборочной 3D-модели

В задачах модификации в САD-системе уже сформированных конструкторских решений диапазон эффективности конструктивно-функционального проектирования не изменяется и остается актуальным для 3D-сборок любой структурной сложности (с числом компонент $w \in (3, 77)$). Разница в относительной эффективности у различных подходов при этом выражена намного ярче, нежели в предыдущей задаче.

Также как и в задаче модификации 3D-модели детали, графики, представленные на рисунках 4.11 и 4.12, характеризуются нелинейной зависимостью затрачиваемых временных ресурсов от числа компонент сборочной 3D-модели, при этом сама нелинейность выражена более ярко. Примечательно, что при определенном уровне сложности проще построить 3D-сборку заново, чем ее модифицировать.

Наиболее близкими характеристиками обладают функционально адаптивное представление и конструирование по базе знаний, при этом у последнего наблюдается явный выигрыш. Такое явление объясняется тем, что при технологии ФАП компоненты не привязаны друг другу (а только к координатам пространства) и их сопряжения необходимо задавать вручную – в тех случая, когда сам алгоритм модификации не реализован программно в рамке проектной процедуры. Конструирование по базе знаний обеспечивает фиксацию компонент к геометрическим элементам друг друга, но такой подход актуален при фиксированной структуре конструкторского решения, а при изменении количества ГЭ (или их типов) возможны случаи противоречий в уже созданных сопряжениях. За счет того, что, как уже было отмечено, каждый компонент при конструктивно-функциональной поддержке проектирования размещается посредством одной СМО, то и ее модификация будет затрагивать полное расположения конкретного компонента. За счет такого модульного принципа отсутствуют противоречия между разными компонентами, а следовательно, требуется фиксированное время на их определение.

Таким образом, конструктивно-функциональная поддержка проектирвоания задает последовательный характер процесса модификации. Ввиду уменьшения временных ресурсов, затрачиваемых на определение положения каждого компонента, общее время формирования 3D-сборки в сравнении с другими подходами уменьшается, а средняя разница, отображающая эффективность, при этом варьируется от 10,8% до 67,3%.

На основе анализа графиков, представленных на рисунках 4.11 и 4.12 (соответствующих двум частным случаям), получены средние значения показателей относительной эффективности конструктивно-функциональной поддержки проектирования изделий уровня *«Сборочная единица»*; они представлены в таблице 4.4 (страница 171).

Динамика анализируемых выходных данных экспериментов говорит о том, что при дальнейшем увеличении структурной сложности сборочной 3D-модели, эффективность конструктивно-функциональной поддержки проектирования будет возрастать прямо пропорционально количеству компонент.

Таблица 4.3 Относительные показатели эффективности конструктивно-функциональной поддержки проектирования в САПР при формировании новой 3D-модели уровня *«Сборочная единица»*

П 11	Сравниваемые подходы, относительно которых рассчитаны показатели			
Показатели эффективности конструктивно-функционального проектирования	Традиционное параметрическое моделирование	Компоновочная геометрия	Конструирование по базе знаний	Функционально адаптивное представление
Диапазон эффективности, [количество компонент]	[3, 77 ⁺]	[3, 77 ⁺]	[3, 77 ⁺]	[3, 77 ⁺]
Относительная эффективность в диапазоне, [%]	8,2% – 38,6%	8,4% – 34,7%	9,5% – 55,2%	19,8% - 53,3%
Средняя эффективность в диапазоне, [%]	19,8%	27,1%	40,7%	43,9%

Таблица 4.4 Относительные показатели эффективности конструктивно-функциональной поддержки проектирования в САПР при модификации уже сформированной 3D-модели уровня *«Сборочная единица»*

Показатели эффективности конструктивно-функционального проектирования	Сравниваемые подходы, относительно которых рассчитаны показатели			
	Традиционное параметрическое моделирование	Компоновочная геометрия	Конструирование по базе знаний	Функционально адаптивное представление
Диапазон эффективности, [количество компонент]	[3, 77 ⁺]	[3, 77 ⁺]	[3, 77 ⁺]	[3, 77 ⁺]
Относительная эффективность в диапазоне, [%]	27,6% - 65,5%	33,1% - 67,3%	22,8% – 43,6%	10,8% - 52,2%
Средняя эффективность в диапазоне, [%]	51,2%	58,8%	31,8%	29,1%

4.3.3 Итоговая оценка эффективности

В связи с использованием в проведенном исследовании 3D-моделей различной геометрической и структурной сложностей, а также различием диапазонов эффективности у сравниваемых подходов, наиболее информативным показателем эффективности является ее среднее значение в заданном диапазоне.

На основании данных, представленных в таблицах 4.1 и 4.2, соответствующих задачам проектирования изделий уровня *«Деталь»*, и таблицах 4.3 и 4.4, соответствующих задачам проектирования изделий уровня *«Сборочная единица»*, были сформированы диаграммы эффективности конструктивно-функциональной поддержки проектирования в САПР, представленные на рисунках 4.13 и 4.14.

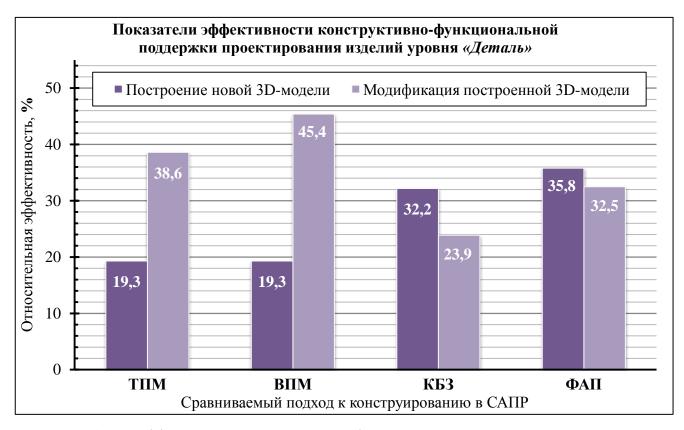


Рисунок 4.13 – Эффективность конструктивно-функциональной поддержки проектирования изделий уровня *«Деталь»* относительно рассматриваемых подходов

На данных рисунках представлены гистограммы, отображающие среднюю эффективность (по сути, показатель снижения затрачиваемых временных ресурсов) применения конструктивно-функциональной поддержки конструкторского проектирования в решении указанных задач (формировании новой и модифика-

ции уже сформированной 3D-модели) относительно каждого из рассматриваемых подходов строго в диапазоне эффективности (т.е. каждый столбец отображает относительный выигрыш по затрачиваемым временным ресурсам).

Как видно на данных рисунках, наибольшая эффективность в задаче формирования нового конструкторского решения (3D-модели детали / сборки) наблюдается в сравнении с подходами, основанными на параметризации (КБЗ и ФАП), тогда как наибольшая эффективность в задаче модификации конструкторских решения наблюдается у подходов, работающих непосредственно с 3D-геометрией.



Рисунок 4.14 – Эффективность конструктивно-функциональной поддержки проектирования изделий уровня *«Сборочная единица»* относительно рассматриваемых подходов

С учетом того, что основным подходом, в настоящее время широко используемым на производстве, является именно традиционное параметрическое моделирование, итоговые показатели эффективности конструктивно-функционального проектирования в полной мере могут определяться относительно этого подхода.

4.4 Выводы и рекомендации по Главе 4

Результатами проведенных в настоящей Главе исследования и анализа эффективности конструктивно-функциональной поддержки этапа конструкторского проектирования в САПР являются следующие выводы:

- **1.** В задачах конструкторского проектирования в САПР изделий уровня *«Де-маль»* конструктивно-функциональная поддержка является эффективной только при работе с 3D-моделями, обладающими высоким уровнем геометрической сложности (количеством геометрических элементов), при этом эффективность прямо пропорциональна уровню геометрической сложности 3D-модели;
- **2.** В задачах конструкторского проектирования в САПР изделий уровня *«Сборочная единица»* конструктивно-функциональная поддержка является эффективной при работе со сборочными 3D-моделями любой структурной сложности (количества входящих в нее компонент), при этом эффективность повышается по мере увеличения уровня структурной сложности 3D-модели;
- **3.** Средняя эффективность конструктивно-функциональной поддержки конструкторского проектирования в САПР относительно наиболее широко используемого в производстве традиционного параметрического моделирования в задачах формирования новой и модификации уже сформированной 3D-модели составляет 19,3% и 38,6% (для изделий уровня *«Деталь»*) и 19,8% и 51,2% (для изделий уровня *«Сборочная единица*) соответственно.

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы были решены все поставленные задачи, а именно:

- 1. Выделены данные, задающие смысловое содержание проектного решения, на основе которых предложена новая модель системного представления проектного решения, отличающаяся критерием конструктивно-функциональной целостности, и позволяющая 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 достижения задач установления параметрических и геометрических ограничений, а также достижения их фиксации и воспроизведения, по результатам которого был сделан вывод о том, что все они, реализуя принципиально различающиеся алгоритмы формирования 3D-модели, не способны в полной мере автоматизировать процесс конструкторского проектирования;
- **3.** Разработана модель отображения конструктивно-функциональной информации о проектируемом изделии в рамках стандартного инструментария САПР, на основе которой предложен новый метод отображения конструкторской структуры изделия в дереве построения 3D-модели, отличающийся биекцией между системой конструктивно-функциональных элементов и последовательностью семантических макроопераций, и 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, способной обеспечить обобщение проектных решений по критерию смыслового содержания и реализовать модульный принцип процесса конструирования в САПР;
- **5.** Впервые представлен метод конструктивно-функциональной поддержки проектирования, основанный на процессной модели проектной деятельности в САПР, обеспечивающий вариативность проектных решений в задачах формиро-

вания новой и модификации уже 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 регистрации программ для ЭВМ и базы данных;
- 7. Проведена оценка эффективности метода конструктивно-функциональной поддержки проектирования в CAD-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 ресурсах:
 - при проектировании изделий уровня *«Деталь»*:
 - в задачах формирования новой 3D-модели на 19,3%;
 - о в задачах модификации уже построенной 3D-модели на **38,6%**;
 - при проектировании изделий уровня «Сборочная единица»:
 - о в задачах формирования новой сборочной 3D-модели на **19,8%**;
 - о 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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

API – Application Programming Interface, программный интерфейс приложения;

CAD – Computer-Aided Design, автоматизированное конструирование;

CAE – Computer-Aided Engineering, автоматизированные инженерные расчеты;

CSG – Constructive Solid Geometry, конструктивная блочная (сплошная) геометрия;

KBE – Knowledge-based Engineering, конструирование по базе знаний;

PLM – Product Lifecycle Management, управление жизненным циклом изделия;

PMI – Product Manufacturing Information, информация о производстве изделия;

VDM – Variational Direct Modeling, прямое вариационное моделирование;

БЗ – база знаний;

БКФЭ – библиотека конструктивно-функциональных элементов;

БО – базовая операция САД-системы;

ГЭ – геометрический элемент;

ДСЕ – детали и сборочные единицы;

ЕСКД – единая система конструкторской документации;

ЖЦИ (ЖЦ) – жизненный цикл изделия;

КБЗ – конструирование по базе знаний;

КД – конструкторская документация;

КПГ – компоновочная геометрия;

КСАП – комплекс средств автоматизированного проектирования;

КСИ – конструкторская структура изделия;

КФБ – конструктивно-функциональная база изделия;

КФП – конструктивно-функциональное проектирование;

КФФ – конструктивно-функциональный фрагмент изделия;

КФЭ – конструктивно-функциональный элемент;

КЭ – конструктивный элемент;

КЭГ – конструктивный элемент геометрии;

МК – маршрут конструирования;

МУКСИ – модуль управления конструкторской структурой изделия;

НИОКР – научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы;

НИР – научно-исследовательские работы;

ОКР – опытно-конструкторские работы;

ПВМ – прямое вариационное моделирование;

САПР – система автоматизированного проектирования;

СЕ – сборочная единица;

СВЧ – сверхвысокие частоты;

СМО – семантическая макрооперация;

СМЭГ – семантический макроэлемент геометрии;

СТ – синхронная технология;

СЧ – составная часть изделия;

ТЗ – техническое задание;

ТП – техническое проектирование (конструирование);

ТПМ – традиционное параметрическое моделирование;

ТР – техническое решение;

ФАП – функционально-адаптированное проектирование

ФСИ – функциональная структура изделия;

ФЭ – функциональный элемент;

ЦМ – цифровой макет изделия;

ЭГМИ – электронная геометрическая модель изделия;

ЭМИ – электронная модель изделия;

ЭП – эскизное проектирование;

ЭСИ – электронная структура изделия;

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- **1.** 3D-модели в ИПИ-технологиях / Л.И. Райкин, И.Л. Райкин, Р.М. Сидорук, К.В. Лупанов // САПР и Графика. 2008. № 12. С. 40-44. URL: https://sapr.ru/article/19876 (дата обращения: 24.02.2016).
- **2.** C3D Toolkit [Электронный ресурс] // C3D Labs : [Сайт]. URL: http://c3dlabs.com/ru/products/c3d-kernel/ (дата обращения: 30.12.2017).
- **3.** САЅЕ-технология создания многоагентных САПР изделий машиностроения / Γ .Б. Евгенев, А.С. Кобелев, А.А. Кокорев, А.Г. Стисес // Известия ЮФУ. Технические науки. -2003. -№ 2 (31). C. 140-147.
- **4.** NX для конструктора-машиностроителя / П.С. Гончаров, М.Ю. Ельцов, С.Б. Коршиков, И.В. Лаптев, В.А. Осиюк. М.: ДМК Пресс, 2010. 504 с.
- **5.** *Абросимов*, Д. Технологическая структура основа технологической подготовки производства и управления производством / Д. *Абросимов*, А. Скопинцев, Г. *Чернобыль* // CAD/CAM/CAE Observer. 2014. \mathbb{N} 6 (90). С. 31-35.
- **6.** *Абросимов, С.Н.* Основы компьютерной графики САПР изделий машиностроения (МСАD) : учебное пособие / *С.Н. Абросимов.* СПб. : Балт. гос. техн. ун-т, 2014. 206 с.
- 7. *Аверченков*, *В.И*. Автоматизация параметрического проектирования типовых изделий / *В.И*. *Аверченков*, *М.Ю*. *Рытов*, *В.Н*. *Ивченко* // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. − 2002. − № 1 (1). − С. 41-46.
- **8.** *Аверченков, В.И.* Автоматизация процедуры конструкторско-технологической классификации деталей с использованием самоорганизующейся нейронной сети / В.И. Аверченков, В.Л. Жога // Известия Волгоградского государственного технического университета. − 2006. − № 4. − С. 94-97.
- **9.** Автоматизированное проектирование средств и систем управления [Электронный ресурс] : курс лекций / *Е.Е. Носкова, Д.В. Капулин, Ю.В. Краснобаев, С.В.*

- *Ченцов.* Электрон. дан. (4 Мб). Красноярск : ИПК СФУ, 2009. URL: http:////files.lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/1604/u lecture.pdf (дата обращ.: 03.02.2017).
- **10.** *Алдонин, Г.М.* Конструирование измерительных приборов : курс лекций и презентаций для лекционных занятий / *Г.М. Алдонин, О.А. Тронин, Ю.Л. Фатеев* Красноярск : ИПЦ СФУ, 2011. 231 с.
- **11.** *Антипин, А.В.* Интеграция САПР при конструировании электронной аппаратуры / *А.В. Антипин, Е.Е. Носкова* // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2013. Т. 1, № 9. С. 192.
- **12.** *Ахтулов, А.Л.* Задачи геометрического моделирования в создании систем автоматизации конструирования обводообразующих поверхностей сложных объектов / *А.Л. Ахтулов, Л.Н. Ахтулова* // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. − 2011. − № 22. − С. 43-47.
- **13.** *Бабанин, В.С.* Методика создания конструкторско-технологической модели детали в среде CAD-системы / *В.С. Бабанин* // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 8. С. 21-25.
- **14.** *Базров, Б.М.* Описание конструкции изделия на разных этапах его жизненного цикла / *Б.М. Базров* // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18, № 4-3. С. 482-484.
- **15.** *Базров, Б.М.* Метод оценки конструкции изделия / *Б.М. Базров* // Наукоемкие технологии в машиностроении. -2015. -№ 7 (49). C. 25-29.
- **16.** *Базров, Б.М.* Модульная технология в машиностроении / *Б.М. Базров.* М. : Машиностроение, 2001. 368 с.
- **17.** *Баекер, М.* Поддержка моделирования работы предприятий авиационно-космической и оборонной отраслей / *М. Баекер* // CAD/CAM/CAE Observer. -2014. № 6 (90). С. 24-29.

- **18.** *Безрукова, Т.В.* Формирование сложных объектов в 3D моделировании / *Т.В. Безрукова, С.Н. Мишустина* // Актуальные вопросы профессионального образования. 2012. Т. 9, № 11 (98). С. 23-25.
- **19.** *Большаков, В.П.* 3D-моделирование в AutoCAD, KOMПAC-3D, SolidWorks, Inventor, T-Flex: учебный курс / В.П. Большаков, А.Л. Бочков, А.А. Сергеев. СПб.: Питер, 2011. 336 с.
- **20.** *Большаков*, *В.П.* Создание трехмерных моделей и конструкторской документации в системе КОМПАС-3D. Практикум / *В.П. Большаков*. СПб : БХВ-Петербург, 2010. 496 с.
- **21.** *Большаков*, *В.П.* Твердотельное моделирование деталей в CAD-системах: AutoCAD, KOMПAC-3D, SolidWorks, Inventor, Creo / *В.П. Большаков*, *А.Л. Бочков*, *Ю.Т. Лячек*. СПб. : Питер, 2015. 480 с.
- **22.** *Большухина, И.С.* Экономика предприятия : учебное пособие / *И.С. Большухина*; под общ. ред. *В.В. Кузнецова.* Ульяновск : УлГТУ, 2007. 118 с.
- **23.** *Боргест, Н.М.* Подход к параметризации трехмерных моделей для решения задач автоматизации предварительного проектирования самолета / *Н.М. Боргест, М.Д. Коровин, М.О. Спирина* // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2015) : материалы V Междунар. науч.-техн. конф. / отв. ред. *В.В. Голенков* [и др.]. Минск : БГУИР, 2015. С. 421-424.
- **24.** *Борисов, С.А.* Способы создания параметризованной геометрической модели [Электронный ресурс] / *С.А. Борисов, В.В. Смолянинов, М.Н. Терентьев.* URL: http://www.cosmos-plm.nichost.ru/articles/param.html (дата обращ.: 13.03.2017).
- **25.** *Бочков*, *А.Л.* Трехмерное моделирование в системе Компас-3D : практическое руководство / *А.Л. Бочков*. СПб. : СПбГУ ИТМО, 2007. 80 с.
- **26.** *Берлинер, Э.[М.]* Актуальность применения САПР в машиностроении [Электронный ресурс] / Э.[М.] *Берлинер* // САПР и Графика. 2000. № 9. С. 111-112. URL: http://sapr.ru/article/7837 (дата обращения: 24.06.2017).

- **27.** *Берлинер, Э.М.* САПР конструктора машиностроителя : учебник / Э.М. *Берлинер, О.В. Таратынов.* М. : Форум, 2015. 288 с.
- **28.** *Бунаков*, *П.Ю*. Сквозное проектирование в T-FLEX / *П.Ю*. *Бунаков*. М. : ДМК Пресс, 2009. 400 с.
- **29.** *Браун, П.* Синхронная технология революция в проектировании [Электронный ресурс] // САПР и графика / *П. Браун, К. Каспрзак.* 2012. №3. С. 57-59. URL: http://sapr.ru/article/22885 (дата обращения: 23.08.2017).
- **30.** *Брук*, *P*. Работа с импортированными данными как способ сокращения расходов на проектирование / *P*. *Брук* // САПР и графика. 2012. № 6. С. 86-89. URL: http://sapr.ru/article/23081 (дата обращения: 16.11.2015).
- **31.** *Бычков И.* Инструмент для разработки корпоративной САПР / *И. Бычков*, *В. Прусенко*, *А. Мазурин* // САПР и графика. 2001. №8. Режим доступа: http://www.sapr.ru/article.aspx?id=7725&iid=314.
- **32.** Вариационное прямое моделирование [Электронный ресурс] // PLMpedia : [Сайт]. URL: http://plmpedia.ru/wiki/Bapиaционное_прямое_моделирование (дата обращения: 27.02.2017).
- **33.** Вариационное прямое моделирование [Электронный ресурс] // BricsCAD САПР платформа : [Сайт]. URL: http://bricscad-russia.ru/info.php?page=direct modeling (дата обращения: 29.08.2017).
- **34.** *Ващук, Ю.* Использование Open CASCADE для создания приложений / *Ю. Ващук, М. Тараканов, А. Мазурин* // САПР и графика. 2001. № 9. Режим доступа: http://www.sapr.ru/article/7878 (дата обращения: 17.07.2016).
- **35.** *Вичугова, А.А.* Особенности интеграции информационных систем автоматизированного проектирования и систем управления данными / *А.А. Вичугова, В.Н. Вичугов, Г.П. Цапко* // Вестник науки Сибири. − 2012. − № 1. − С. 146-153.
- **36.** Вичугова, А.А. Модели и алгоритмы автоматизированного управления жизненным циклом разнотипных взаимозависимых объектов в интегрированной

- информационной среде: диссертация ... кандидата технических наук: 05.13.01 / Анна Александровна Вичугова [Место защиты: Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики]. Томск: УлГТУ, 2013. 163 с.
- **37.** В Ульяновской области разрабатывается паспорт развития отрасли информационных технологий [Электронный ресурс] // Фонд развития информационных технологий Ульяновской области : [Сайт]. URL: http://it-fund73.ru/news/v-ulyanovskoy-oblasti-razrabat/ (дата обращения: 17.03.2018).
- **38.** *Варакин, А.А.* Использование САПР SolidWorks в конструкторско-технологическом проектировании электронных средств : метод. указания. Ч. 1. Основы создания трехмерных моделей / *А.А. Варакин*. Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. 52 с.
- **39.** Виноградов, А. КОМПАС-3D V15: коллективно работать со сложным стало намного проще [Электронный ресурс] // isicad :: Ваше окно в мир САПР : [Сайт]. URL: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=16794 (дата обращения: 21.02.2017).
- **40.** *Волкова, В.Н.* Теория систем : учеб. пособие / *В.Н. Волкова, А.А. Денисов.* М. : Высшая школа, 2006. 511 с.
- **41.** *Волкова,* Γ . \mathcal{A} . Исследование методологий и методов проектирования автоматизированных систем различного назначения / Γ . \mathcal{A} . *Волкова,* O.В. *Новоселова,* $O.\Gamma$. Γ *ригорьев* // Электронные информационные системы. 2014. \mathbb{N} 2 \mathbb{C} . 57-69.
- **42.** *Волкова,* Г.Д. Реинжениринг системы концептуального моделирования для создания САПР машиностроительного назначения / Г.Д. *Волкова, Ал.Ю. Васильев,* Ан.Ю. Васильев // Вестник МГТУ Станкин. 2009. № 3. С. 79-82.
- **43.** *Вольсков,* Д.Г. Организация автоматизированного проектирования универсально-сборных приспособлений на основе твердотельного моделирования / Д.Г. *Вольсков, М.В. Савин, А.М. Джафаров* // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. − 2011. − Т. 13, № 4-2. − С. 322-329.

- **44.** *Воронов, Д.С.* Соотношение конкурентоспособности предприятия и конкурентоспособности его продукции / Д.С. *Воронов* // Современная конкуренция. 2015. Т. 9, № 1 (49). С. 39-53.
- **45.** *Габидуллин, В.М.* Трехмерное моделирование в AutoCAD 2014 / *В.М. Габидуллин.* М. : ДМК Пресс, 2014. 280 с.
- **46.** *Гинда, Д.* Вместе мы сила. Что привнесут в работу инженера новые возможности КОМПАС-3D V15 для коллективного проектирования [Электронный ресурс] // САПР и Графика. 2014. № 1. С. 24-26. URL: http://sapr.ru/article//24338 (дата обращения: 11.12.2016).
- **47.** *Голованов*, *Н.Н.* Геометрическое моделирование : учебник для учреждений высш. проф. образования / *Н.Н. Голованов*. М. : Издательский центр «Академия», 2011. 272 с.
- **48.** Гольдитейн, Г.Я. Стратегические аспекты управления НИОКР: монография / Г.Я. Гольдитейн.. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. 244 с.
- **49.** *Гольдштейн, Г.Я.* Стратегический инновационный менеджмент : учебное пособие / *Г.Я. Гольдштейн.* Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2004. 267 с.
- **50.** *Горбачев, И.В.* Представление модели в среде построения функционально адаптированных САПР на базе Open CASCADE / *И.В. Горбачев, А.Ф. Похилько* // Вестник Ульяновского государственного технического университета. − 2007. − № 3 (39). − С. 32-35.
- **51.** *Горбачев, И.В.* Структура формального представления процесса проектирования в функционально адаптированной САПР / *И.В. Горбачев, А.Ф. Похилько* // Инфокоммуникационные технологии. − 2010. − Т. 8, № 1. − С. 75–78.
- **52.** Горбачев, И.В. Технология представления модели в функционально адаптированной САПР / И.В. Горбачев, А.Ф. Похилько // Автоматизация процессов управления. 2008. N = 3. C. 39-42.

- **53.** *Горбачев, И.В.* Функционально адаптивное представление проектных процедур в конструкторском проектировании деталей и узлов : диссертация ... кандидата технических наук : 05.13.12 / *Иван Владимирович Горбачев* [Место защиты: Ульян. гос. техн. ун-т]. Ульяновск : УлГТУ, 2010. 197 с.
- **54.** *Горин, Е.А.* Информационные технологии и инновационное развитие промышленности / *Е.А. Горин* // Инновации. -2005. № 7. C. 67-68.
- **55.** ГОСТ 2.052-2015. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Электронная модель изделия. Общие положения. Взамен ГОСТ 2.052-2006. Введ. 2017-03-01. М.: Стандартинформ, 2016. III, 11 с.
- 56. ГОСТ 2.053-2013. Единая система конструкторской документации (ЕСКД).
 Электронная структура изделия. Общие положения. Взамен ГОСТ 2.053-2006.
 Введ. 2014-06-01. М.: Стандартинформ, 2014. II, 10 с.
- **57.** ГОСТ 2.101-2016. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Виды изделий. Взамен ГОСТ 2.101-68. Введ. 2017-03-01. М. : Стандартинформ, 2016. III, 7 с.
- 58. ГОСТ 2.102-2013. Единая система конструкторской документации (ЕСКД).
 Виды и комплектность конструкторских документов. Взамен ГОСТ 2.102-68.
 Введ. 2014-06-01. М.: Стандартинформ, 2014. II, 12 с.
- **59.** ГОСТ 2.119-2013. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Эскизный проект. Взамен ГОСТ 2.119-73. Введ. 2015-07-01. М.: Стандартинформ, 2015. II, 6 с.
- **60.** ГОСТ 2.120-2013. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Технический проект. Взамен ГОСТ 2.120-73. Введ. 2015-07-01. М.: Стандартинформ, 2015. II, 6 с.
- **61.** ГОСТ 15971-90. Системы обработки информации. Термины и определения. Взамен ГОСТ 15971-84. Введ. 1992-01-01. М. : Издательство стандартов, 1991. 12 с.

- **62.** ГОСТ 20265-83. Соединители радиочастотные коаксиальные. Присоединительные размеры. Взамен ГОСТ 20265-74. Введ. 1983-10-27. М. : Издательство стандартов, 1984. I, 12 с.
- **63.** ГОСТ 23221-78. Модули СВЧ, блоки СВЧ. Термины, определения и буквенные обозначения. Введ. 1980-01-01. М. : Издательство стандартов, 1980. 12 с.
- **64.** ГОСТ 23501.101-87. Системы автоматизированного проектирования. Основные положения. Взамен ГОСТ 23501.0-79, ГОСТ 23501.4-79, ГОСТ 23501.9-80, ГОСТ 23501.13-81, ГОСТ 23501.16-81, ГОСТ 23501.17-82. Введ. 1988-07-01. М.: Издательство стандартов, 1988. 9 с.
- **65.** ГОСТ Р 53394-2017. Интегрированная логистическая поддержка. Основные термины и определения. Взамен ГОСТ Р 53394-2009. Введ. 2017-03-10. М. : Стандартинформ, 2017. IV, 22 с.
- **66.** ГОСТ Р 56136-2014. Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Термины и определения. Введ. 2015-09-01. М. : Стандартинформ, 2015. III, 12 с.
- **67.** Граничное представление [Электронный ресурс] // PLMpedia : [Сайт] URL: http://plmpedia.ru/wiki/Граничное представление (дата обращ.: 08.08.17).
- **68.** Грибовский, А.А. Автоматизация поиска деталей-аналогов на базе трехмерных моделей / А.А. Грибовский // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. -2011. -№ 5. C. 43-49.
- **69.** *Гришин, М.В.* Онтологии проектирования шаблонной оснастки в авиационном производстве / *М.В. Гришин, С.Н. Ларин, П.И. Соснин* // Онтология проектирования. − 2016. − Т. 6, № 1 (19). − С. 7-28.
- **70.** *Гусева, В.Н.* Прикладная системология : конспект лекций. Часть 1 / *В.Н. Гусева.* СПб. : Балт. гос. техн. ун-т, 2009. 36 с.
- **71.** Давыдов, В.П. Конструктивные элементы деталей : учеб. пособие / В.П. Давыдов. СПб. : Изд-во СПбГТИ(ТУ), 2010. 43 с.

- **72.** Даниленко, Б.Д. Необходимость учета требований технической эстетики при создании новых изделий машиностроения / Б.Д. Даниленко // Вестник машиностроения. 2013. № 6. С. 73-75.
- **73.** Демидов, П. Синхронная технология Solid Edge // САПР и Графика. 2015. №4. С. 90-92. URL: http://sapr.ru/article/24875 (дата обращения: 11.02.2017).
- 74. Демченко, С.Г. Повышение конкурентоспособности продукции промышленных предприятий адекватный ответ на западные санкции: методологический подход / С.Г. Демченко // Актуальные проблемы экономики и права. 2015. № 1 (33). С. 10-16.
- 75. Дерево модели и связь «родитель-потомок» в Pro/Engineer [Электронный ресурс] // САПР-журнал : [Сайт]. URL: http://sapr-journal.ru/uroki-creo-proengineer/derevo-modeli-i-svyaz-roditel-potomok-v-proengineer (дата обращ.: 01.11.2016).
- **76.** Диденко, Д.В. Учимся работать в Solid Edge / Д.В. Диденко М. : ДМК Пресс, 2009. 250 с.
- 77. Долгов, Д.И. Вопросы взаимосвязи качества и конкурентоспособности машиностроительной продукции / Д.И. Долгов // Успехи современного естествознания. 2006. № 11. С. 63-64.
- **78.** Дударева, Н.Ю. SolidWorks 2007 / Н.Ю. Дударева, С.А. Загайко. СПб. : БХВ-Петербург, 2007. 1328 с.
- **79.** Евгенев, Г.Б. Интеллектуальные системы проектирования : учеб. пособие / Г.Б. Евгенев. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. 334 с.
- **80.** *Евгенев, Г.Б.* Метод генерации 3D моделей в продукционных базах знаний / *Г.Б. Евгенев, А.А. Кокорев, М.В. Пиримяшкин* // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. № 4 (661). С. 38-48.
- **81.** *Евгенев, Г.Б.* Методы и средства управления жизненным циклом изделий машиностроения / Г.Б. Евгенев, Б.В. Кузьмин, В.И. Рубахина // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 4. С. 198-216.

- **82.** Евгенев, Г.Б. Метод создания геометрических баз знаний / Г.Б. Евгенев, А.А. Ко-корев, М.В. Пиримяшкин // Инженерный вестник. -2016. -№ 1. -ℂ. 1201-1218.
- **83.** *Евгенев, Г.Б.* Разработка интеллектуальной системы трехмерного проектирования деталей. Часть 2 / Г.Б. *Евгенев, А.А. Кокорев, М.В. Пиримяшкин* // Инженерный вестник. 2016. № 2. С. 6.
- **84.** *Евгенев*, Г.Б. Системология инженерных знаний : учебное пособие для вузов / Г.Б. *Евгенев*. М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 374 с.
- **85.** *Еремин, И.* Создание пользовательских прикладных подпрограмм для NX 8.5 с помощью OpenAPI на примере библиотеки проектирования 3D-моделей колодок ГОСТ 12198-66 // САПР и Графика. 2014. № 8 (214). С. 108-109. URL: http://sapr.ru/article/24605 (дата обращения: 29.08.2017).
- **86.** *Замятина, О.М.* Метод моделирования и комплексного анализа бизнеспроцессов / *О.М. Замятина* // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2005, Т. 308. № 6. С. 180-186.
- **87.** Знакомьтесь геометрическое ядро C3D / *Н. Голованов, О. Зыков, Ю. Козулин, А. Максименко* // САПР и графика. 2013. № 4 (198). С. 75-77. URL: http://sapr.ru/article/23756 (дата обращения: 30.12.2017).
- **88.** *Иванов, А.Д.* Применение параметризации при разработке конструкторской документации / *А.Д. Иванов, О.А. Ямникова* // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. − 2014. − № 11-2. − С. 524-528.
- **89.** Идентификатор операции [Электронный ресурс] // Проектная ПРАКТИКА [Сайт]. URL: http://pmpractice.ru/knowledgebase/gloss/detail/552 (дата обращения 09.12.2016).
- **90.** Информационные технологии поддержки жизненного цикла изделий машиностроения: проблемы и решения / Л.В. Губич, И.В. Емельянович, Н.И. Петкевич [и др.]. 2-е изд., испр. и доп. Минск : Беларус. навука, 2010. 286 с.

- **91.** *Казаков*, *М*. Переход на трехмерное проектирование осознанная необходимость [Электронный ресурс] / *М*. *Казаков* // САПР и Графика [Сайт]. 2006. № 7. URL: https://sapr.ru/article/16189 (дата обращения: 03.02.2015).
- **92.** *Калинцев, В.И.* Применение шаблонов Knowledge Based Engineering в САПР САТІА V5 для моделирования сотовых панелей / *В.И. Калинцев, М.В. Лихачев* // Решетневские чтения. 2015. Т. 2. № 19. С. 220-222.
- **93.** *Кантуреева, М.Л.* Проектирование продукционной базы знаний на основе разделения на информационные единицы выбранной предметной области / *М.Л. Кантуреева, А.Л. Сеньковская, М.А. Болысбек* // Наука, новые технологии и инновации. − 2012. − № 3. − С. 53-56.
- **94.** *Капранов, А.Е.* Проектирование станочных приспособлений с использованием библиотеки трехмерных параметрических моделей деталей УСП-12Я / *А.Е. Капранов, Н.М. Прис* // Приволжский научный вестник. − 2015. − № 12-3 (52). = C. 30-35.
- **95.** *Карлова, Т.В.* Формирование образа системы как объекта управления в предпроектной деятельности [Электронный ресурс] // САПР и графика. 2004. №7. URL: http://sapr.ru/article/7659 (дата обращения: 04.04.2017).
- **96.** *Касперович, С.А.* Организация производства и управление предприятием : учеб. пособие для студентов технических специальностей / *С.А. Касперович, Г.О. Коновальчик.* Минск : БГТУ, 2012. 344 с.
- **97.** *Кашуба, А.* Работа с библиотеками в CAD/CAM-системе ADEM // САПР и Графика. 2001. № 12. URL: http://sapr.ru/article/8254 (дата обр.: 31.09.2017).
- **98.** *Кидрук, М.И.* Компас-3D V10 на 100% / *М.И. Кидурук.* М. : Питер, 2009. 500 с.
- **99.** *Кидрук, М.* Конструкторские библиотеки и инструменты для их создания в системе КОМПАС-3D // САПР и Графика. 2006. № 1. URL: http://sapr.ru/article/14850 (дата обращения: 02.09.2017).

- **100.** *Киров, А.В.* Электронная модель изделия как основа информационного обеспечения жизненного цикла вооружения, военной и специальной техники / *А.В. Киров* // Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление». − 2016. − № 1-2. − С. 139-143.
- **101.** *Кирпичникова, Н.Н.* Оптимизация стратегии проектирования трехмерных моделей в CAD-системах / *Н.Н. Кирпичникова, О.В. Сулина* // Инновационная наука. 2016. № 8-2. С. 48-51.
- **102.** *Князьков, В.В.* Основы автоматизированного проектирования : учеб. пособие / *В.В. Князьков.* Нижний Новгород : Нижегород. гос. техн. ун-т, 2004. 177 с.
- **103.** *Козырев, Д.Б.* О создании справочников 3D-моделей компонентов изделий на примере CAD-системы Creo Parametric и PLM-системы Windchill / Д.Б. Козырев, Е.М. Абакумов // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM 2016) : труды XVI-ой Международной молодёжной конференции. М. : ООО «Аналитик» 2016. С. 39-43.
- **104.** *Козырев, Д.Б.* Типизация 3D-моделей деталей в соответствии с целями использования моделей / *Д.Б. Козырев, Е.М. Абакумов* // Информационные технологии и системы : труды Четвертой Международной научной конференции. Челябинск : ЧелГУ, 2015. С. 155-157.
- **105.** *Кокин, И.В.* Представление и обработка образов конструктивных элементов / *И.В. Кокин* // 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. 208-211.
- **106.** КОМПАС-3D V15. Новая версия новая философия проектирования [Электронный ресурс] // КОМПАС-3D. Инструмент со3Dателя официальный сайт САПР КОМПАС : [Сайт]. URL: http://kompas.ru/company/news/items/ /?news==1753%2F (дата обращения: 15.12.2016).

- **107.** *Кондаков, А.И.* Параметризация процессов изготовления деталей машин / *А.И. Кондаков, А.В. Зайцев* // Главный механик. 2015. № 5-6. С. 31-35.
- **108.** *Кондратьев, Д.* Что такое прямое моделирование? [Электронный ресурс] // САПР-журнал : [Сайт]. URL: http://sapr-journal.ru/stati/chto-takoe-pryamoe-modelirovanie (дата обращения 28.08.2017).
- **109.** *Кондратьев, С.Е.* Автоматизация процессов управления конструктивной электронной структурой изделия / *С.Е. Кондратьев, Н.О. Кожевников, О.В. Ульянин* // Вестник Брянского государственного технического университета. 2015. № 3. С. 143-146.
- **110.** Конструирование и расчет полосковых устройств: учебное пособие для вузов / В.И. Голубев, И.С. Ковалев, Е.Г. Кузнецов и др.; под ред. И.С. Ковалева. М.: Советское радио, 1974. 296 с.
- **111.** Конструирование по базе знаний [Электрон. pecypc] // PLMpedia : [Сайт]. URL: http://plmpedia.ru/wiki/Конструирование по базе знаний (дата обращения: 21.08.2017).
- **112.** Конструктивная геометрия тел [Электронный ресурс] // PLMpedia : [Сайт]. URL: http://plmpedia.ru/wiki/Koнструктивная_геометрия_тел (дата обращения: 04.08.2017).
- **113.** Конструктивная концепция [Электронный ресурс] // PLMpedia : [Сайт]. URL: http://plmpedia.ru/wiki/Конструктивная концепция (дата обр.: 21.08.2017).
- **114.** Конструктивный элемент [Электронный ресурс] // PLMpedia : [Сайт]. URL: http://plmpedia.ru/wiki/Конструктивный элемент (дата обращения: 07.06.17).
- **115.** Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры : учебник для вузов / *К.И. Билибин, А.И. Власов, Л.В. Журавлева и др.* / под общ. ред. *В.А. Шахнова.* 2-е изд., перераб. и доп. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 568 с.

- **116.** *Концевич, В.Г.* Твердотельное моделирование машиностроительных изделий в Autodesk Inventor / *В.Г. Концевич.* Киев, Москва : ДиаСофтЮП, ДМКПресс, 2007. 672 с.
- **117.** *Котельников, В.* Что нового в CATIA V5 R13 / *В. Котельников* // САПР и Графика. 2004. № 6. URL: http://sapr.ru/article/7498 (дата обращ.: 15.08.17).
- **118.** *Краюшкин, В.А.* Система PLM корпоративная информационная среда предприятия по автоматизации совокупности процессов проектирования, изготовления, сопровождения и утилизации изделия / *В.А. Краюшкин, И.Е. Лешихина, М.А. Пирогова* // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2010. № 1. С. 3-23.
- **119.** *Латыев*, *С.М.* Конструирование точных (оптических) приборов : учебное пособие / *С.М. Латыев*. СПб. : Политехника, 2007. 579 с.
- **120.** Лезин, И.А. Автоматизированная система классификации конструкторскотехнологических элементов деталей с использованием баз знаний / И.А. Лезин, Д.Е. Маркелов // Главный механик. 2014. № 5. С. 38-41.
- **121.** Ли, К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / К. Ли. СПб. : Питер, 2004. 560с.
- **122.** *Лихачев, М.В.* Некоторые вопросы технологии трехмерного нисходящего проектирования сложных изделий машиностроения / *М.В. Лихачев* // Информационные технологии в проектировании и производстве. − 2013. − № 2 (150). − С. 22-27.
- **123.** *Лихачев, М.В.* Повторное использование данных электронного макета изделия при нисходящем проектировании в PLM-системах / *М.В. Лихачев* // Информационные технологии в проектировании и производстве. − 2015. − № 3 (159). − С. 12-18.
- **124.** *Лихачев*, *М.В.* Применение технологии функционального цифрового макета изделия на этапе предконтрактного проектирования космического аппарата / *М.В. Лихачев*, *Е.А. Шангина* // Решетневские чтения. − 2013. − Т. 1. − № 17. − С. 24-26.

- **125.** *Лихачев*, *М.В.* Управление структурой изделия в PLM-системах / *М.В. Лихачев* // Решетневские чтения. 2014. Т. 2. № 18. С. 262-264.
- **126.** Личман, А. Семь ключевых новшеств комплексного решения АСКОН 2014. Новая философия проектирования и расширенные возможности для машиностроителей // САПР и Графика. 2014. № 10. С. 8-13. URL: http://sapr.ru/article/24674 (дата обращения: 19.12.2016).
- **127.** *Лоцманенко, В.В.* Проектирование и конструирование (основы) : учеб. пособие / В.В. Лоцманенко, Б.Е. Кочегаров. Владивосток : Изд-во ДВГТУ, 2004. 96 с.
- **128.** Лячек, Ю.Т. Геометрическое моделирование. Параметризация и модификация 3D-моделей и чертежей в САПР / Ю.Т. Лячек. СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 160 с.
- **129.** Лячек, Ю.Т. Методы создания параметрических моделей геометрических объектов в современных САПР / Ю.Т. Лячек, Д.Г. Алькади Лайс // Кибернетика и программирование. -2016. № 2. С. 42-51.
- **130.** *Мазеин, П.Г.* Сквозное автоматизированное проектирование в CAD/CAM системах: учебное пособие / *П.Г. Мазеин, А.В. Шаламов.* Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. 83 с.
- **131.** *Малов*, *M*. Бесчертежные технологии в мире SolidWorks [Электронный ресурс] // isicad :: Ваше окно в мир САПР : [Сайт]. URL: http://isicad.ru/ru/articles.php?article.num=17509 (дата обращения: 13.11.2015).
- **132.** *Малюх, В.Н.* Введение в современные САПР : курс лекций / *В.Н. Малюх.* М. : ДМК Пресс, 2010. 192 с.
- **133.** Методологические основы проектирования сложных наукоемких изделий и принципы построения интегрированной информационной среды на базе CALS-технологий: монография / А.А. Вичугова, В.Н. Вичугов, Е.А. Дмитриева, Г.П. Цапко, С.Г. Цапко. Томск: ТПУ, 2013. 180 с.

- **134.** Механическое проектирование [Электронный ресурс] // PLMpedia : [Сайт]. URL: http://plmpedia.ru/wiki/MCAD (дата обращения: 22.07.2017).
- **135.** *Мясоедов, Ю.В.* Трехмерное моделирование в системе AutoCAD : учеб. пособие / *Ю.В. Мясоедов, Е.А. Гаврилюк, Л.А. Ковалева.* Благовещенск : Изд-во АмГУ, 2014. 61 с.
- 136. Новое программное обеспечение 3DSync от Siemens позволяет реализовать все преимущества уникальной синхронной технологии в CAD-системах общего назначения [Электронный ресурс] // Product Lifecycle Management (PLM) : Siemens PLM Software : [Сайт]. URL: https://www.plm.automation.siemens.com/ru/about_us/newsroom/press/press_release.cfm?Component=205726&ComponentTemplate=822 (дата обращения: 23.08.2017).
- **137.** *Норенков, И.П.* Основы автоматизированного проектирования : учеб. для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. / *И.П. Норенков.* М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 430 с.
- **138.** Об информационном обмене между CAD-системами / Л.И. Райкин, И.Н. Мерзляков, А.Д. Филинских, А.А. Бойтяков // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2015. № 3 (159). С. 65-72.
- **139.** Об эффективности обмена информацией между САПР [Электронный ресурс] / Л.И. Райкин, И.Л. Райкин, И.Н. Мерзляков, А.Д. Филинских, А.А. Бойтяков, А.В. Бубнов // Universum : Технические науки : электронный научный журнал 2014. № 2 (3). URL: http://7universum.com/en/tech/archive/item/1034 (дата обращения: 26.08.2017).
- **140.** Обзор современных систем автоматизированного проектирования [Электронный ресурс] // Bourabai Research Institution Технологии XXI века : [Сайт]. URL: http://bourabai.ru/graphics/dir.htm (дата обращения: 22.07.2017).
- **141.** ОСТ4 Г0.010.202. Микросборки СВЧ-диапазона. Конструирование. Редакция 1-75. Взамен ОСТ4 Г0.010.018. Введ. 1976-11-1. М. : Издательство стандартов, 1975. 147 с.

- **142.** *Палюх*, *Б.В.* Представление знаний в системах автоматизированного проектирования и управления технологическими процессами / *Б.В. Палюх*, *Г.Б. Бурдо* // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2010. Т. 16, № 2. С. 258-265.
- **143.** *Панчеко, В.* Вариационное прямое моделирование в КОМПАС-3D V14 [Электронный ресурс] // САПР и Графика. 2013. № 3. С. 78-80. URL: http://sapr.ru/article/23757 (дата обращения: 30.08.2017).
- **144.** *Параничев, А.В.* Метод параметризации в задачах виртуализации и интеграции данных САПР / *А.В. Параничев, И.В. Герасимов* // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM 2015) : труды Междунар. конф. / под ред. *А.В. Толока.* М. : Аналитик. 2015. С. 131-135. URL: http://lab18.ipu.ru/projects/conf2015/1/34.htm (дата обращения 20.08.2017).
- **145.** *Параничев, А.В.* Понятийная область САПР в международных стандартах / *А.В. Параничев, И.В. Герасимов, С.А. Кузьмин* // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM 2015) : Труды международной конференции / под ред. *А.В. Толока.* М. : ООО «Аналитик», 2015. С. 136-140.
- **146.** Переход от традиционных стандартов предприятия к компьютерным базам знаний / *А. Рыбаков, С. Евдокимов, А. Краснов, Н. Никонов* // CAD/CAM/CAE Observer. 2003. № 4 (13). С. 14-20.
- **147.** *Петракова, Е.А.* Создание параметрической зубчатой пары в Autodesk Inventor с использованием внешних данных / *Е.А. Петракова* // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2017. № 5 (242). С. 26-32.
- **148.** *Петров, А.П.* Основы САПР в машиностроении : Учебное пособие / *А.П. Петров.* Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2001. 139 с.
- **149.** *Петров, А.С.* Национальные разработки в области информационных технологий при создании 3D-ядра и справочников для САПР с учетом стандартов се-

- рии ISO 13584/15926 / *А.С. Петров, А.В. Молодцова* // Решетневские чтения. 2012. Т. 2, № 16. С. 628-630.
- **150.** *Петров, В.* Опыт создания единого информационного пространства на СПб ОАО «Красный Октябрь» // САПР и графика. 2012. № 11 С 92-95. URL: http://www.sapr.ru/article.aspx?id=23450&iid=1078 (дата обращения 03.02.2017).
- **151.** *Петров*, *П.[К.]* Будущее CAD-систем / *П.[К.] Петров* // CADmaster. 2011. № 6 (61). С. 14-25. URL: http://www.cadmaster.ru/magazin/numbers/cadmaster-2011.6-61.html (дата обращения: 12.10.2016).
- **152.** *Пестрецов*, *С.И.* CALS-технологии в машиностроении: основы работы в CAD/CAE-системах : учебное пособие / *С.И. Пестрецов*. Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. 104 с.
- **153.** *Печатников*, *Ю.М.* Автоматизация проектирования в машиностроении. Трехмерное моделирование / *Ю.М. Печатников*, *М.А. Гвоздев.* СПб. : Издательство «Унивак», 2001. 52 с.
- **154.** *Побирский, Е.Ю.* Управление жизненным циклом изделия в производстве ракетно-космической техники / *Е.Ю. Побирский, А.С. Галаев, И.С. Филимонов* // Решетневские чтения. 2012. Т. 2. № 16. С. 633-634.
- **155.** *Погребняк*, *Г.Е.* 3D-моделирование конструкторски сложных узлов изделий машиностроения на ранних этапах анализа и проектирования / *Г.Е. Погребняк* // САПР и Графика. 2017. № 3. С. 59-63. URL: https://sapr.ru/article/25410 (дата обращения: 14.12.2017).
- **156.** Полосковые платы и узлы : Проектирование и изготовление / Е.П. Котов, В.Д. Каплун, А.А. Тер-Маркарян и др. ; под ред. Е.П. Котова, В.Д. Каплуна. М. : Советское радио, 1979. 247 с.
- **157.** *Похилько, А.Ф.* CASE-технология моделирования процессов с использованием средств BPWin и ERWin: учебное пособие / *А.Ф. Похилько, И.В. Горбачев.* Ульяновск: УлГТУ, 2008. 120 с.

- **158.** *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.
- **159.** *Похилько, А.Ф.* Оценка и улучшение бизнес-процессов и изделий по негеометрическим показателям / *А.Ф. Похилько, О.В. Козинцев, Л.Е. Камалов* // Автоматизация процессов управления. − 2012. − № 4. − С. 89-96.
- **160.** *Похилько, А.Ф.* Семантическое представление 3D-модели изделия на этапе конструирования в CAD-системе / *А.Ф. Похилько, Д.Э. Цыганков* // Труды конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «IS&IT'17». Т. 1. Таганрог : Изд-во Ступина С.А., 2017. С. 166-172.
- **161.** *Похилько, А.Ф.* Структурно-логическое обобщение класса проектных решений с использованием функционально адаптированного представления проектных процедур / *А.Ф. Похилько, Д.Э. Цыганков, И.В. Горбачев* // Автоматизация процессов управления. − 2016. − № 3 (45). − С. 71-78.
- **162.** Применение проектных онтологий в технологической подготовке авиационного производства / *М.В. Гришин, П.Ю. Павлов, П.И. Соснин, В.В. Плутахин* // Автоматизация процессов управления. − 2016. − № 4 (46). − С. 47-57.
- **163.** Проектирование в NX под управлением Teamcenter / М.Ю. Ельцов, А.А. Козлов, А.В. Седойкин, Л.Ю. Широкова. М.: ДМК Пресс, 2013. 752 с.
- **164.** Прямое моделирование [Электронный ресурс] // PLMpedia : [Сайт]. URL: http://plmpedia.ru/wiki/Прямое моделирование (дата обращ.: 27.02.2017).
- **165.** Р 50.1.031-2001. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Терминологический словарь. Ч. 1. Стадии жизненного цикла продукции. Введ. 2002-07-01. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. 32 с.
- **166.** Разработка геометрических моделей и чертежей деталей на базе системы CAD/CAM Pro/ENGINEER. Часть 1 : учебное пособие / под ред. *В.А. Зубкова*. М. : Изд-во МГИУ, 2008. 216 с.

- **167.** РД IDEF0 2000. Методология функционального моделирования IDEF0. М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. 75 с.
- **168.** Реализация методики создания 3d параметрических моделей типовых деталей узлов авиационных конструкций в среде Siemens NX / *E.C. Горячкин, А.И. Рязанов, А.В. Урлапкин, Л.А. Чемпинский* // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2012. № 5-2 (36). С. 187-193.
- **169.** *Решетников, И.С.* Стандарты и технологии интеграции производственных информационных систем / *И.С. Решетников, А.П. Козлецов* // Информационные технологии в проектировании и производстве. − 2010. − № 2. − С. 24-30.
- **170.** Российское 3D-ядро. Часть II: функции и инструменты [Электронный ресурс] / Л. Баранов, С. Козлов, Д. Сёмин, Н. Снытников // isicad : [Сайт]. URL: http://isicad.ru/ru/articles.php?article num=16130 (дата обращения: 17.08.2017).
- **171.** *Румянцева, Н.Ю.* Автоматизированное построение стандартных конструктивных элементов планера в среде NX / *Н.Ю. Румянцева* // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. − 2012. − Т. 16, № 6 (51). − С. 62-66.
- **172.** *Рыбаков*, *А.В.* Возможности проектирования машиностроительных изделий на основе компьютерных баз знаний (на примере станочных приспособлений) / *А.В. Рыбаков*, *С.А. Евдокимов*, *А.А. Краснов* // Вестник МГТУ «Станкин». − 2015. № 2 (33). С. 83-88.
- **173.** *Рыжков*, *В.А.* Разработка системы визуализации разнородных данных цифрового макета изделия / *В.А. Рыжков* // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18, № 4-3. С. 634-637.
- **174.** САПР. Системы автоматизированного проектирования : учеб. пособие для техн. вузов : в 9 кн. Кн. 6. Автоматизация конструкторского и технологического проектирования / *Н.М. Капустин*, *Г.Н. Васильев* ; под ред. *И.П. Норенкова.* М. : Высш. шк., 1988. 191 с.

- **175.** 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 Ульян. гос. техн. ун-т. № 2017662499; заявл. 01.12.2017; зарегистр. 23.01.2018; опубл. 23.01.2018, Бюл. № 2. 1 с.
- **176.** 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 Ульян. гос. техн. ун-т. № 2018611257; заявл. 09.02.2018; зарегистр. 26.03.2018; опубл. 26.03.2018, Бюл. № 4. 1 с.
- 177. Свидетельство № 2018620481 Российская Федерация. Библиотека семантически обобщаемых базовых операций САD-системы : свидетельство о государственной регистрации базы данных / Д.Э. Цыганков, К.А. Федорова, А.Ф. Похилько ; заявитель и правообладатель Ульян. гос. техн. ун-т. № 2018620157 ; заявл. 09.02.2018 ; зарегистр. 26.03.2018 ; опубл. 26.03.2018, Бюл. № 4. 1 с.
- **178.** Свобода с синхронной технологией // САПР и Графика. 2010. № 8. С. 58-59. URL: http://sapr.ru/article/21586 (дата обращения: 27.08.2017).
- **179.** *Семидоцкий, Н.* SolidWorks: Проектирование на основе баз знаний // САПР и Графика. 2014. № 5 (211). С. 34-38. URL: http://sapr.ru/article/24486 (дата обращения: 01.09.2017).
- **180.** *Сиденко, Л.А.* Компьютерная графика и геометрическое моделирование : Учебное пособие / *Л.А. Носкова.* СПб : Питер, 2009. 224 с.
- **181.** Синхронная технология [Электронный ресурс] // PLMpedia : [Сайт]. URL: http://plmpedia.ru/wiki/Синхронная технология (дата обращения: 23.06.2017).
- **182.** Синхронная технология и дерево построения [Электронный ресурс] // САПР и Графика : [Сайт]. 2010. № 12 (170). С. 96-97. URL: http://sapr.ru/article/21897 (дата обращения: 30.06.2017).

- **183.** Система автоматизации проектных работ [Электронный ресурс] // CADобзор: [Сайт]. URL: http://cadobzor.ru/sapr (дата обращения: 24.07.2017).
- **184.** Система автоматизированного проектирования [Электронный ресурс] // РТС : [Сайт]. URL: http://www.ptc.ru.com/cad (дата обращения: 04.02.2017).
- **185.** Словарь терминов [Электронный ресурс] // Autodesk Knowledge Network : [Сайт]. URL: http://help.autodesk.com/view/INVLT/2014/RUS/?guid=GUID-3E0794C5-75B4-4425-8163-45FCCF8597B3 (дата обращения 15.07.2016).
- **186.** *Сляднев, С.* Обзор Open CASCADE Technology [Электронный ресурс] / *С. Сляднев* // isicad : [Сайт]. URL: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=17367 (дата обращения: 17.04.2016).
- **187.** *Сляднев, С.Е.* Метод декомпозиции машиностроительных твердотельных моделей на элементы объема изъятия / *С.Е. Сляднев, В.Е. Турлапов* // ГрафиКон 2016 : Труды 26-й Международной научной конференции. 2016. С. 58-63.
- **188.** Создание 3D моделей авиационных конструкций в программном комплексе CATIA V5 : метод. указания / В.А. Комаров, А.А. Вырыпаев, А.С. Кузнецов, Л.В. Одинцова. Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2010. 39 с.
- **189.** *Соснин, П.И.* Концептуальное экспериментирование в проектировании конфигурируемых шаблонов авиационных деталей / *П.И. Соснин, О.Э. Чоракаев* // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. − 2015. − № 5. − С. 373-380.
- **190.** *Соснин П.И.* Структурное проектирование конфигурируемых шаблонов авиационных деталей / *П.И. Соснин, О.Э. Чоракаев* // Автоматизация процессов управления. 2014. № 4 (38). С. 99-107.
- **191.** Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / *С.И. Бахарев, В.И. Вольман, Ю.Н. Либ* и др. ; под. ред. *В.И. Вольмана.* М. : Радио и связь, 1982. 326 с.

- **192.** Стратегия развития отрасли информационных технологий в Российской Федерации на 2014-2020 годы и на перспективу до 2025 года: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации № 2036-р от 1 ноября 2013 года. 51 с.
- **193.** *Стремнев, А.Ю.* Параметризация сборок Autodesk Inventor и модулигенераторы типовых конструкций / *А.Ю. Стремнев* // CAD/CAE/CAM Observer. -2014. № 2 (86). C. 56-58.
- **194.** *Суханова, А.* Наш бизнес в России это яркая история успеха Siemens PLM Software : интервью Eric Sterling и Steffen Buchwald, топ-менеджеров Siemens PLM Software // CAD/CAM/CAE Observer. 2011. № 1 (61). С. 10-20.
- **195.** *Сухов*, *П*. Метаморфозы электронной структуры изделия // САПР и графика. 2012. №5. С. 62-63. URL: http://sapr.ru/article/23011 (дата обр.: 29.07.17).
- **196.** *Сушилова, Ю.Н.* Обеспечение конкурентоспособности промышленного предприятия: диссертация ... кандидата экономических наук: 08.05.00 / *Сушилова Юлия Николаевна*; [Место защиты: Санкт-Петербургский гос. ун-т технологии и дизайна]. СПб., 2010. 175 с.
- **197.** *Таирова, Е.А.* Исследование процессов применения технологии сквозного 3D-проектирования деталей и узлов авиационной техники / *Е.А. Таирова, Л.Е. Камалов* // Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития: тезисы докладов V Международной научно-практической конференции. Ульяновск: УлГУ, 2016. С. 95-96.
- **198.** Управление жизненным циклом изделия [Электронный ресурс] // PLMpedia : [Сайт]. URL: http://plmpedia.ru/wiki/PLM (дата обращения: 27.07.2017).
- **199.** Ушаков, Д. Как создавать редактируемые модели в параметрических CAD [Электронный ресурс] // isicad :: Ваше окно в мир САПР : [Сайт]. URL: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=16704 (дата обращения: 27.08.2017).

- **200.** Ушаков, Д. Кому и зачем нужно прямое моделирование? Обзор конкурентных технологий [Электрон. pecypc] // isicad :: Ваше окно в мир САПР : [Сайт]. URL: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=14775 (дата обращ.: 13.04.2016).
- **201.** *Ушаков*, Д. Синхронная технология: попытка № 3 [Электронный ресурс] // isicad :: Ваше окно в мир САПР : [Сайт]. URL: http://isicad.ru/ru/articles.php? ?article num=14775 (дата обращения: 13.08.2017).
- **202.** *Ушаков*, Д.М. Введение в математические основы САПР : курс лекций / Д.М. *Ушаков*. М. : ДМК Пресс, 2011. 208 с.
- **203.** Ушаков, Д.М. Что нужно технологу: история построения или прямое моделирование? [Электронный ресурс] // isicad :: Ваше окно в мир САПР : [Сайт]. URL: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=17707 (дата обращ.: 15.06.2017).
- **204.** Филиппова, Д.А. Место цифровых макетов в современном производстве / Д.А. Филиппова // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 10 (93). С. 19-22.
- **205.** *Фомин, Е.* Использование параметрических возможностей КОМПАС-3D // САПР и Графика. 2007. № 10. С. 70-74. URL: http://sapr.ru/article/18269.
- **206.** Французова, Ю.В. Комплексная оценка технологичности деталей типа «Тела вращения» / Ю.В. Французова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 9. С. 266-271.
- **207.** *Хохленков*, *P.B.* Solid Edge с синхронной технологией / *P.B. Хохленков*. М. : ДМК-Пресс, 2010. 377 с.
- **208.** *Хэмилтон,* Π . Азбука технологий моделирования в MCAD-системах. Часть III. Как технологии MCAD влияют на процесс разработки изделия / Π . *Хэмилтон* // CAD/CAM/CAE Observer. 2008. № 2(38). С. 34-36.
- **209.** *Хэмилтон,* П. Геометрическое ядро и его влияние на разработку продуктов [Электронный ресурс] / П. *Хэмилтон* // isicad : [Сайт]. URL: http://isicad.ru/ru/darticles.php?article_num=15874 (дата обращения: 17.02.2016).

- **210.** *Хэмилтон, П.* Параметрическое прямое моделирование [Электронный ресурс] // isicad :: Ваше окно в мир САПР : [Сайт]. URL: http://isicad.ru/ru/darticles.php?article_num=15445 (дата обращения: 11.03.2016).
- **211.** *Хэмилтон, П.* Редактирование трехмерной геометрии [Электронный ресурс] // isicad :: Ваше окно в мир САПР : [Сайт]. URL: http://isicad.ru/ru/articles.php? article num=13263 (дата обращения: 13.04.2016).
- **212.** Цифровой макет [Электронный ресурс] // PLMpedia : [Сайт]. URL: http://plmpedia.ru/wiki/Цифровой_макет (дата обращения: 12.05.2017).
- **213.** *Цыганков*, *Д*.Э. Выделение структурно-функциональных элементов электронной цифровой модели изделия / *Д*.Э. *Цыганков*, *А.Ф. Похилько* // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения : материалы Международной научно-технической конференции «Intermatic 2016» / под ред. *А.С. Сигова*. М.: Галлея-Принт, 2016. Ч. 4. С. 118-120.
- **214.** *Цыганков*, Д.Э. Конструкторское построение 3D-модели изделия в CAD-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.
- **215.** *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» (г. Москва, 20-24 ноября 2017 г.) [Электронный ресурс] / под ред. А.С. Сигова. М.: МИРЭА, 2017. С. 867-869.
- **216.** *Цыганков*, Д.Э. Отображение структуры проектируемого изделия в процессе построения 3D-модели / Д.Э. *Цыганков*, А.Ф. Похилько // Перспективные информационные технологии (ПИТ-2017) : труды Международной научно-

- технической конференции / под ред. *С.А. Прохорова.* Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2017. С. 1030-1033.
- **217.** *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.
- **218.** *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.
- **219.** *Чернышов, В.Н.* Теория систем и системный анализ : учеб. пособие / *В.Н. Чернышов, А.В. Чернышов.* Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. 96 с.
- **220.** Чертежи в подготовке производства [Электр. ресурс] // ADEM автоматизация проектно-конструкторской и технологической подготовки производства : [Сайт]. URL: http://adem.ru/press/atricles/2003-09-27 (дата обр. 12.01.2015).
- **221.** *Чешев*, *В.В.* Техническое знание : монография / *В.В. Чешев*. Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит, ун-та, 2006. 267 с.
- **222.** Шкарин, Б.А. Создание унифицированных трехмерных моделей деталей в системах автоматизированного управления жизненным циклом изделий / Б.А. Шкарин, Ю.В. Мокрецов // Информационные технологии в проектировании и производстве. − 2009. − № 3. − С. 23-27.
- **223.** Энь, *X*. Показатели качества продукции и методы их оценки на промышленном предприятии / *X*. Энь // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2010. № 10-12. С. 245-254.
- **224.** *Юров, А.Н.* Программное моделирование и визуализация геометрических тел средствами ядра ОССТ / *А.Н. Юров, И.А. Еремин* // Информатика: проблемы, методология, технологии : сборник материалов XVII Международной научнометодической конференции : в 5 томах / под ред. *Н.А. Тюкачева, А.А. Крыло-*

- *вецкого.* Воронеж : Издательство «Научно-исследовательские публикации», 2017. Т. 4. С. 340-345.
- **225.** *Юров, А.Н.* Создание модулей типовых конструктивных элементов САПР средствами АРІ СЗD / *А.Н. Юров* // Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы XVI Международной научно-методической конференции / под ред. *Н.А. Тюкачева.* Воронеж: Издательство «Научно-исследовательские публикации», 2016. С. 433-436.
- **226.** Яблочников, Е.И. Компьютерные технологии в жизненном цикле изделия : учебное пособие / Е.И. Яблочников, Ю.Н. Фомина, А.А. Саломатина. СПб. : СПбГУ ИТМО, 2010. 180 с.
- **227.** Ядро геометрического моделирования [Электронный ресурс] // PLMpedia : [Сайт]. URL: http://plmpedia.ru/wiki/ядро_геометрического_моделирования (дата обращения 31.04.2017).
- **228.** Ямникова, О.А. Влияние унификации на технологичность изделия / О.А. Ямникова, А.И. Холманов, Ю.В. Французова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 12-1. С. 245-249.
- **229.** 3D/4D CAD Applicability for Life-cycle Facility Management / *J. Park, B. Kim, C. Kim, H. Kim* // Journal of Computing in Civil Engineering, 2011, Vol. 25, № 2, pp. 129-138.
- **230.** Advances in Parameterized CAD Feature Translation / *S. Bondar, A. Shammaa, J. Stjepandić, K. Tashiro* // Transdisciplinary Lifecycle Analysis of Systems: Proceedings of the 22nd ISPE Inc. International Conference on Concurrent Engineering, IOS Press, Amsterdam, 2015, pp. 615-624.
- **231.** *Alemanni, M.* Model-based Definition Design in the Product Lifecycle Management Scenario / *M. Alemanni, F. Destefanis, E. Vezzetti* // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, Vol. 52. № 1-4, pp. 1-14.

- **232.** *Bazrov*, *B.M.* Method of Product Design Description Using Graph Properties / *B.M. Bazrov* // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2016, Vol. 45, № 3, pp. 270-272.
- **233.** *Borgest, N.* The Concept of Automation in Conventional Systems Creation Applied to the Preliminary Aircraft Design / *N. Borgest, M. Korovin, A. Gromov* // Advances in Intelligent Systems and Computing, 2015, Vol. 342, pp. 147-156.
- **234.** *Chlebus, E.* CAD 3D Models Decomposition in Manufacturing Processes / *E. Chlebus, K. Krot* // Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2016, Vol. 16, Iss. 1, pp. 20-29
- **235.** *Cunningham, J.J.* Designing with Features: The Origin of Features / *J.J. Cunningham, J.R. Dixon* // Proceedings of the ASME, Computers in Engineering Conference, 1988, Vol. 1, pp. 237-243.
- **236.** Development of Conceptual Modeling Method to Solve the Tasks of Computer-Aided Design of Difficult Technical Complexes on the Basis of Category Theory / *A.G. Korobeynikov, M.E. Fedosovsky, A.V. Gurjanov, I.O. Zharinov, A.V. Shukalov* // International Journal of Applied Engineering Research, 2017, Vol. 12, № 6, pp. 1114-1122.
- **237.** Design of Flexible Manufacturing Systems on the Basis of CAX Software and Virtual Modeling / *K.S. Kul'ga, A.A. Kitaev, I.O. Sidorov, D.G. Kozhinov* // Russian Engineering Research, 2016, Vol. 36, № 7, pp. 577-586.
- **238.** *Folomkin, A.I.* Development of Application Program Libraries for the Design of the Sectional Drilling Augers by Means of Solid Works / *A.I. Folomkin, V.A. Merkulova* // International Journal of Applied Engineering Research, 2017, Vol 12, № 8, pp. 1483-1487.
- **239.** Multidisciplinary Implementation Methodology for Knowledge Based Engineering: KNOMAD / *R. Curran, W.J.C. Verhagen, M.J.L. Van Tooren, T.H. Van Der Laan* // Expert Systems with Applications, 2010, Vol. 37, № 11, pp. 7336-7350.

- **240.** *Myung, S.* Knowledge-Based Parametric Design of Mechanical Products Based on Configuration Design Method / *S. Myung, S. Han* // Expert Systems with Applications, 2001, Vol. 21, № 2, pp. 99-107.
- **241.** Re-usable Component Design for Supporting 3D Modeling and Simulation / *S. Chunlon, Z. Youliang, K. Jianshou, L. Sik-Fun, K. Wing-Cheong* // Journal of Materials Processing Technology, 2003, Vol. 139, № 1-3 Spec., pp.624-627.
- **242.** *Shah, J.J.* Parametric and Feature-Based CAD/CAM: Concepts, Techniques and Applications / *J.J. Shah, M. Mäntylä* // New York: John Wiley & Sons, 1995, 619 pp.
- **243.** *Skarka, W.* Using Knowledge-based Engineering Methods in Designing with Modular Components of Assembly Systems / *W. Skarka* // Proceedings of the 11th International Design Conference, Dubrovnik, 2010, Vol. 1-3, pp. 1837-1846.
- **244.** *Tao, J.* Intelligent Design System of Mechanical Products Based on Data Mining and Knowledge Based Engineering / *J. Tao, Y. Yin* // Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2012, Vol. 46, № 1. pp. 237-244.
- **245.** The Design Process Data Representation Based on Semantic Features Generalization / *D. Tsygankov*, *A. Pokhilko*, *A. Sidorichev*, *S. Ryabov* // Transdisciplinary Engineering: Crossing Boundaries: Proceedings of the 23rd ISPE Inc. International Conference on Transdisciplinary Engineering, IOS Press, Amsterdam, 2016, pp. 127-132.
- **246.** *Timofeev, G.* Applying Modern CAD Systems to Reconstruction of Old Design / *G. Timofeev, O. Egorova, I. Grigorev* // Mechanisms and Machine Science, 2017, Vol. 43, pp. 323-331.
- **247.** *Tsygankov*, *D.* CAD-system Basic Operations Semantic Generalization to the Designed Product Construction Conformity / *D. Tsygankov*, *A. Pokhilko*, *I. Gorbachev* // Transdisciplinary Engineering: A Paradigm Shift: Proceedings of the 24th ISPE Inc. International Conference on Transdisciplinary Engineering (TE2017), IOS Press, Amsterdam, 2017, pp. 603-610.
- **248.** *Tsygankov*, *D*. Designed Product 3D-model Semantic Representation in a CAD-system / *D. Tsygankov*, *A. Pokhilko* // Interactive Systems : Problems of Human -

- Computer Interaction, Collection of scientific papers. Ulyanovsk: USTU, 2017, pp. 255-259.
- **249.** *Tsygankov*, *D*. The Product Design Information Imaging at the Construction Stage in 3D-model Creation Tree / *D. Tsygankov*, *A Pokhilko* // Procedia Manufacturing: Proceedings of the 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2017), 2017, Vol. 11, pp. 2069-2076.
- **250.** *Vahid, S.* Development and Application of an Integrated Approach for Parametric Associative CAD Design in an Industrial Context / *S. Vahid, C. McMahon* // Computer-Aided Design & Applications, 2011, Vol. 8(2), pp. 225-236
- **251.** *Wei, L.* Representation and retrieval of 3D CAD models in parts library / *L. Wei, H. Yuanjun* // International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, Vol. 36, № 9, pp. 950-958.
- **252.** Zehtaban, L. A Framework for Similarity Recognition of CAD Models / L. Zehtaban, O. Elazhary, D. Roller // Journal of Computational Design and Engineering, 2016, Vol. 3, Iss. 3, pp. 274-285.
- **253.** *Zehtaban, L.* Beyond Similarity Comparison: Intelligent Data Retrieval for CAD//CAM Designs / *L. Zehtaban D. Roller* // Computer-Aided Design & Applications, 2013, Vol. 10(5), pp. 789-802

ПРИЛОЖЕНИЕ А Формирование проектного решения с использованием комплекса программных средств

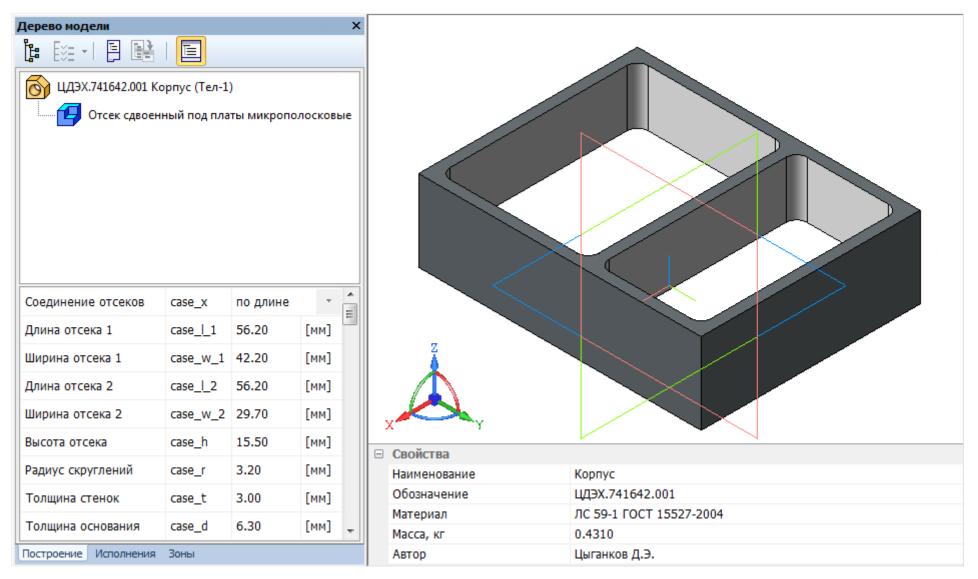


Рисунок А.1 – Построение конструктивно-функциональной

базы «Отсек сдвоенный под платы микрополосковые»

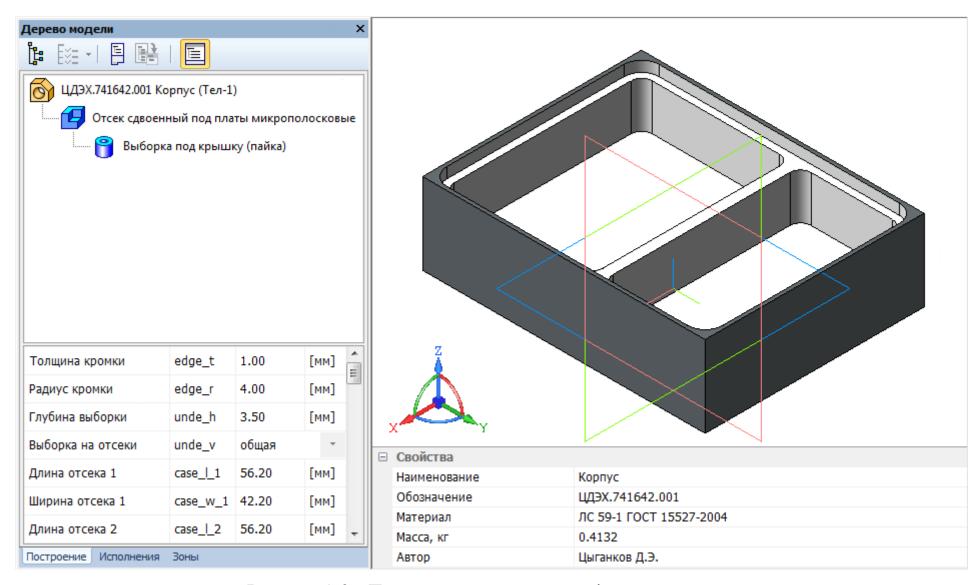


Рисунок А.2 – Построение конструктивно-функционального

элемента «Выборка под крышку (пайка)»

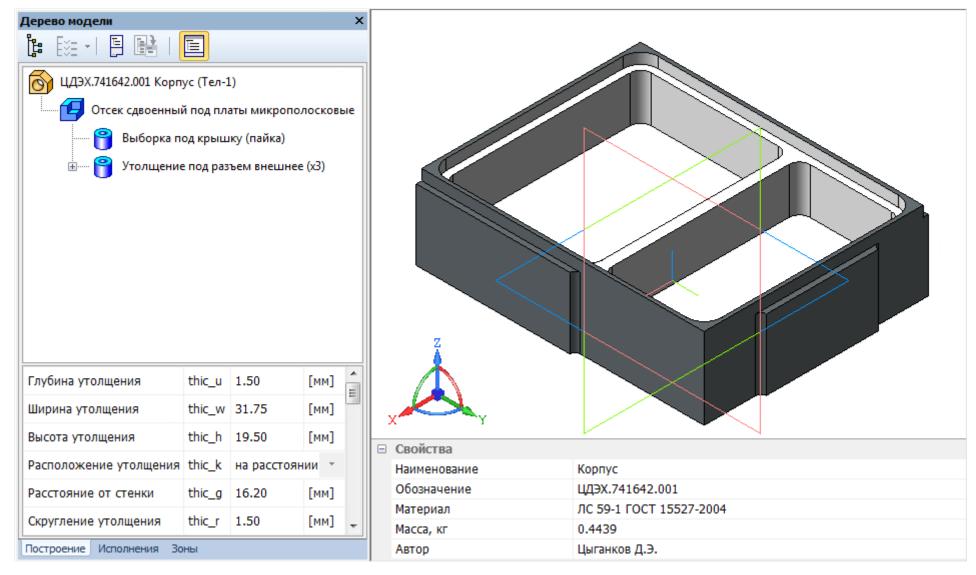


Рисунок А.3 – Построение конструктивно-функционального

элемента «Утолщение под разъем внешнее»

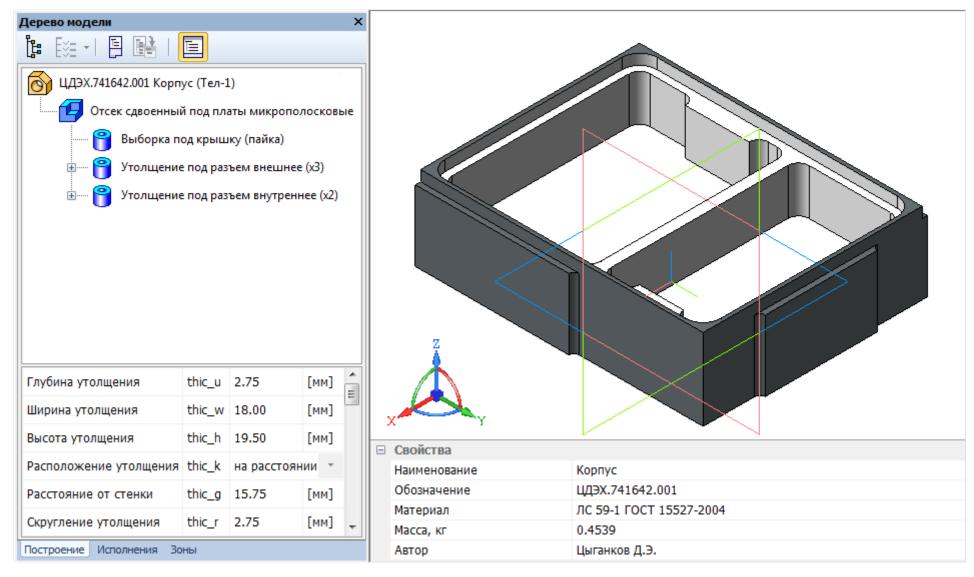


Рисунок А.4 – Построение конструктивно-функционального элемента *«Утолщение под разъем внутреннее»*

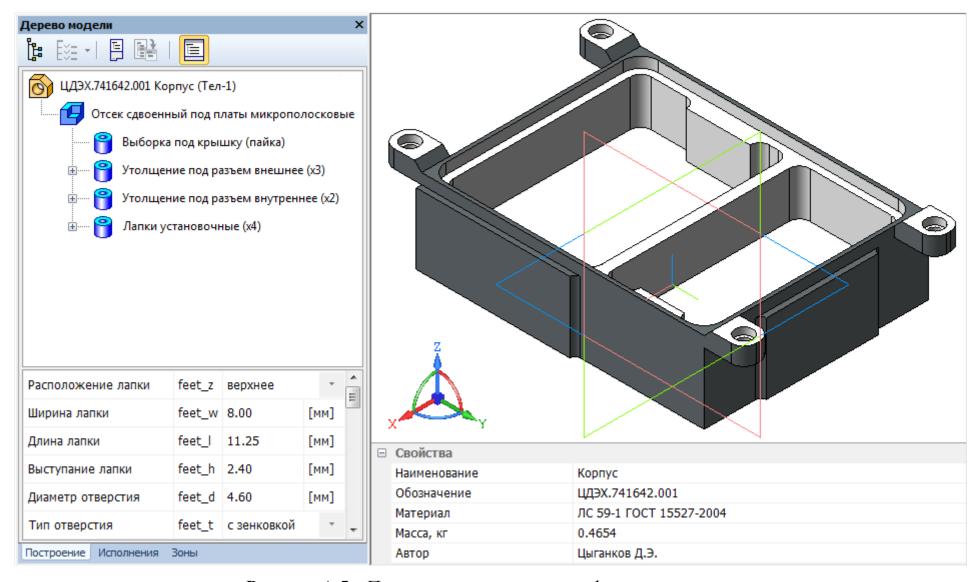


Рисунок А.5 – Построение конструктивно-функционального

элемента *«Лапки установочные»*

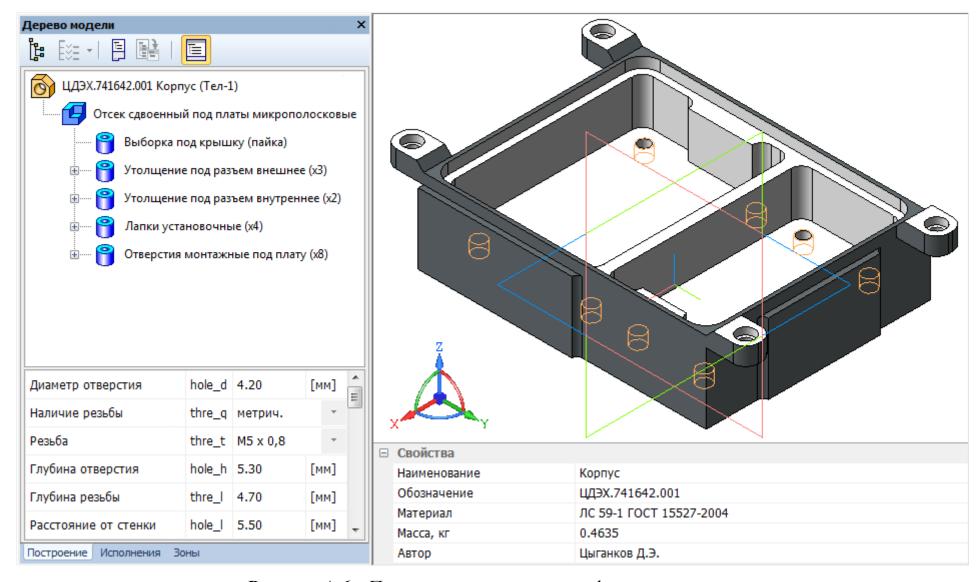


Рисунок А.6 – Построение конструктивно-функционального

элемента «Отверстия монтажные под плату»

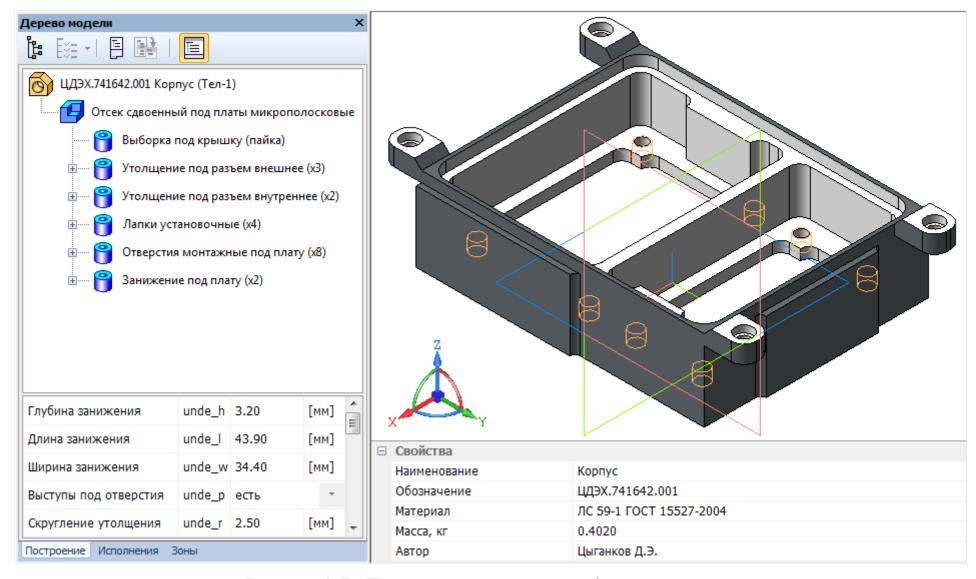


Рисунок А.7 – Построение конструктивно-функционального

элемента «Занижение под плату»

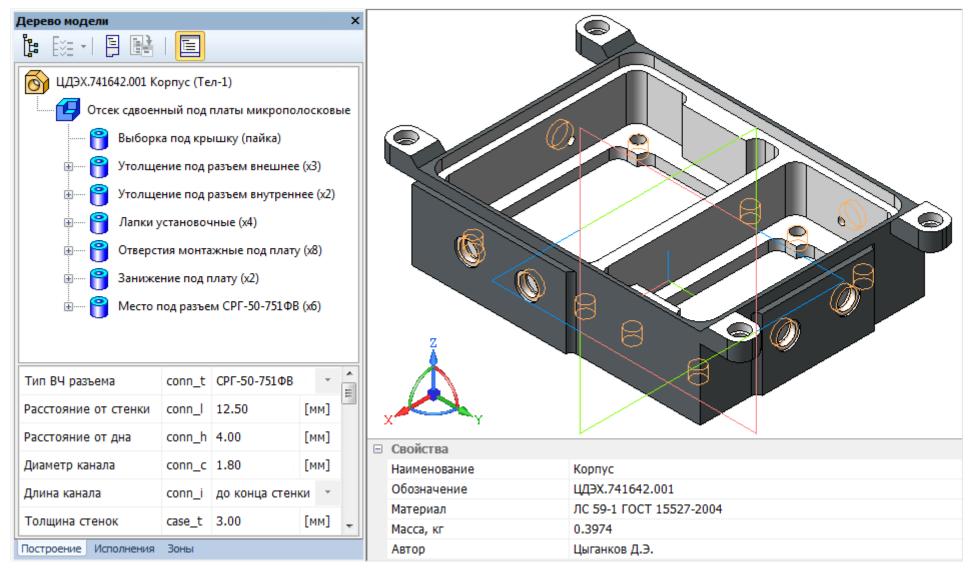


Рисунок А.8 – Построение конструктивно-функционального элемента *«Место под разъем СРГ-50-751ФВ»*

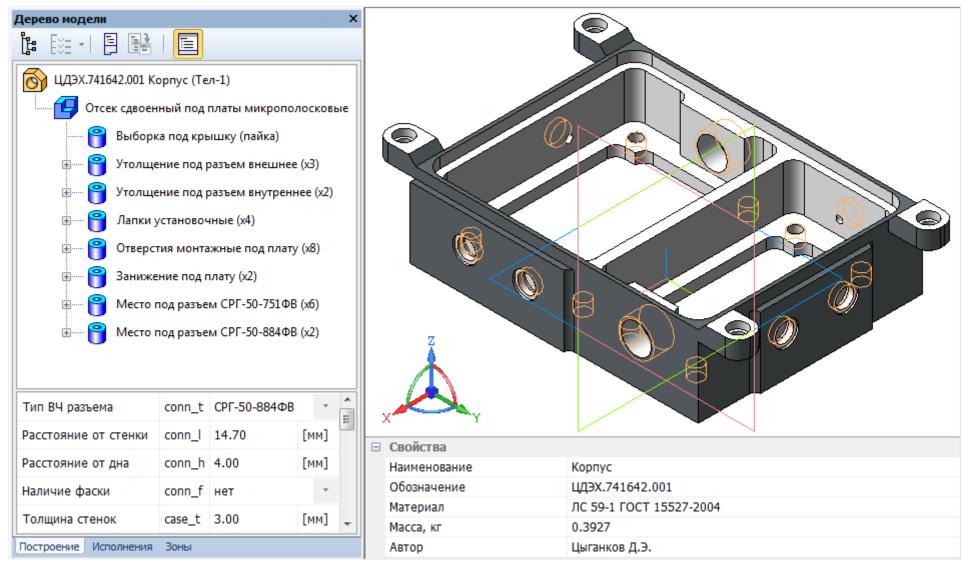


Рисунок А.9 – Построение конструктивно-функционального элемента *«Место под разъем СРГ-50-884ФВ»*

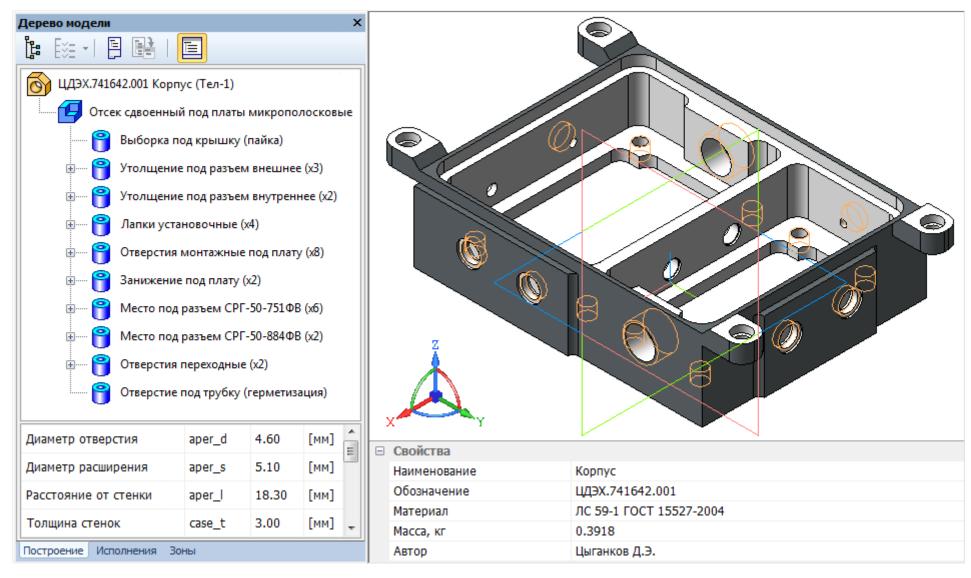


Рисунок А.10 – Построение конструктивно-функциональных

элементов «Отверстия переходные» и «Отверстие под трубку (герметизация)»

ПРИЛОЖЕНИЕ Б Отображение проектных решений с использованием комплекса программных средств

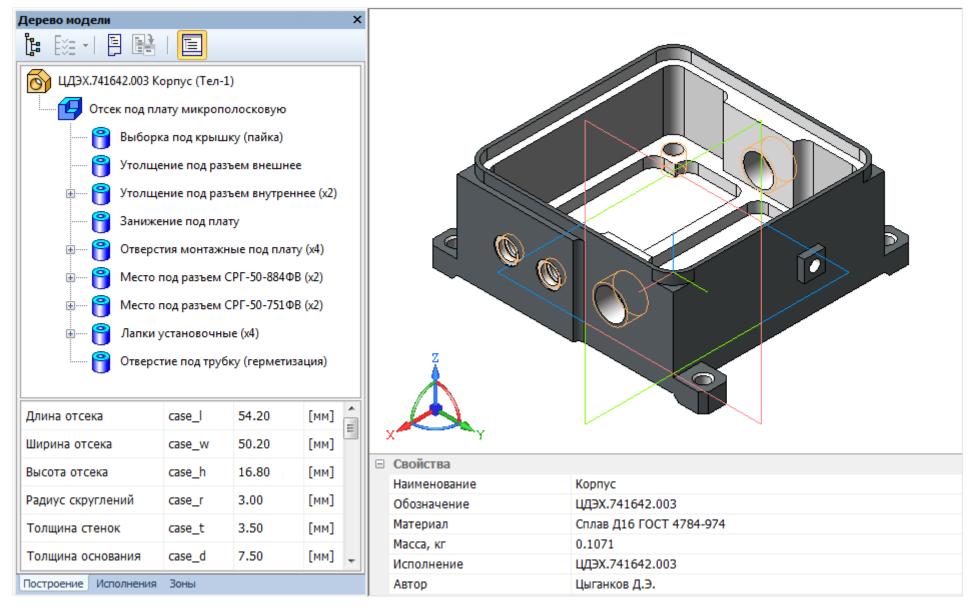


Рисунок Б.1 – Открытая 3D-модель детали «*Корпус*»

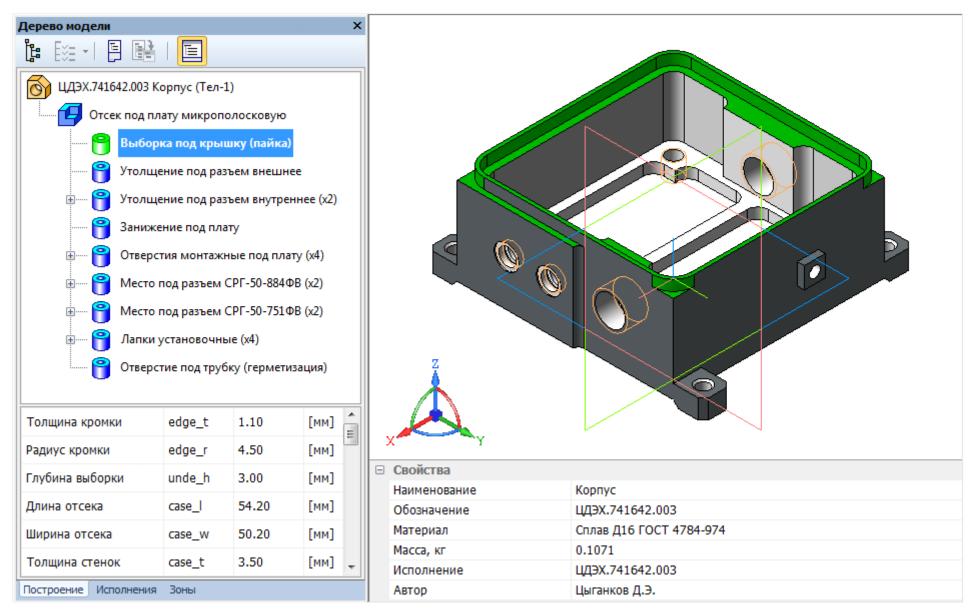


Рисунок Б.2 – Выбор конструктивно-функционального элемента «Выборка под крышку (пайка)»

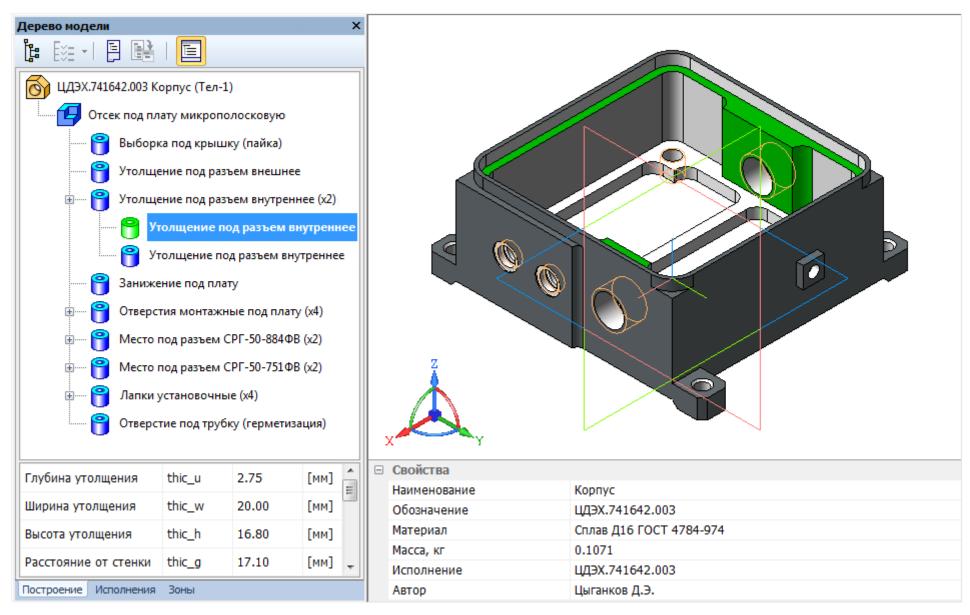


Рисунок Б.3 – Выбор конструктивно-функционального элемента «Утолщение под разъем внутреннее»

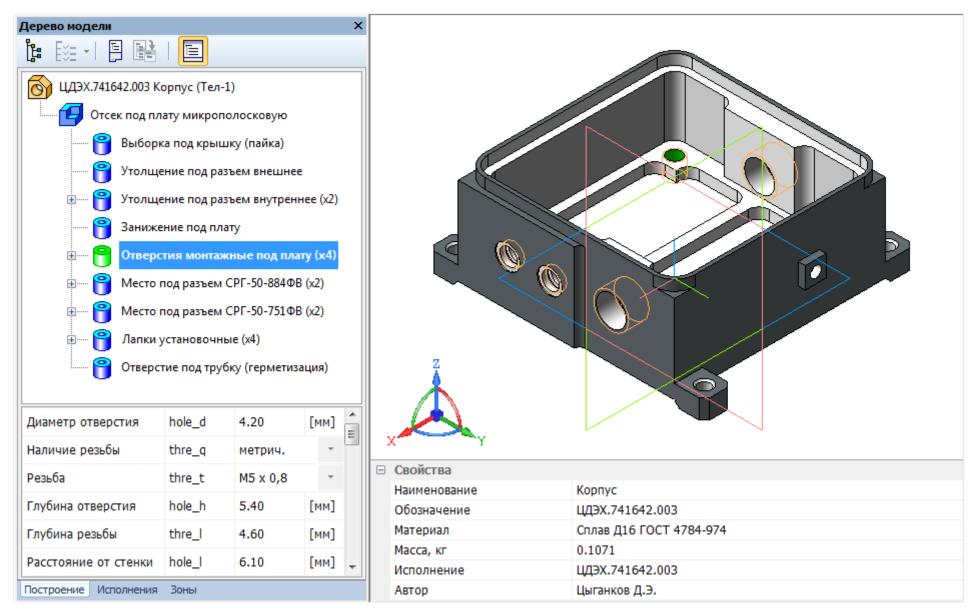


Рисунок Б.4 – Выбор группы конструктивно-функциональных элементов «Отверстия монтажные под плату»

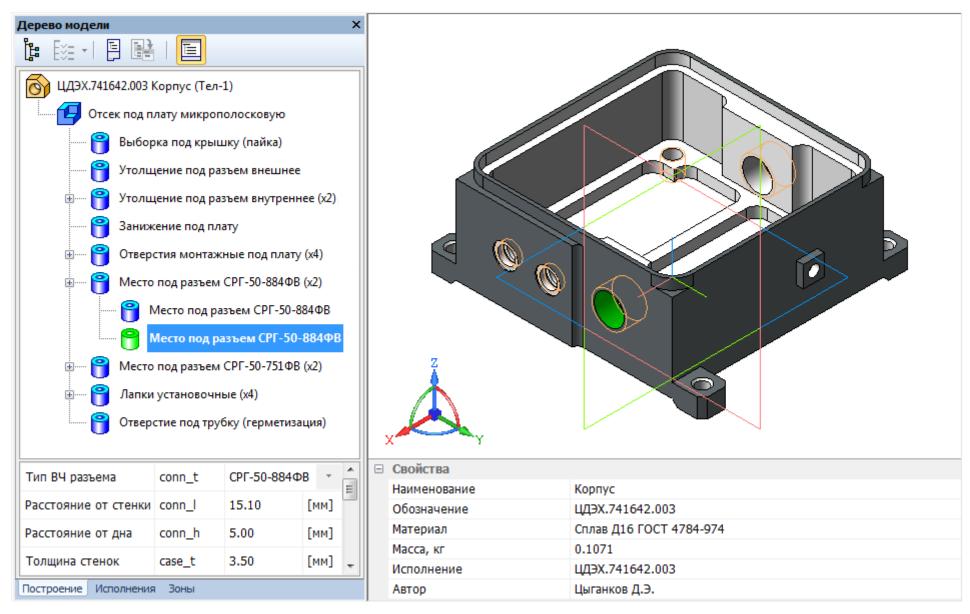


Рисунок Б.5 – Выбор конструктивно-функционального элемента «Место под разъем СРГ-50-884ФВ»

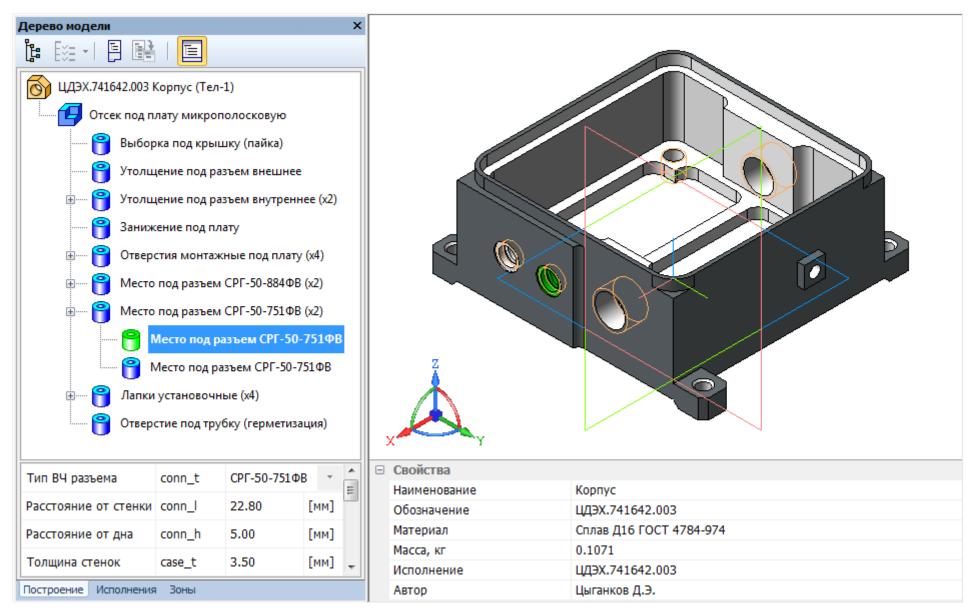


Рисунок Б.6 – Выбор конструктивно-функционального элемента «Место под разъем СРГ-50-751ФВ»

ПРИЛОЖЕНИЕ В Модификация проектного решения с использованием комплекса программных средств

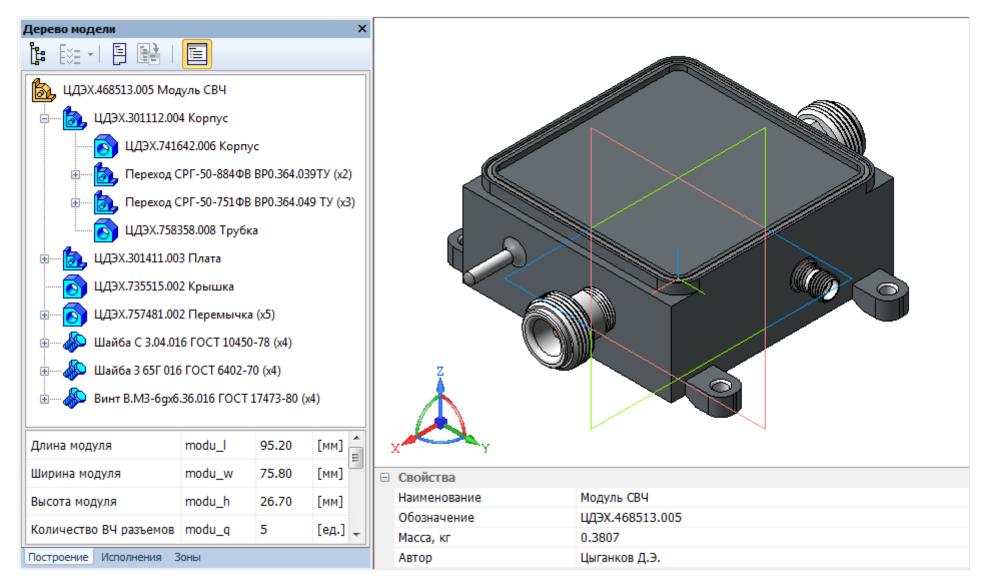


Рисунок В.1 – Исходное проектное решение –

– сборочная 3D-модель узла «Модуль СВЧ»

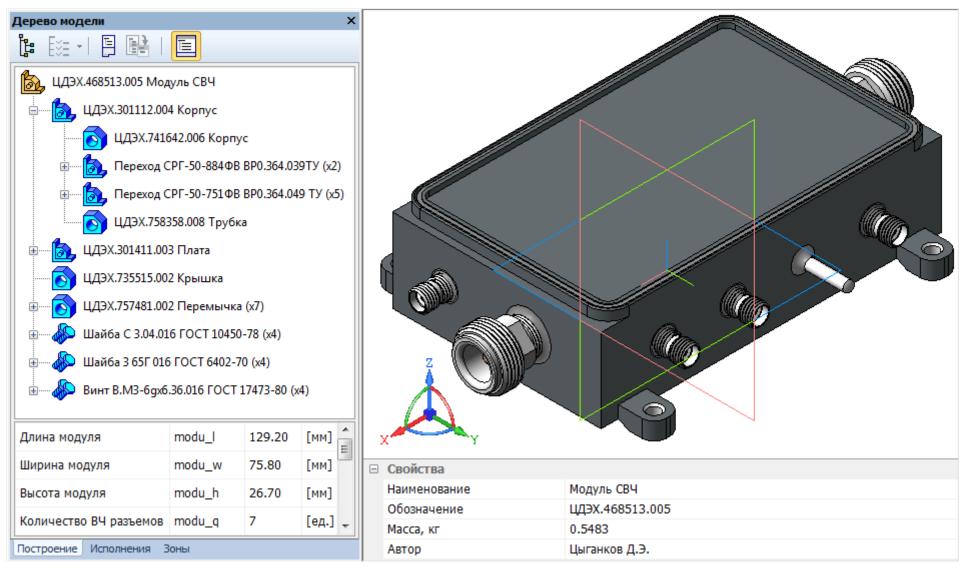


Рисунок В.2 – Модификация проектного решения – увеличение длины детали *«Корпус»*, изменение конфигураций отверстий и расположения трубки под герметизацию, добавление сборочных единиц *«Разъем СРГ-50-751ФВ»*

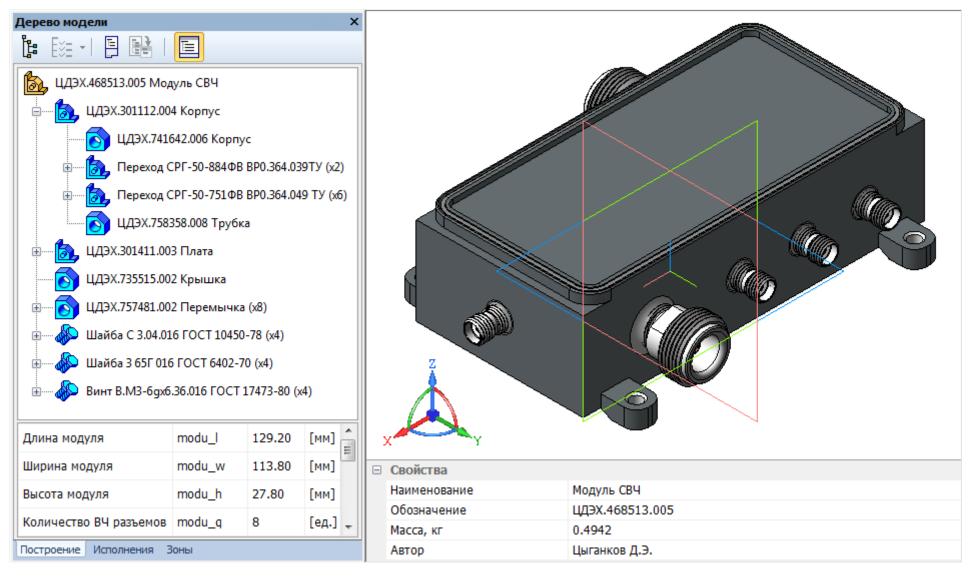


Рисунок В.3 – Модификация проектного решения – уменьшение ширины детали *«Корпус»*, изменение конфигураций отверстий и расположения трубки под герметизацию, изменение положения сборочных единиц *«Переход СРГ-50-...»*

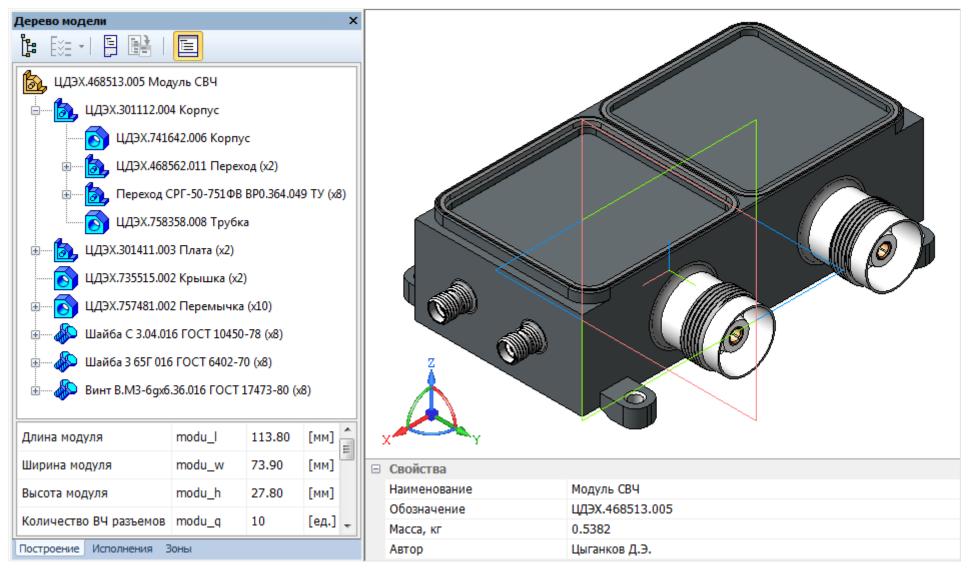


Рисунок В.4 – Модификация проектного решения – изменение количество отсеков в составе детали *«Корпус»*, изменение конфигураций отверстий, замена сборочных единиц *«Переход СРГ-50-884ФВ…»* на *«Переход ЦДЭХ.468.562.011»*

ПРИЛОЖЕНИЕ Г Фрагменты исходного комплекса программных средств

• Процедура построения конструктивно-функциональной базы «Отсек под плату микрополосковую»

```
TopoDS Shape UHFModuleDesignDoc::Case (float case 1, float case w, float case h,
float case r, float case t, float case d) {
// Исходные проектные параметры:
     case 1 - длина (внутренняя) отсека под плату микрополосковую;
//
   case w - ширина (внутренняя) отсека под плату микрополосковую;
//
   case h - высота (внутренняя) отсека под плату микрополосковую;
// case r - радиус скруглений отсека под плату микрополосковую;
// case t - толщина стенок отсека под плату микрополосковую;
// case d - толщина основания отсека под плату микрополосковую;
// Предварительный расчет:
float case n = (case 1 / 2); // Половина внутренней длины отсека;
float case m = (case w / 2); // Половина внутренней ширины отсека;
float case L = (case n + case t); // Внешняя (габаритная) длина отсека;
float case W = (case m + case t); // Внешняя (габаритная) ширина отсека;
float case H = (case h + case d); // Внешняя (габаритная) высота отсека;
// Объявление опорных точек на плоскости Z = 0:
     gp Pnt case p01 = gp Pnt( case L, case W, 0);
    gp Pnt case p02 = gp Pnt( case L, -case W, 0);
    gp Pnt case p03 = gp Pnt(-case L, -case W, 0);
    gp_Pnt case_p04 = gp_Pnt(-case_L, case_W, 0);
// Объявление опорных точек на плоскости Z = case H:
    gp Pnt case p05 = gp Pnt( case n, case m, case H);
     gp Pnt case p06 = gp Pnt( case n, -case m, case H);
    gp Pnt case p07 = gp Pnt(-case n, -case m, case H);
     gp Pnt case p08 = gp Pnt(-case n, case m, case H);
// Построение граней по двум точкам на плоскости Z = 0:
     BRepBuilderAPI MakeEdge case e01(case p01, case p02);
     BRepBuilderAPI MakeEdge case e02(case p02, case p03);
     BRepBuilderAPI MakeEdge case e03(case p03, case p04);
     BRepBuilderAPI MakeEdge case e04(case p04, case p01);
// Построение граней по двум точкам на плоскости Z = case \ H:
     BRepBuilderAPI MakeEdge case e05(case p05, case p06);
     BRepBuilderAPI MakeEdge case e06(case p06, case p07);
```

```
BRepBuilderAPI MakeEdge case e07(case p07, case p08);
    BRepBuilderAPI MakeEdge case e08(case p08, case p05);
// Преобразование граней в замкнутый контур на плоскости {\tt Z} = {\tt 0}:
    BRepBuilderAPI MakeWire case w01;
         case w01.Add(case e01);
         case w01.Add(case e02);
         case w01.Add(case e03);
         case w01.Add(case e04);
// Преобразование граней в замкнутый контур на плоскости Z = case H:
    BRepBuilderAPI MakeWire case w02;
         case w02.Add(case e05);
         case w02.Add(case e06);
         case w02.Add(case e07);
         case w02.Add(case e08);
// Формирование эскиза на плоскости Z = 0:
    BRepBuilderAPI MakeFace case f01(case w01);
// Формирование эскиза на плоскости Z = case H:
    BRepBuilderAPI MakeFace case f02(case w02);
// Построение трехмерных тел выдавливания:
    TopoDS_Shape case_S01; // Внешний объем отсека под плату микрополосковую;
         Case S01= BRepPrimAPI MakePrism(case f01, gp Vec(0.00, 0.00, case H));
    TopoDS Shape case S02; // Внутренний объем отсека под плату микрополосковую;
         case S02 = BRepPrimAPI MakePrism(case f02, gp Vec(0.00, 0.00,-case h));
// Построение скругления граней:
    BRepFilletAPI MakeFillet case S03(case S02);
    TopExp Explorer ex(case S02, TopAbs EDGE);
              TopoDS Edge case g01;
                   case g01 = TopoDS::Edge(ex.Current());
                        case S03.Add(case r, case g01);
                             ex.Next();
                   case g01 = TopoDS::Edge(ex.Current());
                        case S03.Add(case r, case g01);
                             ex.Next();
                             ex.Next();
                             ex.Next();
                             ex.Next();
                   case g01 = TopoDS::Edge(ex.Current());
                        case S03.Add(case r, case g01);
                             ex.Next();
                             ex.Next();
                             ex.Next();
                             ex.Next();
                   case g01 = TopoDS::Edge(ex.Current());
```

```
case_S03.Add(case_r, case_g01);

// Вычитание трехмерных тел:
   TopoDS_Shape case_S04; // 3D-тело отсека под плату микрополосковую;
        case_S04 = BRepAlgo_Cut(case_S01, case_S03);

// Возвращение результирующего 3D-тела:
   return case S04; }
```

• Процедура построения конструктивно-функционального фрагмента «Отсек сдвоенный под платы микрополосковые»

```
TopoDS Shape UHFModuleDesignDoc::Case Dual(int case x, float case 1 1,
float case 1 2, float case w 1, float case w 2, float case h, float case r,
float case t, float case d) {
// Исходные проектные параметры:
    case x - тип соединения отсеков (по длине / по ширине);
    саѕе 1 1 - длина (внутренняя) первого отсека под плату микрополосковую;
    саѕе w 1 - ширина (внутренняя) первого отсека под плату микрополосковую;
    саѕе 1 2 - длина (внутренняя) второго отсека под плату микрополосковую;
    case w 2 - ширина (внутренняя) второго отсека под плату микрополосковую;
   case h - высота отсека сдвоенного под платы микрополосковые;
    case r - радиус внутренних скруглений отсека под платы микрополосковые;
   case t - толщина стенок отсека сдвоенного под платы микрополосковые;
//
    case d - толщина основания отсека сдвоенного под платы микрополосковые;
// Объявление внутренних параметров:
    float case 0; // Общая длина отсека сдвоенного под платы микрополосковые;
    float case Q; // Общая ширина отсека сдвоенного под платы микрополосковые;
// Предварительный расчет:
    float case H = (case h + case d); // Внешняя (габаритная) высота отсека;
    switch (case x) { // Тип соединения отсеков под платы микрополосковые;
         case 1: { // Соединение отсеков по общей ширине;
              case 0 = (case 1 1 + (2 * case t));
              case Q = ((case w 1 + case w 2) + 3 * (case t)); }
                  break:
         case 2: { // Соединение отсеков по общей длине;
              case 0 = ((case 1 1 + case 1 2) + 3 * (case t));
              case Q = (case w 1 + (2 * case t)); }
                  break; }
    float case L = (case O / 2); // Половина общей длины отсека сдвоенного;
    float case W = (case Q / 2); // Половина общей ширины отсека сдвоенного;
```

```
float case L i = (case L - case t); // Половина внутренней длины отсека;
    float case_W_i = (case_W - case_t); // Половина внутренней ширины отсека;
// Объявление опорных точек на плоскости Z = 0:
    gp Pnt case p01 = gp Pnt( case L, case W, 0);
    gp Pnt case p02 = gp Pnt( case L, -case W, 0);
    gp_Pnt case_p03 = gp Pnt(-case L, -case W, 0);
    gp Pnt case p04 = gp Pnt(-case L, case W, 0);
// Объявление опорных точек на плоскости Z = case H:
    gp Pnt case p05, case p06, case p07, case p08;
    gp Pnt case p09, case p10, case p11, case p12;
    switch (case x) { // Тип соединения отсеков под платы микрополосковые;
         case 1: { // Соединение отсеков по общей ширине;
              case p05 = gp Pnt( case L i, -case W i + case w 1, case H);
              case_p06 = gp_Pnt( case L i, -case W i, case H);
              case p07 = gp Pnt(-case L i, -case W i, case H);
              case p08 = gp Pnt(-case L i, -case W i + case w 1, case H);
              case p09 = gp Pnt( case L i, case W i, case H);
              case_p10 = gp_Pnt( case_L_i, case_W_i - case_w_2, case_H);
              case p11 = gp Pnt(-case L i, case W i - case w 2, case H);
              case_p12 = gp_Pnt(-case_L_i, case_W_i, case_H); }
                  break:
         case 2: { // Соединение отсеков по общей длине;
              case p05 = gp Pnt(-case L i + case l 1, case W i, case H);
              case_p06 = gp_Pnt(-case L i + case 1 1, -case W i, case H);
              case p07 = gp Pnt(-case L i, -case W i, case H);
              case p08 = gp Pnt(-case L i, case W i, case H);
              case p09 = gp Pnt( case L i, case W i, case H);
              case p10 = gp Pnt( case L i, -case W i, case H);
              case p11 = gp Pnt( case L i - case 1 2, -case W i, case H);
              case_p12 = gp_Pnt( case L i - case 1 2, case W i, case H); }
                  break; }
// Построение граней по двум точкам на плоскости Z = 0:
    BRepBuilderAPI MakeEdge case e01(case p01, case p02);
    BRepBuilderAPI MakeEdge case e02(case p02, case p03);
    BRepBuilderAPI MakeEdge case e03(case p03, case p04);
    BRepBuilderAPI MakeEdge case e04(case p04, case p01);
// Построение граней по двум точкам на плоскости {\tt Z} = case H:
    BRepBuilderAPI MakeEdge case e05(case p05, case p06);
    BRepBuilderAPI MakeEdge case e06(case p06, case p07);
    BRepBuilderAPI MakeEdge case e07(case p07, case p08);
    BRepBuilderAPI MakeEdge case e08(case p08, case p05);
    BRepBuilderAPI MakeEdge case e09(case p09, case p10);
    BRepBuilderAPI MakeEdge case e10(case p10, case p11);
```

```
BRepBuilderAPI MakeEdge case ell(case pl1, case pl2);
    BRepBuilderAPI MakeEdge case e12(case p12, case p09);
// Преобразование граней в замкнутый контур на плоскости {\tt Z} = {\tt 0}:
    BRepBuilderAPI MakeWire case w01;
         case w01.Add(case e01);
         case w01.Add(case e02);
         case w01.Add(case e03);
         case w01.Add(case e04);
// Преобразование граней в замкнутые контуры на плоскости {\tt Z} = case H:
    BRepBuilderAPI MakeWire case w02;
         case w02.Add(case e05);
         case w02.Add(case e06);
         case w02.Add(case e07);
         case w02.Add(case e08);
    BRepBuilderAPI MakeWire case w03;
         case w03.Add(case e09);
         case w03.Add(case e10);
         case w03.Add(case e11);
         case w03.Add(case e12);
// Формирование эскиза на плоскости Z = 0:
    BRepBuilderAPI MakeFace case f01(case w01);
// Формирование эскиза на плоскости Z = case H:
    BRepBuilderAPI MakeFace case f02(case w02);
    BRepBuilderAPI MakeFace case f03(case w03);
// Построение трехмерных тел выдавливания:
    TopoDS Shape case S01; // Внешний объем отсека сдвоенного;
         case S01 = BRepPrimAPI MakePrism(case f01,gp Vec(0.00, 0.00, case H));
    TopoDS Shape case S02; // Внутренний объем первого отсека;
         case S02 = BRepPrimAPI MakePrism(case f02,gp Vec(0.00, 0.00,-case h));
    TopoDS Shape case S03; // Внутренний объем второго отсека;
         case S03 = BRepPrimAPI MakePrism(case f03,gp Vec(0.00, 0.00,-case h));
// Построение скругления граней внутреннего объема первого отсека:
    BRepFilletAPI MakeFillet case_S04(case_S02);
    TopExp Explorer ex(case S02, TopAbs EDGE);
              TopoDS Edge case g01;
                   case g01 = TopoDS::Edge(ex.Current());
                        case S04.Add(case r, case g01);
                             ex.Next();
                   case g01 = TopoDS::Edge(ex.Current());
                        case S04.Add(case r, case g01);
                             ex.Next();
                             ex.Next();
                             ex.Next();
```

```
ex.Next();
                   case_g01 = TopoDS::Edge(ex.Current());
                        case S04.Add(case r, case g01);
                             ex.Next();
                             ex.Next();
                             ex.Next();
                             ex.Next();
                   case g01 = TopoDS::Edge(ex.Current());
                        case S04.Add(case r, case g01);
// Построение скругления граней внутреннего объема второго отсека:
     BRepFilletAPI MakeFillet case S05(case S03);
     TopExp Explorer ey(case S03, TopAbs EDGE);
              TopoDS Edge case g02;
                   case g02 = TopoDS::Edge(ey.Current());
                        case S05.Add(case r, case g02);
                             ey.Next();
                   case g02 = TopoDS::Edge(ey.Current());
                        case S05.Add(case r, case g02);
                             ey.Next();
                             ey.Next();
                             ey.Next();
                             ey.Next();
                   case g02 = TopoDS::Edge(ey.Current());
                        case_S05.Add(case_r, case_g02);
                             ey.Next();
                             ey.Next();
                             ey.Next();
                             ey.Next();
                   case g02 = TopoDS::Edge(ey.Current());
                        case_S05.Add(case r, case g02);
// Объединение трехмерных тел:
    TopoDS Shape case S06; // Многотельное 3D-тело двух отсеков;
         case S06 = BRepAlgo Fuse(case S04, case S05);
// Вычитание трехмерных тел:
    TopoDS Shape case S07; // 3D-тело отсека сдвоенного под платы микрополосковые;
         case_S07 = BRepAlgo_Cut(case_S01, case_S06);
// Возвращение результирующего 3D-тела:
    return case S07; }
```

• Процедура построения конструктивно-функциональной базы «Поддон под плату микрополосковую»

```
TopoDS Shape UHFModuleDesignDoc::Pallet(float pall 1, float pall w, float pall r,
float pall h) {
// Исходные проектные параметры:
    pall 1 - длина поддона под плату микрополосковую;
// pall w - ширина поддона под плату микрополосковую;
// pall r - радиус скруглений поддона под плату микрополосковую;
// pall h - высота (толщина) поддона под плату микрополосковую;
// Предварительный расчет:
    float pall L = (pall 1 / 2); // 1/2 длины поддона под плату микрополосковую;
    float pall W = (pall w / 2); // 1/2 ширины поддона под плату микрополосковую;
// Объявление опорных точек на плоскости Z = 0:
    gp Pnt pall p01 = gp Pnt( pall L, pall W, 0);
    gp Pnt pall p02 = gp Pnt( pall L,-pall W, 0);
    gp Pnt pall p03 = gp Pnt(-pall L,-pall W, 0);
    gp_Pnt pall_p04 = gp_Pnt(-pall_L, pall_W, 0);
// Построение граней по двум точкам на плоскости Z = 0:
    BRepBuilderAPI MakeEdge pall e01(pall p01, pall p02);
    BRepBuilderAPI MakeEdge pall e02(pall p02, pall p03);
    BRepBuilderAPI MakeEdge pall e03(pall p03, pall p04);
    BRepBuilderAPI MakeEdge pall e04(pall p04, pall p01);
// Преобразование граней в замкнутый контур на плоскости Z = 0:
    BRepBuilderAPI MakeWire pall w01;
         pall w01.Add(pall e01);
         pall w01.Add(pall e02);
         pall w01.Add(pall e03);
         pall_w01.Add(pall e04);
// Формирование эскиза на плоскости Z = 0:
    BRepBuilderAPI MakeFace pall f01(pall w01);
// Построение трехмерных тел выдавливания:
    TopoDS Shape pall S01; // 3D-тело поддона под плату микрополосковую;
         pall S01 = BRepPrimAPI MakePrism(pall f01,gp Vec(0.00, 0.00, pall h));
// Построение скруглений граней:
    BRepFilletAPI MakeFillet pall S02(pall S01);
    TopExp Explorer ex(pall S01, TopAbs EDGE);
              TopoDS Edge pall g01;
                   pall g01 = TopoDS::Edge(ex.Current());
                        pall_S02.Add(pall_r,pall_g01);
```

```
ex.Next();
                   pall g01 = TopoDS::Edge(ex.Current());
                        pall S02.Add(pall r,pall g01);
                             ex.Next();
                             ex.Next();
                             ex.Next();
                             ex.Next();
                   pall g01 = TopoDS::Edge(ex.Current());
                        pall S02.Add(pall r,pall g01);
                             ex.Next();
                             ex.Next();
                             ex.Next();
                             ex.Next();
                   pall g01 = TopoDS::Edge(ex.Current());
                        pall S02.Add(pall r,pall g01);
// Возвращение результирующего 3D-тела:
    return pall S02; }
```

• Процедура построения конструктивно-функционального фрагмента «Отверстие монтажное под плату микрополосковую»

```
TopoDS Shape UHFModuleDesignDoc::Hole (double hole x, double hole y, double hole z,
int hole a, float hole d, float hole h, float case d, float pall h) {
// Исходные проектные параметры:
   hole x / y / z - координаты привязки отверстия монтажного под плату;
   hole a - тип отвертия (отверстие в корпусе / отверстие в поддоне);
   hole d - диаметр отверстия монтажного под плату микрополосковую;
//
   hole h - глубина отверстия под плату микрополосковую;
// case d - толщина основания отсека под плату микрополосковую;
// pall h - Высота (толщина) поддона под плату микрополосковую;
// Предварительный расчет:
    switch (hole a) { // Тип отвертия монтажного под плату микрополосковую;
         case 1: { // Отверстие в корпусе;
              hole_z = case_d;}
                 break;
         case 2: { // Отверстие в поддоне;
              hole z = pall h }
                  break; }
    float hole D = (hole d / 2); // радиус отверстия монтажного под плату;
```

```
// Объявление опорной точки на плоскости Z = hole z:
    gp_Pnt hole_p01 = gp_Pnt( hole_x, hole_y, hole_z);
// Построение окружности на плоскости Z = hole z:
    gp Circ hole c01 = gp Circ(gp Ax2(hole p01, gp Dir(0,0,1)), hole D);
// Построение граней из окружности на плоскости Z = hole z:
    BRepBuilderAPI MakeEdge hole e01(hole c01);
// Преобразование граней в замкнутый контур на плоскости Z = hole z:
    BRepBuilderAPI MakeWire hole w01;
         hole w01.Add(hole e01);
// Формирование эскиза на плоскости Z = hole z:
    BRepBuilderAPI MakeFace hole f01(hole w01);
// Построение трехмерных тел выдавливания:
    TopoDS Shape hole S01; // 3D-тело отверстия под плату микрополосковую;
         hole S01 = BRepPrimAPI MakePrism(hole f01,gp Vec(0.00, 0.00, -hole h));
// Возвращение результирующего 3D-тела:
    return hole S01; }
```

• Процедура построения конструктивно-функционального фрагмента «Место под разъем СРГ-50-884ФВ»

```
TopoDS Shape UHFModuleDesignDoc::Slot SRG 50 884FV(double slot x, double slot y,
double slot z, int slot P, int slot D, float slot g, float case t) {
// Исходные проектные параметры:
    slot x / y / z - координаты привязки места под разъем СРГ-50-884\PhiB;
    slot P - плоскость (YOZ / XOZ) эскиза места под разъем СРГ-50-884\PhiB;
// slot D - направление (вектор) привязки места под разъем СРГ-50-884\PhiВ;
    slot g - ширина фаски с торца корпуса по резьбе M10;
    case t - толщина стенки отсека под плату микрополосковую;
// Объявление внутренних параметров:
    int slot 0; // Тип конфигурации в зависимости от плоскости и направления;
         if ((slot D == 1) && (slot P == 1)) {slot O = 1;}; // конфитурация 1;
         if ((slot D == 1) && (slot P == 2)) {slot O = 2;}; // конфигурация 2;
         if ((slot D == 2) && (slot P == 1)) {slot O = 3;}; // конфигурация 3;
         if ((slot D == 2) && (slot P == 2)) {slot O = 4;}; // конфигурация 4;
// Предварительный расчет:
    float slot s = 4.59905; // Радиус сверла в отверстии с резьбой M10;
// Определение текущих значений параметров (после геометрической привязки):
    double slot S = (slot y + slot s); // радиус отверстия с резьбой M10;
    double slot f = (slot x + slot g); // глубина фаски с торца корпуса;
```

```
double slot E = (slot S + slot f); // фаска с торца корпуса по резьбе M10;
// Объявление точки - начала осевых линий:
    gp Pnt slot p00 = gp Pnt(slot x, slot y, slot z);
// Создание осевой линии:
    gp Ax1 slot a01;
// Объявление опорных точек на плоскости Z = slot z:
    gp Pnt slot p01, slot p02, slot p03, slot p04, slot p05;
    switch (slot 0) { // Определение конфигурации места под разъем;
         case 1: { // Конфигурация 1: плоскость YOZ, направление 1;
              slot a01 = gp Ax1(slot p00, gp Dir(0.,-1., 0.));
                   slot p01 = gp Pnt(slot y, slot x, slot z);
                   slot p02 = qp Pnt(slot E, slot x, slot z);
                   slot p03 = gp Pnt(slot S, slot f, slot z);
                   slot p04 = gp Pnt(slot S, case t, slot z);
                   slot p05 = gp Pnt(slot y, case t, slot z); }
                        break:
         case 2: { // Конфигурация 2: плоскость YOZ, направление 2;
              slot a01 = gp Ax1(slot p00, gp Dir(0., 1., 0.));
                   slot p01 = gp Pnt(slot y, -slot x, slot z);
                   slot p02 = gp Pnt(slot E, -slot x, slot z);
                   slot p03 = gp Pnt(slot S, -slot f, slot z);
                   slot p04 = gp Pnt(slot S, -case t, slot z);
                   slot p05 = gp Pnt(slot y,-case t, slot z); }
                       break;
         case 3: { // Конфигурация 3: плоскость XOZ, направление 1;
              slot a01 = gp Ax1(slot p00, gp Dir(-1., 0., 0.));
                   slot p01 = gp Pnt(-slot x, slot y, slot z);
                   slot p02 = gp Pnt(-slot x, slot E, slot z);
                   slot p03 = gp Pnt(-slot f, slot S, slot z);
                   slot p04 = gp Pnt(-case t, slot S, slot z);
                   slot p05 = gp Pnt(-case t, slot y, slot z); }
                   break;
         case 4: { // Конфигурация 4: плоскость X0Z, направление 2;
              slot a01 = gp Ax1(slot p00, gp Dir(1., 0., 0.));
                   slot p01 = gp Pnt(slot x, slot y, slot z);
                   slot p02 = gp Pnt(slot x, slot E, slot z);
                   slot p03 = gp Pnt(slot f, slot S, slot z);
                   slot p04 = gp Pnt(case t, slot S, slot z);
                   slot p05 = gp Pnt(case t, slot y, slot z); }
                        break; }
// Построение граней по двум точкам на плоскости Z = slot z:
    BRepBuilderAPI MakeEdge slot e01(slot p01, slot p02);
    BRepBuilderAPI MakeEdge slot e02(slot p02, slot p03);
```

```
BRepBuilderAPI MakeEdge slot e03(slot p03, slot p04);
    BRepBuilderAPI MakeEdge slot e04(slot p04, slot p05);
    BRepBuilderAPI MakeEdge slot e05(slot p05, slot p01);
// Преобразование граней в замкнутый контур на плоскости Z = slot z:
    BRepBuilderAPI MakeWire slot w01;
         slot w01.Add(slot e01);
         slot w01.Add(slot e02);
         slot w01.Add(slot e03);
         slot w01.Add(slot e04);
         slot w01.Add(slot e05);
// Формирование эскиза из замкнутого контура на плоскости {\tt Z} = slot {\tt z}:
    BRepBuilderAPI MakeFace slot f01(slot w01);
// Построение трехмерного тела вращения:
    TopoDS Shape slot S01; // 3D-тело места по разъем СРГ-50-884ФВ;
         slot S01 = BRepPrimAPI MakeRevol(slot f01, slot a01);
// Возвращение результирующего 3D-тела:
    return slot S01; }
```

• Процедура построения конструктивно-функционального фрагмента «Место под разъем СРГ-50-751ФВ»

```
TopoDS Shape UHFModuleDesignDoc::Slot SRG 50 751FV(double slot x, double slot y,
double slot z, int slot P, int slot D, float slot r, float slot w, float slot l,
float slot p, float slot j, float slot d, float case t) {
// Исходные проектные параметры:
     slot x / y / z - координаты привязки места под разъем СРГ-50-751\Phi B;
    slot P - плоскость (Y0Z / X0Z) эскиза места под разъем СРГ-50-751\PhiB;
//
    slot D - направление (вектор) привязки места под разъем СРГ-50-751ФВ;
    slot r - диаметр занижения под пайку;
//
    slot w - глубина занижения под пайку;
    slot 1 - длина резьбы M6 в отверстии;
//
    slot p - длина расточки под выход резьбы;
    slot j - диаметр расточки под выход резьбы;
//
    slot d - диаметр участка согласования;
    case t - толщина стенки отсека под плату микрополосковую;
// Объявление внутренних параметров:
    int slot 0; // Тип конфигурации в зависимости от плоскости и направления;
         if ((slot D == 1) && (slot P == 1)) {slot O = 1;}; // Конфигурация 1;
         if ((slot D == 1) && (slot P == 2)) {slot O = 2;}; // Конфигурация 2;
```

```
if ((slot D == 2) && (slot P == 1)) {slot O = 3;}; // Конфигурация 3;
         if ((slot D == 2) && (slot P == 2)) {slot O = 4;}; // Конфигурация 4;
// Предварительный расчет:
    float slot s = 2.59905; // радиус сверла в отверстии с резьбой M6;
    float slot R = (slot r / 2); // радиус занижения под пайку;
    float slot J = (slot j / 2); // радиус расточки под выход резьбы;
    float slot D = (slot d / 2); // радиус участка согласования;
// Определение текущих значений параметров (после геометрической привязки):
    double slot g = (slot x + slot w); // глубина занижения под пайку;
    double slot u = (slot g + slot 1); // длина резьбы M6 в отверстии;
    double slot m = (slot u + slot p); // длина расточки под выход резьбы;
    double slot v = (slot y + slot s); // радиус отверстия с резьбой M6;
    double slot q = (slot y + slot J); // радиус расточки под выход резьбы;
    double slot h = (slot y + slot R); // радиус занижения под пайку;
// Объявление точки - начала осевых линий:
    gp Pnt slot p00 = gp Pnt(slot x, slot y, slot z);
// Создание осевой линии:
    gp Ax1 slot a01;
// Объявление опорных точек на плоскости Z = \operatorname{slot} z:
    gp Pnt slot p01, slot p02, slot p03, slot p04, slot p05,
            slot p06, slot p07, slot p08, slot p09, slot p10;
    switch (slot 0) { // Определение конфигурации места под разъем;
         case 1: { // Конфигурация 1: плоскость YOZ, направление 1;
              slot_a01 = gp_Ax1(slot_p00, gp_Dir(0.,-1., 0.));
                   slot p01 = gp Pnt(slot y, slot x, slot z);
                   slot p02 = gp Pnt(slot h, slot x, slot z);
                   slot p03 = gp Pnt(slot h, slot g, slot z);
                   slot p04 = gp Pnt(slot v, slot g, slot z);
                   slot p05 = gp Pnt(slot v, slot u, slot z);
                   slot p06 = qp Pnt(slot q, slot u, slot z);
                   slot p07 = gp Pnt(slot q, slot m, slot z);
                   slot p08 = gp Pnt(slot d, slot m, slot z);
                   slot p09 = gp Pnt(slot d, case t, slot z);
                   slot p10 = gp Pnt(slot y, case t, slot z); }
         case 2: { // Конфигурация 2: плоскость YOZ, направление 2;
              slot a01 = gp Ax1(slot p00, gp Dir(0., 1., 0.));
                   slot_p01 = gp_Pnt(slot_y,-slot_x, slot_z);
                   slot p02 = gp Pnt(slot h, -slot x, slot z);
                   slot p03 = gp Pnt(slot h, -slot g, slot z);
                   slot p04 = gp Pnt(slot v, -slot g, slot z);
                   slot p05 = gp Pnt(slot v, -slot u, slot z);
                   slot p06 = gp Pnt(slot q,-slot u, slot z);
```

slot p07 = gp Pnt(slot q, -slot m, slot z);

```
slot_p08 = gp_Pnt(slot_d,-slot_m, slot_z);
                   slot p09 = gp Pnt(slot d,-case t, slot z);
                   slot p10 = gp Pnt(slot y,-case t, slot z); }
                        break;
         case 3: { // Конфигурация 3: плоскость XOZ, направление 1;
              slot a01 = gp Ax1(slot_p00, gp_Dir(-1., 0., 0.));
                   slot p01 = gp Pnt(-slot x, slot y, slot z);
                   slot p02 = gp Pnt(-slot x, slot h, slot z);
                   slot p03 = gp Pnt(-slot g, slot h, slot z);
                   slot p04 = gp Pnt(-slot g, slot v, slot z);
                   slot p05 = qp Pnt(-slot u, slot v, slot z);
                   slot p06 = gp Pnt(-slot u, slot q, slot z);
                   slot p07 = gp Pnt(-slot m, slot q, slot z);
                   slot p08 = gp Pnt(-slot m, slot d, slot z);
                   slot p09 = gp Pnt(-case t, slot d, slot z);
                   slot_p10 = gp_Pnt(-case t, slot y, slot z); }
                        break;
         case 4: { // Конфигурация 4: плоскость XOZ, направление 2;
              slot a01 = gp Ax1(slot p00, gp Dir(1., 0., 0.));
                   slot p01 = gp Pnt(slot x, slot y, slot z);
                   slot p02 = gp Pnt(slot x, slot h, slot z);
                   slot p03 = gp Pnt(slot g, slot h, slot z);
                   slot p04 = gp Pnt(slot g, slot v, slot z);
                   slot p05 = gp Pnt(slot u, slot v, slot z);
                   slot p06 = gp Pnt(slot u, slot q, slot z);
                   slot p07 = gp Pnt(slot m, slot q, slot z);
                   slot p08 = gp Pnt(slot m, slot d, slot z);
                   slot p09 = gp Pnt(case t, slot d, slot z);
                   slot p10 = gp Pnt(case t, slot y, slot z); }
                        break; }
// Построение граней по двум точкам на плоскости Z = slot z:
     BRepBuilderAPI MakeEdge slot e01(slot p01,slot p02);
    BRepBuilderAPI MakeEdge slot e02(slot p02, slot p03);
    BRepBuilderAPI MakeEdge slot e03(slot p03, slot p04);
    BRepBuilderAPI MakeEdge slot e04(slot p04, slot p05);
    BRepBuilderAPI MakeEdge slot e05(slot p05, slot p06);
    BRepBuilderAPI MakeEdge slot e06(slot p06, slot p07);
    BRepBuilderAPI MakeEdge slot e07(slot p07, slot p08);
    BRepBuilderAPI MakeEdge slot_e08(slot_p08,slot_p09);
    BRepBuilderAPI MakeEdge slot e09(slot p09, slot p10);
    BRepBuilderAPI MakeEdge slot e10(slot p10, slot p01);
// Преобразование граней в замкнутый контур на плоскости Z = \operatorname{slot} z:
```

```
BRepBuilderAPI MakeWire slot w01;
         slot w01.Add(slot e01);
         slot w01.Add(slot e02);
         slot w01.Add(slot e03);
         slot w01.Add(slot e04);
         slot w01.Add(slot e05);
         slot w01.Add(slot e06);
         slot w01.Add(slot e07);
         slot w01.Add(slot e08);
         slot w01.Add(slot e09);
         slot w01.Add(slot e10);
// Формирование эскиза из замкнутого контура на плоскости Z = slot z:
    BRepBuilderAPI MakeFace slot f01(slot w01);
// Построение трехмерного тела вращения:
    TopoDS Shape slot S01; // 3D-тело места по разъем СРГ-50-751ФВ;
         slot S01 = BRepPrimAPI MakeRevol(slot f01, slot a01);
// Возвращение результирующего 3D-тела:
    return slot S01; }
```

• Процедура визуализации сформирвоанной 3D-модели

```
void UHFModuleDesignDoc::Display_3D(TopoDS_Shape Shape_X) {

// Исходный параметр:

// Shape_X - визуализируемый 3D-объект;

// Определение внутренней переменной

    Handle (AIS_Shape) aSect1 = new AIS_Shape(Shape_X);

// Определение «материала» - набора визуализационных свойств:

    myAISContext->SetMaterial(aSect1,Graphic3d_NOM_DEFAULT);

// Определение цвета 3D-тела:

    myAISContext->SetColor(aSect1,Quantity_NOC_WHITE,Standard_False);

// Определение цвета 3D-тела:

    myAISContext->SetDisplayMode(aSect1,1,Standard_False); // на весь экран;

// Визуализация сформированной 3D-модели:

    myAISContext->Display(aSect1); }
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Д Акт внедрения результатов диссертационного исследования



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ федеральное государственное бюджетное образо-

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

(УлГТУ)
Северный Венец ул., д. 32,
г. Ульяновск, 432027, Россия
Тел.: (8422) 43-06-43; факс: (8422) 43-02-37
Е-mail: rector@ulstu.ru http://www.ulstu.ru
ОКПО 02069378, ОГРН 1027301160226
ИНН/КПП 7325000052/732501001

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе ФРБОУ ВО «Ульяновский технический технический

университет»

Е.В. Суркова

2018 г.

AKT

о внедрении в учебный процесс результатов диссертационной работы Цыганкова Дениса Эдуардовича

Результаты диссертационной работы Цыганкова Д.Э. «Методы и средства конструктивно-функционального проектирования механических узлов радиотехнических изделий на основе процессной модели проектной деятельности», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» при обучении бакалавров по направлению подготовки 01.03.04 «Прикладная математика», профиль «Математическое моделирование в экономике и технике» и магистров по направлению подготовки 01.04.04 «Прикладная математика», программа «Математическое программное обеспечение обработки информации в технике, экономике и управлении».

Заведующий кафедрой «Прикладная математика и информатика» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», д.т.н., профессор

В.Р. Крашенинников

ПРИЛОЖЕНИЕ Е Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и базы данных

POCCHICKASI DELLEPAHINS



POCCHICKASI DELLEPALINSI



密

密

斑

容

密

路

密

密

密

路路

容

密

松松

密

密

容

斑

斑

斑

密

路路

松

路

路

路路

怒

密

路

密

斑

密

路

路

路路

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018613882

Модуль семантического конструирования микрополосковых СВЧ устройств

Правообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» (RU)

Авторы: **Цыганков Денис Эдуардович (RU), Похилько Александр Федорович (RU)**



路路路路路路

路路

松

路

路路路路路

密

路

密

密

路

密

怒

密

密

密

密

密

密

路路

密

容

路

路

密

密

路

路路

路

路

路

路

路

路

密

密

路

密

密

密

Заявка № 2018611257

Дата поступления **09 февраля 2018 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 26 марта 2018 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Telesce

Г.П. Ивлиев

POCCINICIAN DELLEPANDINI



安安安安安

密

密

密

路路

岛

斑

母

母

密

松

密

松

密

斑

松

路

密

密

密

密

密

校

路路

密

路路

密

密

母

路

路

密

密

密

路

路

密

松

密

密

斑

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2018620481

Библиотека семантически обобщаемых базовых операций САD-системы

Правообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» (RU)

Авторы: **Цыганков Денис Эдуардович (RU), Федорова Ксения Андреевна (RU), Похилько Александр Федорович (RU)**



Заявка № 2018620157 Дата поступления 09 февраля 2018 г. Дата государственной регистрации в Реестре баз данных 26 марта 2018 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Felles

Г.П. Ивлиев

路路

路

路

斑

安

岛

密

路

密

斑

斑

斑

路

路

母

母

路

岛

密

斑

松松

路路

岛

路

岛

岛

岛

路路

密

路路

密

斑

斑

路

密

母

路

母

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Дипломы лауреата Всероссийского конкурса «Инженер года»





Всероссийский конкурс «ИНЖЕНЕР ГОДА»

Диплом лауреата

ВРУЧЕН

Цыганкову Денису Эдуардовичу

по итогам конкурса по версии «Инженерное искусство молодых» в номинации

Техника военного и специального назначения (проектирование, изготовление релейных станций, взрывных устройств)



Председатель жюри конкурса:

Ю.В. Гуляев академик РАН, член президиума РАН

25 января 2016 г.

г. Москва

№ 16-1966