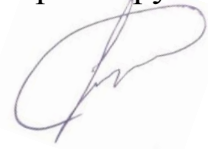


На правах рукописи



ТУМАНОВ Алексей Анатольевич

**АЛГОРИТМЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ТРЕХМЕРНЫХ
МОДЕЛЕЙ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации (в науке и промышленности)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Нижний Новгород – 2018

Работа выполнена на кафедре «Автоматизация машиностроения»
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е.Алексеева

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор
Кретинин Олег Васильевич

Официальные оппоненты: **Попов Евгений Владимирович**
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Инженерной геометрии,
компьютерной графики и автоматизированного
проектирования» ФГБОУ ВО «Нижегородский
государственный архитектурно-строительный
университет» (г. Н.Новгород)
Каляшина Анна Викторовна
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры «Автоматика и управление» ФГБОУ
ВО «Казанский национальный
исследовательский технический университет
им. А.Н.Туполева-КАИ» (г. Казань)

Ведущая организация: **АО «ОКБМ Африкантов»** - Акционерное
Общество "Опытное Конструкторское Бюро
Машиностроения им. И.И.Африкантова"
(г. Н.Новгород)

Защита состоится «17» мая 2018 г. в 13:00 часов в ауд. 1315 на
заседании диссертационного совета Д.212.165.05 в Нижегородском
государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева по адресу:
603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского
государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева и на сайте
<http://www.nntu.ru/content/aspirantura-i-doktorantura/dissertacii>.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Суркова Анна
Сергеевна

Общая характеристика работы.

Актуальность темы исследования.

В современном машиностроении наблюдается повышение требований к качеству и эффективности выпускаемых изделий. Связано это, во-первых, с расширением технических возможностей предприятий и, во-вторых, с ростом конструктивной сложности самих изделий. Основные качественные характеристики изделий закладываются на этапе конструкторского проектирования. Следовательно, уже на этом этапе необходимо принятие таких решений, которые наилучшим образом обеспечат выполнение предъявляемых в техническом задании требований.

Процесс конструкторского проектирования включает в себя два основных компонента: структурный и параметрический синтез проектных решений. Результатом структурного синтеза является принципиальное решение, описывающее структуру будущего изделия. На этапе параметрического синтеза производится определение значений конструктивных параметров выбранной структуры. Зачастую процесс параметрического синтеза осложняется тем, что требования, предъявляемые к проектируемым изделиям в техническом задании, являются комплексными и даже противоречивыми. В подобных случаях сложно сформулировать критерии и разработать алгоритмы параметрического синтеза, которые могли бы обеспечить приемлемое качество проектирования.

Основная масса применяемых в современном машиностроении алгоритмов параметрического синтеза реализуют аналитические и поисковые методы, каждый из которых имеет свои условия и область применения. Исследованиям в области аналитических методов посвящены работы А.П.Норенкова, В.П.Кривошеева, Ю.Г.Стоян и др. В них рассматриваются, главным образом, проектные задачи, легко поддающиеся формализации и имеющие узкую специализацию.

Вопросами разработки поисковых алгоритмов занимались такие исследователи, как Д.И.Батищев, П.Д.Басалин, С.В.Яковлев, Т.А.Силаева,

А.П.Норенков и др. Алгоритмы, реализующие поисковые методы, относятся к решению задач оптимального проектирования и представляют собой сложные алгоритмы глобальной оптимизации.

Однако существующие методы не позволяют в достаточной мере эффективно решать задачи параметрического синтеза. Аналитические методы подразумевают существование подробной математической модели или возможность однозначной формализации, в то время как в машиностроении для большинства проектных задач формализация крайне затруднительна. Алгоритмы глобального поиска зачастую сложны в реализации, и при их использовании не всегда удается учитывать конструктивные требования к проектируемому объекту. Современные разработки в области информационных технологий направлены, главным образом, на задачи структурного синтеза и имеют тенденцию к быстрому прототипированию. Таким образом, актуальной является задача разработки таких алгоритмов параметрического синтеза, которые обеспечивали бы нахождение таких значений конструктивных параметров, при которых выполнялись бы конструкторско-технологические требования к выходным характеристикам проектируемого изделия.

Целью работы является разработка алгоритмов параметрического синтеза конструкций трехмерных моделей изделий машиностроения, основанного на использовании массогабаритных, механических и прочностных характеристик.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Анализ существующих публикаций и разработок, а также актуальных современных информационных технологий в области параметрического синтеза.
2. Исследование возможности использования массогабаритных, прочностных и механических характеристик проектируемых изделий для обеспечения соответствия требованиям, предъявляемым в технических заданиях.

3. Установление зависимостей прочностных, механических и массогабаритных характеристик трехмерных моделей проектируемых изделий от их конструктивных параметров;
4. Разработка алгоритма параметрического синтеза, реализующего снижение массы трехмерной модели путем удаления материала из определенных ее фрагментов при условии выполнения конструктивных требований к модели;
5. Разработка алгоритма повышения равномерности распределения напряжений в теле статически нагруженной трехмерной модели путем изменения ее конструктивных параметров;
6. Программная реализация разработанных алгоритмов.

Объект исследования. Трехмерные модели изделий машиностроения.

Предмет исследования. Параметрический синтез трехмерных моделей изделий машиностроения.

Область исследования соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (в науке и промышленности)»:

- Пункт 2. Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации;
- Пункт 3. Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- В рамках системного анализа **получены зависимости, отражающие** взаимосвязь массогабаритных, механических и прочностных характеристик трехмерных моделей и их конструктивных параметров, **позволяющие** выполнить многовариантный анализ проектируемых моделей по заданному

критерию, *отличающиеся* представлением проектируемого изделия как системы взаимосвязанных компонентов;

- Разработан **алгоритм параметрического синтеза трехмерных моделей**, *позволяющий* уменьшать массу трехмерной модели, *отличающийся* от существующих подходов нахождением в теле трехмерной модели таких фрагментов, из которых возможно удаление материала, при условии выполнения конструктивных требований к модели;
- Разработан **алгоритм параметрического синтеза трехмерных моделей**, *позволяющий* повышать равнопрочность трехмерной модели, *отличающийся* от известных подходов совместным использованием данных о конструктивных параметрах и прочностных характеристиках трехмерной модели и позволяющий устранить в ней концентрации напряжений.

Методы исследования. В процессе исследования использованы методы системного анализа, методы теории вероятностей и математической статистики, методы теории планирования эксперимента, методы и алгоритмы оптимального проектирования, методы теоретической и технической механики.

Обоснованность и достоверность результатов диссертационной работы обеспечены корректным использованием современного математического аппарата и подтверждены результатами экспериментальных исследований на реальном примере.

Практическая значимость. Разработанные в диссертационной работе алгоритмы параметрического синтеза позволяют повысить эффективность проектных решений, принимаемых на этапе создания трехмерных моделей изделий машиностроения, за счет уменьшения массы и повышения степени равнопрочности проектируемого изделия при сохранении нагрузочных характеристик и соблюдении конструктивных требований.

Сведения о внедрении результатов. Результаты диссертационной работы внедрены в работу промышленного предприятия машиностроительного кластера ООО «Дельта Трафо», что подтверждается актом о внедрении. Также результаты внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» при подготовке бакалавров и магистров по направлениям 15.03.04 и 15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств (в машиностроении)», по направлениям 15.03.06 и 15.04.06 «Мехатроника и робототехника», что подтверждается актом о внедрении.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) Целесообразность использования прочностных, массогабаритных и механических характеристик трехмерных моделей для управления качественными характеристиками проектируемого изделия;
- 2) установление зависимостей прочностных, механических и массогабаритных характеристик трехмерных моделей проектируемых изделий от их конструктивных параметров;
- 3) алгоритм параметрического синтеза, реализующий уменьшение массы трехмерной модели путем удаления материала из определенных ее фрагментов при условии выполнения конструктивных требований к модели;
- 4) алгоритм повышения равномерности распределения напряжений в теле статически нагруженной трехмерной модели путем изменения ее конструктивных параметров;

Апробация полученных результатов. Основные положения работы были доложены на: 7-й и 8-й Международной конференции «Autodesk University Russia» (г. Москва, 2013, 2014г.), XIV Международной молодежной научно-технической конференции «Будущее технической науки» (г. Нижний Новгород, 2015г), 26-ой Международной конференции «GraphiCon-2016» (г. Нижний Новгород, 2016г.), III Научно-технической

конференции «Радиолокация. Теория и практика» (г. Нижний Новгород, 2017).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражено в 10 работах, в том числе 4 представлены в научных изданиях, рекомендуемых ВАК Министерства образования и науки РФ; 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

Туманов А.А., Сизов А.Ю. Свидетельство РФ на программу для ЭВМ № 2017616415 «Программа автоматизированной оптимизации трехмерных твердотельных моделей по массогабаритным характеристикам в среде САПР «Autodesk Inventor» от 6 июня 2017 г.

Личный вклад автора. Все выносимые на защиту результаты и положения, составляющие основное содержание диссертационной работы, разработаны и получены лично автором. Автор принимал участие в программной реализации алгоритмов и внедрении созданного программного обеспечения. В большинстве работ, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит определяющая роль при исследовании задачи и получении результатов.

Структура работы. Диссертационная работа изложена на 141 странице, состоит из введения, четырех глав, содержащих 27 рисунков и 3 таблицы, заключения и 5 приложений. Библиографический список включает 104 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится обоснование актуальности, описание целей и задач исследования, объекта, предмета и методов исследования, отмечены научная новизна и практическая значимость результатов.

В главе 1 «Методы параметрического синтеза изделий машиностроения» приведен обзор и анализ работ в области постановки и методов решения задач параметрического синтеза в процессе проектирования машиностроительных изделий. Приведена классификация

методов параметрического синтеза по признаку используемого математического аппарата, а также характеристики изделий, используемые при расчете параметров. Проведен анализ области применения рассмотренных методов, выявлены проблемы, связанные с алгоритмической реализацией рассмотренных методов в условиях реального производства. Выполнен анализ функциональных возможностей современных машиностроительных систем автоматизированного проектирования в области параметрического синтеза трехмерных моделей. Обоснована актуальность задач исследования трехмерных моделей изделий машиностроения на предмет выявления взаимосвязей между их параметрами и характеристиками, необходимость построения алгоритмов параметрического синтеза трехмерных моделей на основании выявленных взаимосвязей.

Материалы главы частично опубликованы в [1,6,8].

В главе 2 «Исследование зависимостей качественных характеристик проектируемых изделий от их конструктивных параметров» проведен анализ требований, предъявляемых к проектируемым изделиям в различных отраслях машиностроения, на основании которых выявлены взаимосвязи между качественными характеристиками проектируемых изделий и прочностными, механическими и массогабаритными характеристиками их трехмерных моделей. Установлены зависимости характеристик трехмерных моделей от их конструктивных параметров, на основании которых сформулированы критерии и предложены целевые функции для решения задач параметрического синтеза. Построены математические модели процедуры параметрического синтеза, позволяющие производить экстремальное исследование целевой функции параметрического синтеза в соответствии с выбранными критериями методом многовариантного анализа.

Требования к изделиям машиностроения, указанные в технических заданиях, представляют собой набор значений физических величин, которые должны быть обеспечены при эксплуатации готового узла или изделия. Как

правило, к таким характеристикам чаще всего относятся показатели надежности и работоспособности, такие как прочность, жесткость конструкции, виброустойчивость и пр., а также эксплуатационные свойства и характеристики изделия, набор которых зависит от отраслевой принадлежности конкретного изделия. Следовательно, целью параметрического синтеза является определение таких значений параметров проектируемого изделия, при которых количественные значения названных выше свойств и характеристик могли быть выполнены в течение всего срока службы изделия. При этом определение значений параметров должно осуществляться на этапе разработки трехмерной модели проектируемого изделия. В этом случае процедура параметрического синтеза представляет собой поиск экстремума некоторой целевой функции, в качестве которой принимаются вышеназванные характеристики проектируемого изделия, а в качестве аргументов – параметры его трехмерной модели. Прочие характеристики и свойства проектируемого изделия могут быть приняты в качестве ограничений. Характеристика или свойство изделия, взятое в качестве целевой функции, получило название критериальной характеристики, а параметры трехмерной модели принято называть управляемыми параметрами. Задача параметрического синтеза в общем случае имеет вид

$$F = \begin{cases} \text{extr } F(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ x_n \in D_x \\ \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ \vartheta(x_1, x_2, \dots, x_n) > 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – целевая функция параметрического синтеза, x_1, x_2, \dots, x_n – управляемые параметры, D_x – область допустимых значений управляемых параметров, $\varphi(x_1, x_2, \dots, x_n)$, $\vartheta(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – функции-ограничения. Решением задачи (1) будет совокупность значений управляемых параметров, при которых в области D_x будет достигаться экстремальное или наиболее близкое к экстремальному значение функции $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ при условии выполнения всех ограничений. Характер искомого экстремума будет

зависеть от критериальной функции, а сама задача решается итерационно путем многовариантного анализа трехмерной модели (см. рисунок 1).

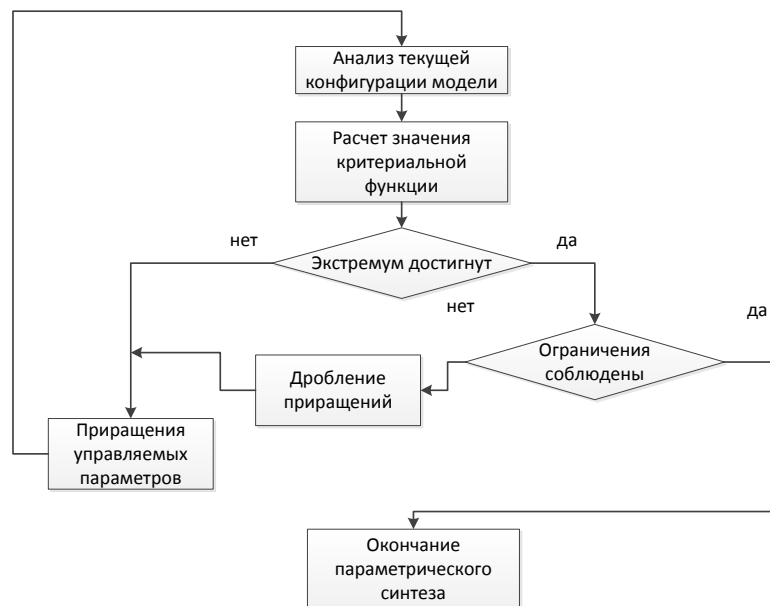


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма процедуры параметрического синтеза

Для проведения исследований критериальной функции прежде всего необходимо выявить взаимосвязь между качественными характеристиками проектируемого изделия и его трехмерной модели, а также определить критерий - характер искомого экстремума. Анализ требований к машиностроительным изделиям в различных отраслях показывает, что одной из наиболее распространенных задач параметрического синтеза является нахождение баланса прочности и легкости конструкции изделия. В этом случае в качестве управляемых параметров принимаются массогабаритные параметры трехмерной модели, а в качестве критериальных функций и функций-ограничений – прочностные и механические характеристики. Примером может служить задача повышения запаса плавучести при проектировании корпуса судна:

$$\left\{ \begin{array}{l} W = \max_{X \in D_X} W(X), \\ V_H = \max_{X \in D_X} V_H(X), \\ \left[\begin{array}{l} m_i = \text{const} \\ m_i = \min_{X \in D_X} m_i(X) \end{array} \right. , \\ \sigma_i(X) \leq \frac{\sigma_{i \text{ нр}}}{s_i} \end{array} \right. , \quad (2)$$

где: $W = \frac{V_H}{V_0} * 100\%$ - запас плавучести судна, V_H — объём подпалубных помещений над ватерлинией, $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ — вектор управляемых параметров, D_X - область допустимых значений управляемых параметров m_i - масса детали, входящей в конструкцию корпуса корабля, $i=1, 2, 3, \dots, k$; $\sigma_i(X)$ - максимальное напряжение в i -й детали конструкции; $\sigma_{i\text{ пр}}$ - предельно допустимое напряжение в i -й детали конструкции; s_i - запас прочности i -й детали конструкции. Максимизация запаса плавучести возможна за счет увеличения объема подпалубных помещений над ватерлинией при уменьшении или сохранении массы конструкции. Очевидно, что при увеличении размеров конструкции будет расти ее масса, и прирост запаса плавучести в этом случае будет незначителен. Таким образом, необходимо изменять конструкцию деталей так, чтобы общий объем судна увеличивался, а масса при этом снижалась или оставалась неизменной. Решением такой задачи будет увеличение корпусных деталей судна в одних направлениях и уменьшение в других, как правило, в поперечных сечениях. В этом случае будет снижаться нагрузочная способность деталей, что может привести к их разрушению или снижению грузоподъемности. Следовательно, в этом случае необходимо введение дополнительных ограничений, связанных с нагрузочной способностью корпусных элементов (или прочностью) и габаритными параметрами. Подобные примеры широко распространены и в других отраслях машиностроения.

Еще один распространенный критерий, оказывающий существенное влияние на качество изделия, - это повышение равнопрочности и достижение равнонагруженного состояния изделия. Равнопрочность достигается путем расчета напряжений в изделии (детали) в нагруженном состоянии и применения соответствующих структурно-параметрических решений в конструкции, представляющих собой изменение геометрии и размеров. Для большинства машиностроительных изделий традиционные способы повышения равнопрочности неприменимы ввиду сложности формы изделия

и большого количества внешних нагрузок. В этом случае повышение равнопрочности осуществляется путем нахождения в теле модели на основании первичного анализа таких участков, где напряжение слишком мало – такой анализ может быть проведен средствами САПР. Далее в данных участках создаются формы, позволяющие повысить равнопрочность модели. В этом случае задача параметрического синтеза сводится к определению численных значений параметров, описывающих геометрию создаваемых форм, а критериальной функцией будет являться относительная разность максимального и минимального напряжений в теле модели:

$$\Delta = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{\sigma_{max}}. \quad (3)$$

Задача параметрического синтеза в этом случае будет ставиться как задача минимизации относительной разности напряжений:

$$\begin{cases} Q(X) = \min_{X \in D_X} \Delta(X) \\ \sigma_{max} \leq \frac{\sigma_{np}}{s} \\ m_i = const \\ \left[\begin{array}{l} m_i = \min_{X \in D_X} m_i(X) \\ x_{i min} \leq x_i \leq x_{i max} \end{array} \right. \end{cases} \quad (4)$$

Для проведения исследования критериальной функции необходимо в аналитическом виде установить зависимость, отражающую выявленные взаимосвязи. При этом достаточно построить математическую модель, указывающую направление из начальной точки в точку экстремума. Следовательно, в этом случае целевая функция примет вид линейной регрессии

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n, \quad (5)$$

где x_i – управляемые параметры, n – количество управляемых параметров, b_i – коэффициенты регрессии, отражающие характер зависимости целевой функции от каждого управляемого параметра и вес каждого параметра. Следовательно, задача формирования модели ставится как определение коэффициентов b_i и построение уравнения регрессии целевой функции. В качестве математического аппарата для расчета значений коэффициентов

регрессии в работе использовались методы теории планирования эксперимента (ТПЭ), поскольку они позволяют осуществлять расчет значений коэффициентов регрессии на основании априорной информации о целевой функции, когда о ее характере ничего не известно за исключением ее откликов на различные комбинации входных параметров. Такой подход позволяет рассматривать трехмерную модель как систему взаимосвязанных компонентов, на входе которой расположены управляемые параметры, а также внешние по отношению к модели факторы, а на выходе – массогабаритные, прочностные и механические характеристики трехмерной модели (рисунок 2).



Рисунок 2 – Трехмерная модель изделия как система

Для решения задачи параметрического синтеза по критерию минимизации массы была построена следующая модель:

$$\begin{cases} m = \min_{X \in D_X} m(X) \\ \sigma_{max} \leq \frac{\sigma_{пр}}{s} \\ x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max} \end{cases} \quad (6)$$

где $m(X)$ – целевая функция массы в виде (5), σ_{max} – максимальное напряжение в теле трехмерной модели, $\sigma_{пр}$ – предельно допустимое напряжение в теле модели, s – запас прочности трехмерной модели.

Целевая функция для параметрического синтеза по критерию повышения равнопрочности задается в виде относительной разностью максимального и минимального напряжений:

$$\Delta(X) = \left[\frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{\sigma_{max}} \right]_i \cdot 100\%, \quad (7)$$

где $\sigma_{max}, \sigma_{min}$ – соответственно максимальное и минимальное напряжения в теле модели, i –номер итерации, соответствующий номеру отдельно взятого опыта. С учетом введения ограничений математическая модель параметрического синтеза по критерию повышения равнопрочности будет выглядеть аналогично (7):

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta = \min_{X \in D_X} \Delta(X) \\ \sigma_{max} \leq \frac{\sigma_{пр}}{s} \\ x_{i min} \leq x_i \leq x_{i max} \end{array} \right. , \quad (8)$$

а сама функция $\Delta(X)$ будет представлять собой линейную регрессию вида (5).

Материалы главы частично опубликованы в работах [1,4,7,8,9].

Глава 3 «Алгоритмы параметрического синтеза трехмерных моделей изделий машиностроения» посвящена разработке алгоритмов параметрического синтеза, реализующих процедуру многовариантного анализа на основании установленных в главе 2 зависимостей и математических моделей. Алгоритмы представляют собой циклический анализ различных вариантов конструкции проектируемого объекта до момента достижения граничных или критериальных условий.

Алгоритм снижения массы трехмерной модели (А1) включает несколько крупных этапов. На первом этапе на основании прочностного анализа в теле трехмерной модели выделяются участки, из которых может быть удален материал без снижения работоспособности и эксплуатационных свойств проектируемого изделия. Прочностной анализ проводится в среде САПР, результатом анализа является карта напряжений в теле модели. Удаление материала возможно в участках с наименьшим напряжением.

Далее определяется геометрическая форма и расположение полостей в найденных участках. Основным критерием для выбора формы будет являться технологичность. Расположение участков удаления материала также определяется технологическими соображениями, а также конструктивными требованиями к проектируемому изделию.

По окончании подготовительных операций может быть сформирован набор входных данных для процедуры параметрического синтеза модели. Исходными данными для алгоритма А1 будут являться:

- начальная конфигурация модели с учетом принятых структурных решений относительно расположения и формы полостей;
- выбранные в качестве управляемых габаритные параметры (размеры) полостей;
- начальные величины управляемых параметров, принятые на этапе структурного синтеза;
- предельные значения (верхние и нижние) управляемых параметров, определяемые исходя из конструктивных требований к изделию;
- параметры внешних и внутренних нагрузок – величина, характер и направление;
- предельные прочностные характеристики модели – величины выбранного предела и необходимого запаса прочности;
- шаг по каждому из управляемых параметров для составления плана эксперимента.

После назначения шагов рассчитываются границы окрестности начальной точки – верхние и нижние уровни факторов (управляемых параметров). Для каждой точки получаются значения целевой функции, на основании которых рассчитываются коэффициенты b_i и строится модель вида (5).

Следующий этап в выполнении алгоритма – движение вдоль регрессии в направлении минимума. Условие выбора направления движения по каждому из параметров определяется из условия убывания функции $m(x_i + h_i) - m(x_i) < 0$.

Выход из алгоритма осуществляется либо при прохождении точки минимума (в этом случае текущее значение целевой функции больше

предыдущего), либо при достижении с заданной точностью значения экстремума:

$$\frac{|m(X_i) - m(X_{i-k})|}{m(X_i)} < \varepsilon, \quad (9)$$

где k – количество итераций для определения точности достижения минимума, ε – требуемый уровень точности достижения экстремума. Далее процедура параметрического синтеза либо продолжается для получения более точного решения, либо принимается решение о ее остановке. В последнем случае последняя допустимая конфигурация модели принимается как конечная.

Основанием для применения алгоритма повышения равнопрочности (A2) является наличие в теле модели очагов концентраций напряжений или значительный разброс величин напряжений в теле модели. Повышение равномерности распределения напряжений может осуществляться путем создания полостей или изменения формы деталей. Наиболее эффективный метод ликвидации очагов концентраций напряжений заключается в создании дополнительных конструктивных элементов (галтелей, ребер жесткости и пр.) в модели.

Описания области допустимых значений, расчет шагов и расчет коэффициентов осуществляется аналогично описанию алгоритма A1. Основным отличием алгоритма A2 является специфика расчета целевой функции: в качестве целевой функции принимается относительная разность максимального и минимального напряжений в теле модели:

$$\Delta(X) = \left[\frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{\sigma_{max}} \right]_i \cdot 100\%.$$

Условие выхода из цикла по достижению экстремума определяется по замедлению убывания целевой функции соотношением

$$\frac{|\Delta(X_i) - \Delta(X_{i-k})|}{\Delta(X_i)} < \varepsilon.$$

Материалы главы частично опубликованы в [1,3-5,7,10].

В главе 4 «Реализация разработанных алгоритмов параметрического синтеза и анализ полученных результатов» представлена реализация алгоритмов A1 и A2 в виде программного приложения, выполняющего процедуры параметрического синтеза внутри среды САПР с применением дополнительных модулей. Интерфейс приложения, реализующего алгоритмы A1 и A2, приведен на рисунке 4.

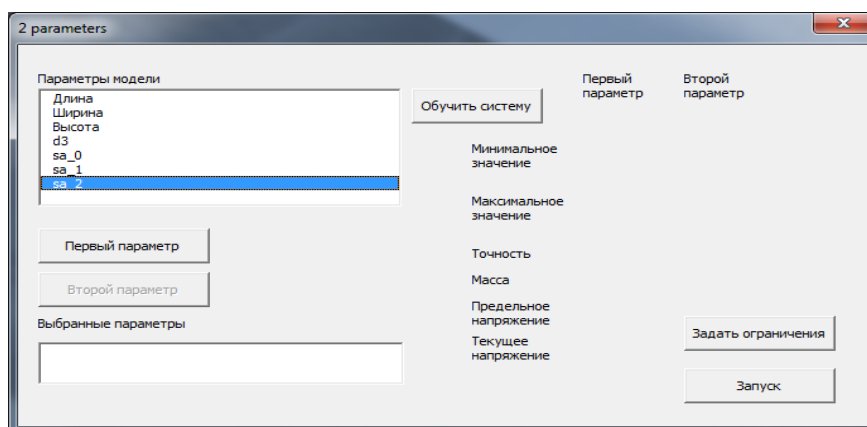
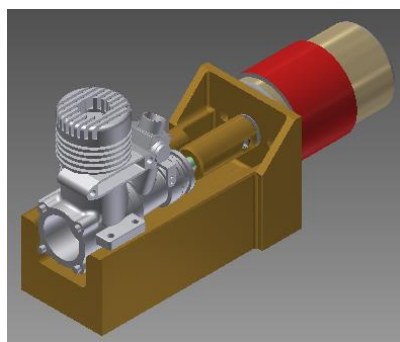


Рисунок 4 – Интерфейс программного приложения, реализующего алгоритмы A1 и A2

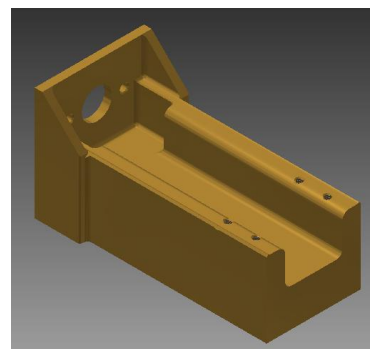
В качестве базовой САПР была выбрана среда проектирования Autodesk Inventor Professional 2014. В нем реализована технология твердотельного моделирования и присутствует модуль прочностного анализа, позволяющий строить карту напряжений. Доступ к параметрам модели и инструментам среды осуществляется через интерфейс прикладного программирования (API). Ряд функций приложения реализовано на языке Python.

В качестве примера объекта параметрического синтеза была принята модель моторамы генераторной установки мехатронной платформы малого класса (МРТП) (рисунок 4).

В результате запуска алгоритмов была получена измененная конфигурация трехмерной модели моторамы, значительно отличающаяся от исходной и при этом отвечающая всем конструктивным требованиям технического задания. Итоговая конструкция трехмерной модели моторамы приведена на рисунке 5, количественные значения параметров и характеристик модели представлены в таблице 1.

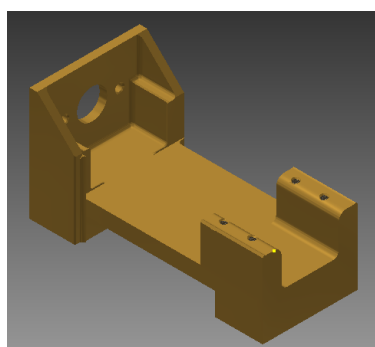


а)

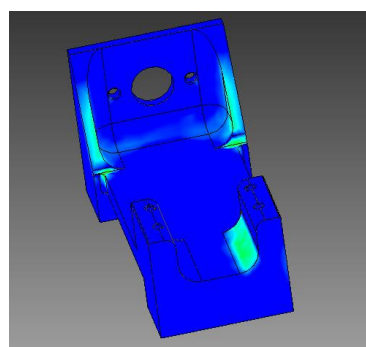


б)

Рисунок 4 – Генераторная установка МРТП: а) модель установки в сборе; б) исходная модель моторамы.



а)



б)

Рисунок 5 – Модель моторамы МРТП: а) после выполнения алгоритма А1; б) после выполнения алгоритма А2

Таблица 1 – Результаты параметрического синтеза модели моторамы

Параметр	Начальное значение	Итоговое значение	Относительное изменение
Масса М, кг	1,47	0,914	Уменьшение на 37,8%
Максимальное напряжение σ_{max} , МПа	396	245	Уменьшилось на 38%
Минимальное напряжение σ_{min} , МПа	15	58	Увеличилось на 80%
Относительная разность напряжений Δ	0,96	0,76	Уменьшение на 20%

Материалы главы частично опубликованы в [1,2,7,8,9,10].

В **заключении** диссертации приведены основные результаты и выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ наиболее распространенных в машиностроении методов параметрического синтеза. Выявлены недостатки, ограничивающие область их применения.
2. Рассмотрены и выявлены взаимосвязи между показателями качества проектируемых изделий и их механическими, прочностными и массогабаритными характеристиками их трехмерных моделей.
3. На основании выявленных взаимосвязей установлены зависимости механических, прочностных и массогабаритных характеристик трехмерных моделей от их конструктивных параметров. Показана возможность применения методики планирования эксперимента при построении целевой функции параметрического синтеза.
4. Разработаны алгоритмы параметрического синтеза, реализующие исследование полученных целевых функций на экстремум методом многовариантного анализа:
 - алгоритм снижения массы трехмерной модели, отличающийся нахождением в теле трехмерной модели участков, из которых может быть удален материал без потери прочностных и механических характеристик;
 - алгоритм повышения равнопрочности трехмерной модели, отличающийся совместным использованием данных о конструктивных параметрах и прочностных характеристиках трехмерной модели и позволяющий устранить в ней очаги напряжений.
5. Выполнена программная реализация разработанных алгоритмов для их исследования, отладки и практического применения. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
6. Работа алгоритмов протестирована на примере модели реального изделия – моторамы генератора мехатронной платформы. Подтверждена работоспособность и результативность разработанных алгоритмов.

7. . Результаты работы внедрены в практическую деятельность ООО «Дельта Трафо», а также в учебный процесс при подготовке бакалавров и магистрантов по направлениям «Автоматизация технологических процессов и производств (в машиностроении)», «Мехатроника и робототехника» НГТУ им. Р.Е.Алексеева
8. Разработанные алгоритмы могут применяться для широкого круга задач при проектировании изделий машиностроения, в частности, при проектировании конструкций БПЛА, навесного оборудования транспортных систем, плавательных средств и широкого ряда номенклатурных изделий, для которых не существует формализованных задач и алгоритмов параметрического синтеза. Разработанные алгоритмы инвариантны к объекту проектирования. Кроме того, использование интерфейсов прикладного программирования API расширяет возможности переналадки разработанного программного приложения под различные программные среды, оснащенные API.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ:

1. Туманов, А.А. Интеграция программных продуктов для решения задач оптимизации при конструкторском проектировании. / Туманов А.А. // Фундаментальные исследования. 2015. № 8-3. С. 527-531.
2. Туманов, А.А. Система автоматизированной оптимизации структурно-параметрических моделей на основе интеграции среды проектирования Autodesk Inventor и языка программирования Python / Кретицин О.В., Сизов А.Ю., Туманов А.А., Федосова Л.О. // Фундаментальные исследования. 2015. № 9-2. С. 257-260.
3. Туманов, А.А. Робототехническое устройство для предварительного диагностирования протяженных замкнутых объектов – газопроводов

малых диаметров. / Кретинин О.В., Сизов А.Ю., Туманов А.А., Федосова Л.О. // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 373.

4. Туманов А.А. Применение методики многовариантного анализа в процессе параметрического синтеза моторамы генератора мехатронной платформы./ В.В.Дмитриев, А.Ю.Сизов, А.А.Туманов.// Сборник трудов III научно-технической конференции «Радиолокация. Теория и практика», 2018 г.

Публикации в прочих изданиях, материалы конференций

5. Туманов, А.А. Разработка конструкции робототехнического комплекса для диагностирования протяженных замкнутых объектов (ПЗО) малых диаметров в среде Autodesk Inventor с использованием системы автоматизированной оптимизации / Кретинин О.В., Сизов А.Ю., Туманов А.А., Федосова Л.О. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. № S5. С. 282-285.
6. Туманов, А.А. Система автоматизированной оптимизации структурно-параметрических моделей по техникоэкономическим критериям в виртуальной среде / Кретинин О.В., Сизов А.Ю., Туманов А.А., Федосова Л.О. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. № S5. С. 271-275.
7. Туманов, А.А. Автоматизированная оптимизация проектных решений на основе интеграции разнородных программных продуктов с САПР. / Кретинин О.В., Сизов А.Ю., Туманов А.А. // ГРАФИКОН'2016 Труды 26-й Международной научной конференции, 2016. С. 549-552.
8. Туманов А.А. Организация автоматического перебора параметров конструкции рам в среде Autodesk Inventor iLogic для оптимизации моделей по технико-экономическому критерию./ Кретинин О.В., Сизов А.Ю., Туманов А.А., Федосова Л.О.// Архив IX конференции «AutoDesk University Russia», 2014 г.// электронный ресурс: [\[https://www.youtube.com/watch?v=wQP8T6uDg-4&index=169&list=PLO7KUCpJ1y1dSU7J_u4DwSDReR2PHBd5b\]](https://www.youtube.com/watch?v=wQP8T6uDg-4&index=169&list=PLO7KUCpJ1y1dSU7J_u4DwSDReR2PHBd5b)

9. Туманов А.А. Моделирование бесконфликтной траектории промышленного робота в среде Autodesk Inventor./ Кретинин О.В., Зорин И.В., Туманов А.А.// Архив IX конференции «AutoDesk University Russia», 2014 г. // электронный ресурс: [https://www.youtube.com/watch?v=wQP8T6uDg-4&index=169&list=PLO7KUCpJ1y1dSU7J_u4DwSDR].

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

10. Свидетельство РФ на программу для ЭВМ «Программа автоматизированной оптимизации трехмерных твердотельных моделей по массогабаритным характеристикам в среде САПР «Autodesk Inventor» / Туманов А.А., Сизов А.Ю. // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2017616415. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности РФ (Роспатент) 6 июня 2017 г.

В работах, опубликованных в соавторстве, лично соискателю принадлежат:

- в [1,6,8,9] – анализ необходимости и постановка задачи разработки алгоритмов параметрического синтеза по массогабаритным характеристикам;
- в [1,2] – разработка структуры интегрированной системы, реализующей алгоритмы;
- в [3,4,5,8,9,10] – описание зависимостей и приложения разработанных алгоритмов в задачах проектирования изделий машиностроения.

Подписано в печать __. __. 2018. Формат 60x841

/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Усл.-изд. л. 2,0. Тираж 100 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Типография НГТУ. 603950, ГСП, Нижний Новгород, ул. Минина, 24

