

На правах рукописи

Марков Максим Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
БИОМЕХАНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ «КОСТЬ-ЭНДОПРОТЕЗ»**

Специальность: 05. 13. 12 – Системы автоматизации проектирования
(промышленность)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт Петербург 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), кафедра системы автоматизированного проектирования

Научный руководитель –

доктор технических наук, профессор Дмитриевич Геннадий Даниилович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, Лузин Сергей Юрьевич, технический директор и руководитель Обособленного подразделения САПР Санкт-Петербургского филиала ООО «Эремекс».

кандидат технических наук, доцент, Буров Геннадий Николаевич, зам. генерального директора, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Санкт-Петербургский научно-практический центр медико-социальной экспертизы, протезирования и реабилитации инвалидов им. Г.А. Альбрехта» Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации.

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Защита состоится «27» июня 2013 г. в 16.30 часов на заседании диссертационного совета Д212.238.02 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ

Автореферат разослан «___» _____ 2013 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д212.238.02

Н. М. Сафьянников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность исследования

На современном этапе развития САПР актуальной становится задача разработки новых проблемно-ориентированных систем проектирования сложных объектов заданного целевого назначения, в частности биомеханических объектов (средств коррекции и замещения функций органов и систем, относящихся к этой группе протезно-ортопедических изделий, часть из которых, а именно фиксаторы и эндопротезы, используется для лечения переломов). Деструктивно-дистрофические заболевания суставов получили широкое распространение. Например, в Санкт-Петербурге частота заболеваний крупных суставов составляет 353,3 случая на 10000 жителей. Остро стоит проблема улучшения условий сращения отломов при хирургическом лечении переломов, увеличения срока службы эндопротеза, разработки методики контролируемой реабилитации кости после операций и травмы.

Операция эндопротезирования позволяет лечить тяжёлые заболевания тазобедренного сустава (дегенеративно-дистрофические заболевания, артриты, переломы шейки бедренной кости и др.) на поздних стадиях развития, а также при наличии анатомических изменений сустава (дисплазия, врожденные вывихи тазобедренных суставов и др.). Несмотря на более чем полувековую практику применения эндопротезов, их конструкции до сегодняшнего дня имеют ряд недостатков, которые уменьшают их эксплуатационный срок, а иногда служат причиной осложнений (расшатывание ножки эндопротеза, перипротезные переломы и др.). Дальнейшее улучшение результатов операций эндопротезирования требует решения двух взаимосвязанных задач: разработка новых конструкций эндопротезов, адаптированных для работы в составе биомеханического объекта «кость-эндопротез» и разработка инструментария медика-пользователя биомеханических САПР, позволяющего ему подобрать оптимальный эндопротез для конкретного пациента.

В последние годы появились отечественные биомеханические программные комплексы (БПК), позволяющие решать частные задачи в сфере медицинской биомеханики, на основе использования зарубежных многофункциональных машиностроительных САПР, программных и графических систем, таких как: Unigraphics, CATIA, Ansys, Mimics, AnyBody и др. Однако следует признать, что БПК не решают задачу сквозного процесса проектирования и не содержат развитых инструментальных средств для различных групп пользователей:

1. медиков-ортопедов (система должна оперативно приспосабливаться к уровню их квалификации и иметь гибкий интерфейс, допускающий модификацию операционной модели диалога);
2. администраторов САПР, сопровождающих систему в клинике (система должна быть развиваемой в функциональном направлении и иметь

открытый инструментальный аппарат для подключения новых биомеханических инструментов и новых моделей биомеханических объектов).

Указанные обстоятельства определили основные направления выполненных в диссертации исследований, тематика которых тесно связана с планами НИР Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), Российского научно-исследовательского института травматологии и ортопедии имени Р.Р. Вредена (РНИИТО им. Р.Р.Вредена) и Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета (СПбГПМУ). Исследования проводились в 2006-2013 годах в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологии в РФ «Науки о жизни» (указ президента РФ №810) и в рамках программы стратегического развития СПбГЭТУ «ЛЭТИ» по разработке приоритетной научно-образовательной платформы «Биомедицинские технологии».

С учетом сказанного, разработка системы автоматизированного проектирования биомеханических объектов «кость-эндопротез» является актуальной задачей, имеющей большое теоретическое, практическое и социально-экономическое значение.

Цель работы и основные задачи исследования

Настоящая диссертация посвящена исследованию методов построения САПР биомеханических объектов «кость-эндопротез» и разработке на основе этого исследования математического, информационного и программного обеспечений САПР BoneImplant.

Для достижения поставленной цели исследования необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать и разработать открытую архитектуру САПР биомеханических объектов «кость-эндопротез», отличающуюся возможностью гибкого конфигурирования отдельных инструментов проектирования.
2. Выполнить исследование методов визуализации биомеханических объектов, алгоритмов манипуляции биомеханическими объектами на сцене и разработать на их основе подсистему визуализации биомеханических объектов.
3. Выполнить исследование алгоритмов триангуляции, а также алгоритмов проведения булевых операций над трехмерными геометрическими телами и разработать на их основе подсистему твердотельного моделирования.
4. Исследовать методы импорта томограммы, а также методы построения трехмерной модели кортикальной и трабекулярной костной ткани и разработать на их основе подсистему моделирования кости.
5. Исследовать известные эндопротезы, способы их фиксации в костной ткани, методы построения трехмерной модели эндопротеза и

- разработать на основе результатов этого исследования подсистему моделирования эндопротеза.
6. Провести исследование методов моделирования адаптационных изменений структуры и механических свойств кортикальной и трабекулярной костной ткани и разработать на основе результатов этого исследования подсистему моделирования адаптационных изменений биомеханического объекта «кость-эндопротез».
 7. Исследовать влияние параметров эндопротеза на адаптационные изменения структуры и механические свойства костной ткани после операции эндопротезирования и разработать на основе проведенного исследования подсистему анализа и оптимизации параметров эндопротеза с целью улучшения его характеристик.
 8. Исследовать механизмы хранения в базе данных объектов, участвующих в процессе проектирования, а именно: томограмм, данных о пациенте, моделей костных тканей, моделей эндопротезов, моделей биомеханических объектов «кость-эндопротез», результатов моделирования адаптационных изменений костной ткани, результатов оптимизации параметров эндопротеза. Разработать на основе проведенного исследования подсистему информационного обеспечения.

Методы исследования

Для решения поставленных задач в диссертационной работе использовались основы общей теории САПР, методы оптимизации, методы решения задач механики деформируемого твердого тела, методы организации информационного обеспечения, основы теории и методы построения САПР биомеханических объектов.

Новые научные результаты

1. Впервые разработана архитектура САПР биомеханических объектов «кость-эндопротез», отличающаяся от известных систем наличием общесистемной биомеханической части, обеспечивающей возможность развития и адаптации САПР к новым биомеханическим объектам, а также гибкую настройку инструментов биомеханического проектирования.
2. Исследованы и разработаны оригинальные методы визуализации биомеханических объектов и манипуляции биомеханическими объектами на сцене, обеспечивающие высокую скорость работы с большими геометрическими объектами.
3. Разработаны оригинальные методы и алгоритмы построения трехмерных моделей костных тканей по снимкам томограммы, а также методы и алгоритмы построения модели эндопротеза.
4. Разработана модель биомеханического объекта «кость-эндопротез», учитывающая особенности фиксации эндопротеза в кости и позволяющая оптимизировать параметры эндопротеза с целью улучшения его характеристик.

5. Разработана биомеханическая модель адаптационных изменений структуры и свойств кортикальной и трабекулярной костной ткани, отслеживающая адаптационные изменения структуры и свойств костной ткани под действием нагрузок.
6. Разработан метод подбора оптимального эндопротеза для конкретного пациента, позволяющий учитывать особенности строения тазобедренного сустава и биомеханические характеристики пациента.

Достоверность научных результатов подтверждается корректностью применяемого математического аппарата и практикой использования САПР BoneImplant в педагогической и практической деятельности кафедры «Госпитальной хирургии с курсами травматологии и ВПХ» СПбГПМУ и в учебном процессе кафедры «Системы автоматизированного проектирования» СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в курсе «Методы оптимизации».

Основные положения, выносимые на защиту

1. Архитектура САПР биомеханических объектов «кость-эндопротез».
2. Общесистемная и объектно-ориентированная части САПР биомеханических объектов «кость-эндопротез».
3. Методы построения подсистемы визуализации.
4. Модель биомеханического объекта «кость-эндопротез».
5. Биомеханическая модель адаптационных изменений

Практическая ценность

Значение для практики результатов диссертационной работы заключается в следующем:

1. Архитектура САПР биомеханических объектов «кость-эндопротез» обеспечивает расширяемость системы и позволяет адаптировать ее для решения новых задач в области биомеханики.
2. Инструменты САПР позволяют разрабатывать эндопротезы, лучше адаптированные для работы в составе биомеханического объекта «кость-эндопротез».
3. Интерфейс системы ориентированный на врача, позволяет использовать ее в широкой врачебной практике, с целью подбора оптимального эндопротеза для конкретного пациента.
4. Открытость архитектуры позволяет использовать накопленные результаты исследования биомеханических объектов в других системах.
5. Зарегистрированные Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам программы перспективны для применения в биомеханических САПР различного назначения.

Реализация и внедрение результатов

Система реализована на базе программной платформы .Net Framework 4.5 с использованием языка программирования C#. В качестве источника данных выступает легковесная встраиваемая реляционная база данных SQLite.

Теоретические и практические результаты диссертационной работы использовались в ряде госбюджетных НИР, проводимых по тематическому плану СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в 2008-2013 гг.: по теме «Разработка теоретических основ модельного проектирования на основе парадигмы виртуальности» (шифр САПР-45, 2009-2010 гг.); по теме «Разработка моделей и методов анализа и синтеза интеллектуальных систем поддержки принятия решений для управления сложными распределенными объектами» (шифр САПР-47 тем. плана СПбГЭТУ 2011 г.); по теме «Математико-логические основы построения сред виртуальных инструментов» (шифр САПР-49 тем. плана СПбГЭТУ 2012-2014 г.); по теме «Разработка алгоритмического и программно-аппаратного обеспечения гибридной облачной среды для образовательного процесса» (шифр ФИМЦ-1 тем. плана СПбГЭТУ 2012-2014 г.)

Результаты работы внедрены в инженерную и учебную практику на двух кафедрах СПбГЭТУ «ЛЭТИ» - кафедре «Системы автоматизированного проектирования» для подготовки магистров и бакалавров по направлению «Информатика и вычислительная техника» и кафедре «Прикладной механики и инженерной графики». Результаты работы используются в педагогической и практической деятельности кафедры «Госпитальной хирургии с курсами травматологии и военно-полевой хирургии» СПбГПМУ и внедрены в медицинскую практику РНИИТО им. Р.Р.Вредена, что подтверждается тремя актами о внедрении.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XIV международной конференции «Современное образование: содержание, технологии, качество» (г. Санкт-Петербург); XI международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM 2007, SCM 2008) (г. Санкт-Петербург); X всероссийской конференции по биомеханике «Биомеханика 2010» (г. Саратов); II межрегиональной научно-методической конференции: «Инновационные технологии в образовательной деятельности» (г. Санкт-Петербург); 60, 61, 62 научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ (г. Санкт-Петербург); VIII международной научно-технической конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» ФРЭМЭ'2012 (г. Владимир – Суздаль)

Публикации

Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 17 печатных работах, в том числе 4 статьи в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 4 свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ, зарегистрированной в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 9 работ в других изданиях и материалах конференций.

Структура и объём работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 88 наименований. Работа изложена на 144 страницах, содержит 45 рисунков и 6 таблиц.

Благодарность. Автор выражает благодарность научному консультанту, д.м.н., профессору каф. «Госпитальной хирургии с курсами травматологии и военно-полевой хирургии» Санкт-Петербургского государственного педиатрического университета Безгодкову Юрию Алексеевичу за помощь, оказанную при внедрении результатов диссертации.

.СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, научная новизна, практическая ценность результатов.

В первой главе рассматриваются вопросы современного состояния САПР биомеханических объектов, анализируются известные программные системы и биомеханические комплексы и обосновывается метод построения САПР, рассчитанной на применение в широкой врачебной практике.

В работе показано, что известные БПК, представляют собой либо системы поддержки принятия решений или программные модули для автоматизации частных этапов проектирования. В сущности, БПК выступают как сервисные системы, сопровождаемые общими рекомендациями по их применению во врачебной практике. Не рассматриваются и не решаются задачи сквозного проектирования биомеханических объектов.

Таким образом, БПК выступают в качестве программного фасада, обеспечивая функцию проводника, адресуемого к распространенным машиностроительным программным системам, таким как Ansys, Unigraphics, Pro Engineer, САТІА. Их применение ограничено в силу ряда причин:

1. Отсутствие в рассматриваемых пакетах компонента, реализующего моделирование адаптационных изменений структуры и свойств в костной ткани происходящих после установки эндопротеза.
2. Применение таких БПК пользователями-врачами чревато опасностью возникновения неконтролируемых ошибок. Существуют ограничения на обратную связь с фасадом и обработку возможных программных исключений в программе вследствие использования разработчиком высокоуровневого АРІ, при этом скорость взаимодействия с конечной системой существенно ниже и время выполнения операций требующих большого количества обращений к конечной системе заметно возрастает. Например, конечно-элементная модель кости, созданная в Mimics, очень часто открывается в других пакетах (Ansys, Unigraphics или САТІА) с ошибками построения граней. Вероятность ошибок при конвертации из формата в формат возрастает вместе со сложностью создаваемого объекта, а поскольку кость с точки зрения твердотельного тела имеет очень сложную поверхность, то ошибки неизбежны. В результате приходится прилагать значительные усилия для устранения

всех коллизий, возникающих при конвертации модели. Таким образом, автоматизация данной процедуры посредством высокоуровневых макросов не представляется возможной.

3. При работе через программный фасад пользователь может воспользоваться инструментами исходного интерфейса и исказить модель без оповещения фасада. Ошибки выявляются только при последующей попытке манипулирования объектом посредством надстроенного интерфейса.
4. Поскольку лицензионная стоимость коммерческих машиностроительных систем достаточно высока, то БПК, базирующаяся на нескольких таких машиностроительных пакетах не доступны для учебных заведений и бюджетных клиник (таких как СПбГЭТУ «ЛЭТИ», РНИИТО им. Р.Р.Вредена, СПбГПУ, ВМА им. Кирова и др.).

В заключительной части главы отмечается, что БПК не обеспечивает реализацию адаптационных свойств биомеханических САПР и отличается отсутствием инвариантности по четырем аспектам – операционному, информационному, проблемному и лингвистическому.

Во второй главе рассматриваются вопросы построения и реализации САПР BoneImplant. В диссертационной работе показано, что система должна быть построена на основе библиотек с открытым исходным кодом. Что позволяет уменьшить объем работы, используя функции, представленные в подключаемых библиотеках, а с другой - добиться гибкости в проектировании системы, не связывая себя рамками открытого интерфейса сторонней САПР. Формулируются требования реализации принципов расширяемости и модульности функциональной полноты и замкнутости. Ставится задача реализации оригинальных биомеханических инструментов, исключающих необходимость адресации к машиностроительным САПР или к их подсистемам. Формируются функциональные требования к САПР BoneImplant: 1) наличие функций ввода и описания костной ткани посредством обработки снимков томографа; 2) наличие объектно-ориентированных инструментов геометрического моделирования, а также инструментов импорта трехмерной модели в одном из открытых форматах обмена данными между САПР; 3) реализация инструментов анализа работы эндопротеза в составе биомеханического объекта «кость-эндопротез»; 4) реализация инструментов анализа и оптимизации параметров эндопротеза; 5) наличие средств визуализации биомеханических объектов «кость-эндопротез», с возможностью интерактивного взаимодействия с ними посредством курсора мыши; 6) возможность вывода полученных результатов в виде отчетов, а также сохранения результатов работы в базе данных.

В диссертационной работе показано, что сформулированным выше требованиям отвечает архитектура САПР биомеханических объектов «кость-эндопротез» BoneImplant, представленная на рис.1. Предложенное программное обеспечение BoneImplant содержит общесистемную

биомеханическую часть, предназначенную для построения проблемно-ориентированных САПР широкого перечня биомеханических объектов и объектно-ориентированную часть, учитывающую специфику проектируемого биомеханического объекта.

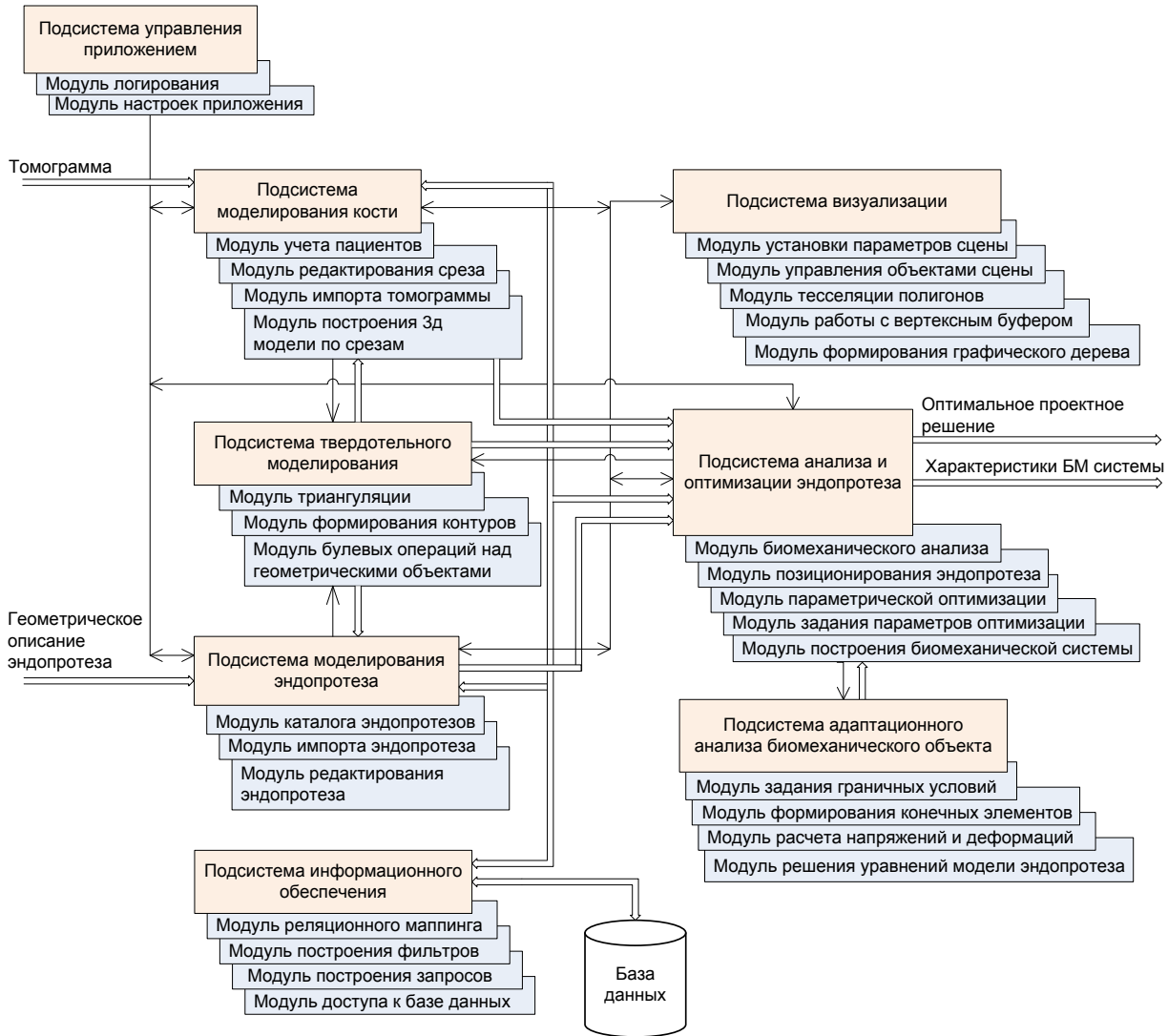


Рис. 1. Основные компоненты САПР BoneImplant.

Общесистемная биомеханическая часть включает в себя проблемно-независимые инструменты проектирования, такие как: подсистема управления приложением, подсистема моделирования кости, подсистема твердотельного моделирования, подсистема визуализации, подсистема информационного обеспечения, подсистема адаптации костной ткани. *Объектно-ориентированная часть* включает в себя инструменты, нацеленные на работу с биомеханическим объектом «кость-эндопротез», такие как: подсистему моделирования эндопротеза, подсистему анализа и оптимизации параметров эндопротеза. *Подсистема моделирования кости* содержит модули учета пациента, редактирования среза, импорта томограммы и построения трехмерной модели по срезам. Подсистема позволяет импортировать томограмму из формата DICOM и построить на ее основе модель кости. *Подсистема моделирования эндопротеза* содержит модули каталога эндопротезов, импорта эндопротеза из сторонних систем,

редактирования эндопротеза. Подсистема предоставляет пользователю инструменты геометрического моделирования, позволяющие создать трехмерную модель эндопротеза и описать его характеристики. Также поддерживает возможность импорта готовых моделей в формате STEP, что дает возможность использовать эндопротезы, созданные в любой другой программе поддерживающей данный формат. *Подсистема анализа и оптимизации эндопротеза* содержит модули биомеханического анализа, позиционирования эндопротеза, параметрической оптимизации, задания параметров оптимизации, построения биомеханической системы. Подсистема позволяет построить на основе модели кости и модели эндопротеза биомеханический объект «кость-эндопротез» и провести на его основе оптимизацию параметров эндопротеза с целью улучшения его характеристик. Также используя данную подсистему можно подобрать оптимальный эндопротез для конкретного пациента. Для этого в подсистеме необходимо построить биомеханические объекты «кость-эндопротез» на основе разных эндопротезов и одной модели кости, а после провести адаптационное моделирование для каждого объекта и выбрать оптимальный эндопротез исходя из величины потери костной массы в каждом случае. При построении биомеханического объекта подсистема производит автоматическое позиционирование эндопротеза относительно костной ткани, что существенно ускоряет процедуру создания модели. *Подсистема адаптационного анализа* биомеханического объекта содержит модули задания граничных условий, формирования конечных элементов, расчета напряжений и деформации, решения уравнений модели эндопротеза. Подсистема описывает модель биомеханического объекта «кость-эндопротез» и позволяет моделировать изменения, происходящие в биомеханической системе вследствие действия адаптационного механизма костной ткани. *Подсистема твердотельного моделирования* содержит модули триангуляции, формирования контуров, булевых операций над геометрическими объектами. Подсистема позволяет создавать геометрические тела с помощью различных инструментов геометрического моделирования. *Подсистема визуализации* содержит модули установки параметров сцены, управления объектами сцены, тесселяции полигонов, работы с вертексным буфером, формирования графического дерева. Подсистема отвечает за визуализацию геометрических объектов и за проведение манипуляций ними посредством мыши. *Подсистема информационного обеспечения* позволяет сохранять результаты работы системы в базе данных. *Подсистема управления приложением* выступает посредником между другими подсистемами и реализует управляющие и утилитарные функции.

Третья глава реферируемой работы посвящена разработке подсистемы визуализации САПР. Как правило, биомеханические объекты имеют сложную поверхность, которая требует при визуализации создания большого числа примитивов. В основе подсистемы визуализации лежит библиотека

OpenGL. В результате проведенного анализа способов интерактивного взаимодействия с объектами на сцене показано, что встроенный механизм выбора объектов, имеет плохую производительность при наличии на сцене большого количества геометрических примитивов (более 10000). Поскольку в системе BoneImplant при отображении конечно-элементной модели, количество объектов сетки может достигать 12000 тысяч и больше, использование данного механизма не эффективно.

В качестве альтернативного решения предлагается нестандартный метод, основанный на использовании фонового буфера для организации механизма выбора объектов. Для его работы необходимо чтобы подсистема работала в режиме двойной буферизации. Сцена рисуется в двух режимах: обычный режим отображения и режим выбора. Каждому объекту на сцене, который может быть выбран, также как и в стандартном механизме выбора присваивается уникальный идентификатор. При построении сцены в режиме выбора идентификатор объекта конвертируется в цвет и все грани объекта рисуются этим цветом. Рисование происходит в фоновый буфер, после чего полученная битовая карта кэшируется. Перед выполнением операции смены буферов фоновый буфер перезаписывается в обычном режиме и пользователь не замечает особенностей работы механизма выбора. В отличие от стандартного механизма выбора объектов при данном подходе, последующая перерисовка битовой карты происходит только при изменении параметров сцены, а все промежуточные запросы на получение битовой карты возвращают сохраненную картинку. Чтобы узнать какой объект находится под курсором достаточно считать цвета пикселей находящихся в окрестности курсора с сохраненной в памяти битовой карты, после чего конвертировать их в идентификатор.

Предложенный механизм выбора объектов и комплекс решений принятых для оптимизации данной процедуры позволяет осуществлять интерактивное взаимодействие со сценой содержащей свыше 50000 объектов.

Четвертая глава посвящена разработке подсистемы моделирования кости. Показано, что применение инструментов геометрического моделирования представленных в машиностроительных САПР для проектирования модели кости, требует значительных навыков работы с данными системами и сопряжено с большой трудоемкостью. Определены преимущества использования специализированных инструментов проектирования, позволяющих значительно ускорить процедуру создания модели кости по набору контуров. Описаны преимущества использования в качестве входных данных подсистемы томограммы, представленной в формате передачи и визуализации медицинских изображений DICOM. Описаны основные этапы, и методы создания модели кости используемые в подсистеме. Процесс создания модели кости начинается с импорта томограммы. Модуль импорта автоматически считывает демографические данные пациента, название учреждения в котором проводилось

обследование, дату проведения обследования и набор аксиальных проекций объекта исследования. Аксиальные проекции отображаются в редакторе срезов. Для построения модели кости пользователю достаточно выделить на срезах интересующие границы кортикальной и трабекулярной ткани. Для этого в подсистеме предусмотрен инструмент выделения границ. Он позволяет автоматически выделить границы костной ткани, указав определенную область поиска на срезе. Область поиска позволяет уменьшить зону обработки изображения и увеличить скорость обработки. Выделение происходит на основе яркости участка томограммы, которая отражает плотность ткани в данном регионе. Для этого выставляются пороговые значения яркости для каждой ткани, после чего изображения маскируются и подходящие участки выделяются цветом. При необходимости полученные участки в дальнейшем можно отредактировать в ручном режиме. Полученные участки преобразуются в набор контуров, очерчивающих границы ткани. Используя полученные контуры, подсистема моделирования кости создает трехмерную модель.

Пятая глава посвящена разработке подсистемы адапционного анализа биомеханического объекта и подсистемы анализа и оптимизации эндопротеза. Формируются кинетические уравнения, описывающие адапционные изменения структуры и свойств костной ткани, а также вводятся определяющее соотношение костной ткани, описывающие ее как пороупругую среду с внутренней клеточной регуляцией деформации. Предлагается модель биомеханического объекта «кость-эндопротез», учитывающая адапционные изменения структуры и свойств костной ткани, возникающие в результате перераспределения нагрузок внутри кости. За основу модели костной ткани взята Стэндфордская модель, где в качестве стимула к перестройке костной ткани выступает ежедневный стрессовый стимул β . Он является скалярной величиной, отражающей влияние стресса, вызванного различными типами нагрузок, которые действуют на сустав в течение дня. Его величина определяется как $\beta = (\sum_{i=1}^N n_i \sigma_i^m)^{1/m}$, где N - количество различных типов нагрузки в течение дня, n_i - количество циклов нагрузки определенного типа, σ_i - величина стресса определенного типа, m - вес определяющий влияние стресса при различных количествах нагрузок. При описании стресса в кости выделяется стресс на уровне кости и на уровне ткани. Эти две величины не могут быть одинаковы, поскольку костный мозг и кровеносные сосуды, заполняющие поры, гораздо мягче, чем костная ткань. При этом существует равновесный стимул β_{eq} , при котором кость сохраняет свою структуру и ее плотность остается неизменной. Отклонение от условия равновесия является движущей силой реконструкции. Скорость реконструкции выражается в следующей форме:

$$\Delta r = \begin{cases} c((\beta_t - \beta_t^{eq}) + \gamma\beta_t^{eq}) & \text{для } (\beta_t - \beta_t^{eq}) < -\gamma\beta_t^{eq} \\ 0 & \text{для } -\gamma\beta_t^{eq} \leq (\beta_t - \beta_t^{eq}) \leq \gamma\beta_t^{eq} \\ -c((\beta_t - \beta_t^{eq}) - \gamma\beta_t^{eq}) & \text{для } (\beta_t - \beta_t^{eq}) > \gamma\beta_t^{eq} \end{cases}$$

где c - константа, γ - коэффициент определяющий ширину области, в которой кость сохраняет свою структуру. Для связи пористости костной ткани и ее плотности в модели используется понятие удельной поверхности, которое отражает размеры внутренних полостей в объеме кости и связано с пористостью через следующий полином полученный экспериментально:

$$S_{vel} = 0.02876p^5 - 0.10104p^4 + 0.13396p^3 - 0.09304p^2 + 0.03226p$$

Показано, что величина изменений плотности вследствие реконструкции ткани кости определяется как $\Delta\rho = \Delta r S_{vel} \rho_t$. Таким образом, в полученной модели костная ткань рассматривается как гомогенный и изотропный материал, поведение которого может быть описано двумя параметрами: модулем Юнга E и коэффициентом Пуассона ν . Изменение данных параметров отражается на стрессе в данном участке ткани, что позволяет описать замкнутый итерационный алгоритм реконструкции, где на каждой итерации происходит обновление свойств материала.

Рассматривается подсистема анализа и оптимизации параметров эндопротеза, позволяющая улучшить его характеристики путем формирования в нем дополнительных априори заданных отверстий изменяющих жёсткость протеза. Цель оптимизационной процедуры – получение минимальной величины перестройки костной ткани в биомеханическом объекте, поскольку, жизненный цикл биомеханического объекта напрямую зависит от того насколько быстро костная ткань приспособится к новому полю нагрузок. Обосновывается использование в качестве метода оптимизации генетического алгоритма с целочисленным кодированием. Оптимизируемыми параметрами целевой функции выступают битовые флаги определяющие наличие или отсутствие отверстий в эндопротезе. Показано, что полученное оптимальное проектное решение минимизирует адаптационные изменения костной ткани, происходящие после установки эндопротеза.

В шестой главе рассматриваются вопросы организации информационного обеспечения САПР BoneImplant, а также представлены результаты применения разработанной САПР во врачебной практике.

В качестве источника данных системы выступает легковесная встраиваемая реляционная база данных SQLite. Ее использование не требует установки сервера базы данных, SQLite устанавливается на целевую машину в виде дополнительной библиотеки, что согласуется с требованием адаптации САПР к врачебной практике. Для отображения объектной модели на реляционную модель предлагается использование технологии объектно-реляционного отображения Entity Framework. Использование данного подхода позволяет автоматически преобразовывать объектную модель в реляционную, а также использовать объектную модель для генерации схемы базы данных.

В заключительной части главы в качестве иллюстрации работы САПР BoneImplant представлена биомеханическая оценка опорно-двигательной функции тазобедренного сустава. Проведено исследование динамико-

кинематических особенностей структуры ходьбы (с учетом антропометрических параметров пациентов), возникающих в области тазобедренного сустава в норме и патологии у двух групп пациентов. В первую контрольную группу вошло 30 человек без патологии опорно-двигательной системы, во вторую группу вошло 15 человек, находившихся на лечении в РНИИТО им.Р.Р. Вредена, с дегенеративно-дистрофическими заболеваниями тазобедренного сустава. Полученные данные послужили исходным материалом для расчета активной нагрузки на кость пациента, используемой в подсистеме анализа и оптимизации биомеханического объекта. По томограмме была построена модель кости и на ее основе созданы два биомеханических объекта «кость-эндопротез» на основе эндопротезов «Alloclassic_SLO_Stem_s7_ccd121» и «FitMoreHipStem_s7». Для каждого объекта средствами САПР было проведено моделирование адаптационных изменений. Полученные в результате моделирования данные (рис. 2) позволяют судить о том, что в данном случае «FitMoreHipStem_s7» является оптимальным эндопротезом.

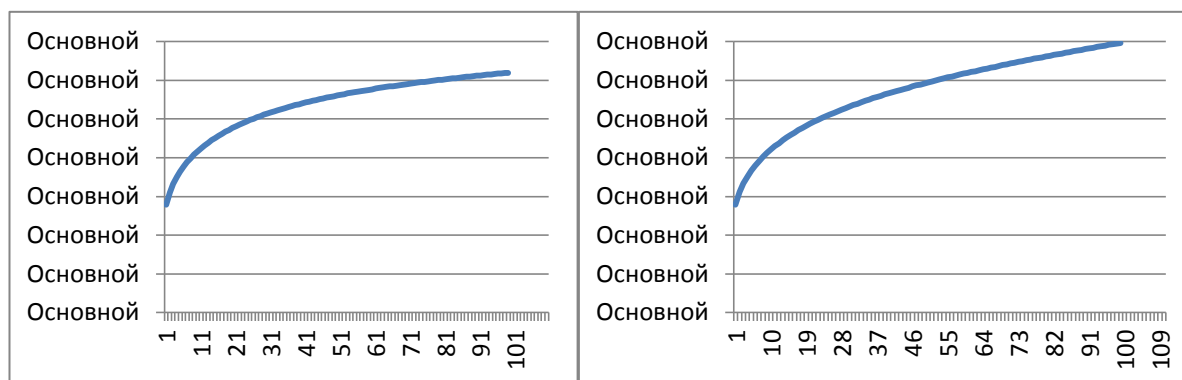


Рисунок 2. Величина адаптационных изменений костной ткани после установки эндопротеза «FitMoreHipStem_s7» (слева) и «Alloclassic_SLO_Stem_s7_ccd121» (справа).

Применение системы позволяет подобрать оптимальный эндопротез для конкретного пациента в условиях врачебной практики, а также оптимизировать параметры существующих конструкций эндопротезов на основе биомеханического анализа.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты, полученные на основе проведенных в диссертационной работе исследований.

Основные результаты работы

1. Разработана архитектура САПР биомеханических объектов «кость-эндопротез», позволяющая учитывать эффективность работы эндопротеза в составе биомеханического объекта «кость-эндопротез» и ориентированная на применение системы во врачебной практике.
2. Исследованы и разработаны методы визуализации биомеханических объектов и манипуляции над биомеханическими объектами на сцене, отличающиеся высокой скоростью работы с большими геометрическими

объектами. На основе полученных результатов реализована подсистема визуализации.

3. Разработаны оригинальные методы и алгоритмы построения модели кости по снимкам томограммы, а также методы и алгоритмы построения модели эндопротеза. На основе полученных результатов реализована подсистема моделирования кости, подсистема моделирования эндопротеза и подсистема твердотельного моделирования.
4. Разработана математическая модель биомеханического объекта «кость-эндопротез» позволяющая проводить оптимизацию параметров эндопротеза. На основе полученных результатов реализована подсистема математического описания биомеханической модели и подсистема оптимизации.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Марков М.В. Исследование и моделирование биомеханических процессов в тазобедренных суставах [Текст] / Марков М.В. Безгодков Ю.А., Ауди К., Дмитриевич Г.Д., Кормилицын О.П. //Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», серия «Биотехнические системы в медицине и экологии». Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ»,2012. – №2 –С.88-91.
2. Марков М.В. Современный подход к биомеханической оценке эффективности применения эндопротезов [Текст] / Безгодков Ю.А., Дмитриевич Г.Д., Марков М.В., Аболин А.Б., Нгуен Н.М. //Ученые записки СПбГМУ им. акад. И.П.Павлова. Санкт-Петербург: Изд-во ГОУ ВПО СПбГМУ им. И.П. Павлова,2012.– №4. –С.70-81.
3. Марков М.В. Сравнительный анализ программного обеспечения биомеханических систем «кость-эндопротез» [Текст] / Дмитриевич Г.Д., Кормилицын О.П., Марков М.В. // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ»,2012. – №09 – С.56-61
4. Марков М.В. Генетические алгоритмы решения задач оптимизации частотных характеристик радиоэлектронных схем [Текст] / Марков М.В., Михеев Ф.А., Павлушин В.А // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», серия «Информатика, управление и компьютерные технологии». Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2006. – №1. – С. 33-38.

Другие статьи, материалы конференций и зарегистрированные программы:

5. Марков М.В. Программа для ЭВМ Genetic Optimum ver.1.0 (GenOpt v.1.0), свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2006612785 зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 04.08.2006 / Дмитриевич Г.Д., Марков М.В., Михеев Ф.А., Павлушин В.А. // Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам серия «Программы для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных схем». М.: ФИПС, 2006. RU ОБПБТ №3 (56).

6. Марков М.В. Программа для ЭВМ Нейросетевой распознаватель текста ver.1.0 (CharRecognizer v.1.0), свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2008612398 зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 19.05.2008 / Дмитриевич Г.Д., Марков М.В., Михеев Ф.А. // Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам серия «Программы для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных схем». М.: ФИПС, 2008. RU ОБПБТ.
7. Марков М.В. Программа для ЭВМ Анализатор адаптационного процесса костной ткани ver.1.0 (ВТА v.1.0), 2010 / Дмитриевич Г.Д., Марков М.В., Михеев Ф.А. // Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам серия «Программы для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных схем». М.: ФИПС, 2010. RU ОБПБТ № 37-10.
8. Марков М.В. Программа для ЭВМ Редактор срезов кости ver.1.0 (SliceEditor v.1.0), Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012611344 зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 02.02.2012 / Дмитриевич Г.Д., Марков М.В., Михеев Ф.А. // Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам серия «Программы для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных схем». М.: ФИПС, 2012. RU ОБПБТ.
9. Марков М.В. Генетические алгоритмы в лабораторном практикуме [Текст] / Марков М.В., Михеев Ф.А. // Материалы XII международной конференции «Современное образование: содержание, технологии, качество». Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2006. – Том 2, – С. 140-141.
10. Марков М.В. Байесовский алгоритм в задаче прогноза динамики численности морских биоресурсов [Текст] / Дмитриевич Г.Д., Михеев Ф.А., Марков М.В. [Текст] // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», серия «Информатика, управление и компьютерные технологии». Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2007.–№3. –С. 19-24.
11. Марков М.В. Разработка методического обеспечения курса «Методы оптимизации» [Текст] / Дмитриевич Г.Д., Марков М.В., Михеев Ф.А. // Материалы XV международной конференции «Современное образование: содержание, технологии, качество». Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009, –Том 1.–С. 101-102.
12. Марков М.В. К вопросу о применении САПР в медицине // Материалы XIV международной конференции «Современное образование: содержание, технологии, качество». Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008. Том 2.– С. 111-112.
13. Марков М.В. Компьютерное моделирование в образовательном процессе [Доклад] / Марков М.В., Романова Ю.С. // Материалы 2-й межрегиональной научно-методической конференции «Инновационные

технологии в образовательной деятельности». Санкт-Петербург: Изд-во СЗТУ, 2010. – С. 99-101.

14. Марков М.В. Модель позиционирования эндопротезов для САПР медицинских изделий [Текст] / Дмитриевич Г.Д., Михеев Ф.А., Марков М.В. // Материалы XI международной конференции по мягким вычислениям и измерениям. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008. –Том 2.– С. 142-143.
15. Марков М.В. Построение автоматизированной биотехнической системы остеосинтеза с учетом индивидуальных особенностей человека [Текст]/ Патрина Т. А., Марков М. В. // Сборник трудов VIII-й Международной научно-технической конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» ФРЭМЭ'2008. г. Владимир – Суздаль, 2-4 июля 2008 г. Владимир, 2008. Т. 1. С. 270-273
16. Марков М.В. Биомеханический анализ «анатомичности» некоторых видов эндопротеза тазобедренного сустава [Текст] / Безгодков Ю.А., Дмитриевич Г.Д., Марков М.В. // Всероссийская конференция «Биомеханика 2010».Саратов: Саратовский Государственный Университет им. Н.Г. Чернышевского, –2010.– С. 37-38.
17. Марков М.В. Применение биомеханической САПР в практике обучения [Текст] / Ауди К., Безгодков Ю.А., Дмитриевич Г.Д., Марков М.В. // XVII Международная научно-методическая конференция «Современное образование: содержание, технологии, качество». – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011.– Том 2 . – С. 222-223.