

**БОЛОТОВ Михаил Александрович**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СОЗДАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ГТД  
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
ИХ ПРОИЗВОДСТВА**

05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки  
летательных аппаратов

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Самара – 2022 г.

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» на кафедре технологий производства двигателей.

Научный консультант:

Хаймович Александр Исаакович, доктор технических наук, доцент.

Официальные оппоненты:

Захаров Олег Владимирович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», профессор кафедры «Технология машиностроения»;

Леонтьев Михаил Константинович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)", профессор кафедры 203 «Конструкция и проектирование двигателей»;

Нихамкин Михаил Шмерович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», профессор кафедры «Авиационные двигатели».

Ведущая организация: открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт двигателей», г. Москва.

Защита состоится 15 сентября 2022 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.08, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и на сайте: [https://ssau.ru/resources/dis\\_protection/bolotov](https://ssau.ru/resources/dis_protection/bolotov).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 212.215.08

А. С. Виноградов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования.**

Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации» предусматривает как повышение конкурентоспособности отечественной продукции, так и создаваемых технологий на основе цифровизации жизненного цикла изделий. Наукоёмкое производство немыслимо без повышения производительности труда, снижения затрат на разработку и производство продукции, что предусматривает не только «технологическое обновление промышленности», но также разработку методов и средств измерений, «создание эталонов нового поколения» (гос. программа РФ "Развитие промышленности и повышение её конкурентоспособности"), включаемых в технологическую цепочку создания продукции.

Решение задачи повышения эксплуатационных характеристик ГТД включает целый комплекс мероприятий, два из которых рассматриваются в данной диссертационной работе. Первое из них связано с прогнозированием и обеспечением геометрической точности сборочных параметров узлов. Второе направление сопряжено с балансировкой деталей и узлов ГТД. Многие из роторов существующих и перспективных ГТД являются гибкими, что приводит к усложнению технологии их изготовления, сборки и балансировки. В этой связи перспективным направлением совершенствования технологий производства ГТД является разработка «цифровых двойников» технологических операций, которые могут быть использованы для определения оптимальных условий их выполнения при учёте реальной геометрии заготовок, деталей и узлов.

Повышение производительности и точности технологических процессов изготовления деталей ГТД и технологической оснастки может быть достигнуто за счёт управления параметрами размерной обработки заготовок с использованием цифровых моделей процессов. Корректировка размерных параметров основных операций обработки заготовок позволит уменьшить погрешности формообразования, что создаёт возможности для снижения величины припуска на последующих операциях. Перераспределение припуска между этапами обработки заготовок в пользу более производительных этапов повысит общую производительность изготовления деталей.

Повысить качество технологических процессов сборки и балансировки роторов ГТД можно за счёт использования цифровых моделей для определения оптимальных вариантов комплектования и взаимного положения деталей. Трудоёмкость сборки узлов может быть снижена вследствие уменьшения или исключения «предварительных сборок», предусмотренных в технологическом процессе. В цифровом производстве повышение геометрической точности узлов можно обеспечить за счёт сборки с оптимизированным вариантом взаимного положения комплектующих деталей, определённого компьютерным анализом возможных вариантов их ориентации в узле. Значимой проблемой изготовления ГТД является повышенная вибрация при стендовых испытаниях. Для выявления повышенного уровня вибраций и подготовке предложений по их снижению на этапах комплектования и сборки узлов могут быть использованы цифровые модели основных сборочных единиц ГТД. Эти цифровые модели, прежде всего, должны учитывать информацию о реальной геометрии поверхностей заготовок, деталей и узлов. Формирование цифровых моделей возможно на основе определения необходимого и достаточного объёма данных измерений. В этой связи важную роль играет разработка эталонов, моделей и методов обработки результатов измерений, используемых для определения геометрических параметров объектов, и математического описания их поверхностей. Описание технологических и сборочных размерных связей с

использованием информации о реальной геометрии заготовок, деталей и узлов требует разработки достоверных моделей сопряжений их поверхностей.

Таким образом, существенное повышение технических показателей производства ГТД возможно за счёт разработки и использования комплекса цифровых моделей процессов и операций, учитывающих реальную геометрию деталей и узлов. В связи с этим тема диссертационной работы – «Разработка методов создания и использования действительных моделей деталей и узлов ГТД для повышения технических показателей их производства» – является актуальной для современного авиадвигателестроения.

**Степень разработанности темы.** Проблемами обеспечения геометрической точности и повышения производительности изготовления узлов ГТД занимались видные отечественные учёные: Б.С. Балакшин, Н.А. Бородачев, Б.М. Базров, А.А. Гусев, А.М. Дальский, А.С. Шевелев, И.А. Иващенко, В.А. Захаров, Ф.И. Демин, Н.М. Капустин, И.М. Колесов, В.С. Корсаков, В.В. Косилов, А.А. Маталин, В.Г. Митрофанов, М.П. Новиков, В.В. Павлов, А.В. Подзей, А.Ф. Прохоров, А.П. Соколовский, Ю.С. Елисеев, Н.Д. Проничев, В.Ф. Безъязычный, А.Н. Лунев, В.В. Непомилуев, А.А. Коряжкин, Л.А. Кашуба, и другие учёные. Анализ публикаций, посвящённых данному вопросу, позволил сделать следующие заключения: 1) разработка технологических процессов производства ГТД выполняется без учёта в них реальной геометрии деталей и контактного взаимодействия их поверхностей в собранном узле; 2) технологические процессы сборки роторов ГТД разрабатываются без учёта достаточно подробного анализа взаимного влияния положения каждой деталей на уровень неуравновешенностей ротора.

**Цель работы.** Повышение технических показателей производства ГТД за счёт обеспечения требований к точности сборки и снижению неуравновешенностей роторов, повышения производительности путем разработки методов создания и использования в технологических процессах действительных моделей деталей<sup>1</sup>, учитывающих результаты измерения их геометрии, рассчитанные контактные деформации при сборке, а также динамические параметры сборочных единиц в составе роторов.

**Задачи исследования:**

1. Разработка состава, информационного содержания и основных принципов создания действительных моделей<sup>1</sup> деталей и узлов для совершенствования технологий производства ГТД по управляемости выполнением сборочных операций, точности и производительности.

2. Разработка обобщённой методики создания действительных моделей деталей и узлов ГТД по результатам их измерений.

3. Разработка метода определения действительных размеров деталей и сборочных параметров натуральных узлов с учётом сопряжения и взаимодействия их поверхностей, посредством новых технологий, основанных на использовании виртуальных мер (ВМ) и комплексных виртуальныхборок (КВС).

4. Повышение точности расчётов сборочных параметров узлов ГТД на основе анализа и синтеза их размерных связей с использованием действительных моделей деталей, учитывающих контактные взаимодействия деталей и их деформации при сборке.

---

<sup>1</sup> Действительная модель – введённый термин, обозначающий цифровую модель сборочных единиц и/или производственных процессов технических объектов, содержащую совокупность действительных размеров, технических требований, физико-механических свойств, функциональных и иных условий работы, обладающую свойствами необходимости и достаточности её информационного содержания для решения конструкторских, технологических и иных задач.

5. Повышение точности взаимного расположения деталей и площади контакта их поверхностей за счёт автоматизации операции их пригонки с использованием действительных моделей деталей.

6. Разработка метода снижения неуравновешенностей роторов ГТД с помощью балансировки на цифровом двойнике, применяемом для определения оптимального взаимного расположения деталей и сборочных единиц в окружном направлении. Оптимальное расположение деталей и сборочных единиц в окружном направлении определяется, исходя из обеспечения противонаправленности возбуждающих воздействий, возникающих от их неуравновешенностей.

7. Разработка и верификация модели определения рациональных условий сборки роторов ГТД для снижения трудоёмкости и повышения точности сборочных операций.

#### **Научная новизна работы:**

1. Предложены основные принципы создания и применения проблемно-ориентированных действительных моделей деталей и узлов для цифровизации технологий производства ГТД, отличающиеся от существующих цифровых моделей сборочных единиц обозначенными требованиями к необходимости и достаточности их информационного содержания, а также учётом особенностей формируемых размерных связей для повышения управляемости выполнения сборочных операций, точности и производительности технологических процессов.

2. Предложен метод определения действительных размеров деталей и сборочных параметров узлов с помощью новых технологий ВМ и КВС, отличающийся от существующих методов анализом возможных сопряжений контактных поверхностей измеряемых объектов, которые определяют особенности формируемых размерных связей с учетом деформаций деталей в ходе их контактного взаимодействия при сборке.

3. Разработаны метод и комплекс специальных моделей оценки параметров сопряжений деталей и узлов, в частности прогнозирования их деформаций и смещений при сборке, которые применяются для выполнения расчётов размерных связей, отличающиеся использованием действительных моделей геометрических объектов и учётом условий выполнения технологических операций.

4. Разработан метод повышения точности сборки узлов за счёт автоматизации операции пригонки деталей с использованием их действительных моделей, отличающийся от существующих методов повышением площади контакта сопрягаемых поверхностей деталей и обеспечением точности их взаимного расположения.

5. Разработан метод снижения уровня неуравновешенностей роторов ГТД с помощью балансировки на цифровом двойнике, отличающийся от существующих методов обеспечением противонаправленности возбуждающих воздействий неуравновешенностей деталей и сборочных единиц при расчете их оптимальной окружной ориентации.

6. Разработаны алгоритм и оптимизационная модель определения рациональных условий сборки роторов ГТД с целью повышения её точности и снижения трудоёмкости, отличающиеся от существующих моделей возможностью комплексного учёта требований к точности сборочных параметров и дисбалансу или уровню вибрации узлов.

**Теоретическая значимость работы.** Теоретическая значимость работы заключается в предложенных принципах определения информационного содержания, создания и применения проблемно-ориентированных действительных моделей деталей и сборочных единиц ГТД с целью повышения управляемости выполнением сборочных операций, точности и производительности технологических процессов сборки, а также улучшения технических параметров изделий. Формирование действительных моделей деталей и узлов выполняется на основе измерений с учётом их информационной достаточности и

необходимости, а также особенностей размерных связей в изделиях, определяемых содержанием технологической операции и/или этапом жизненного цикла изделия. Предложены эффективный метод и комплекс специальных моделей для оценки параметров сопряжений деталей и узлов, в частности прогнозирования параметров взаимодействия контактирующих поверхностей деталей, применяемые для выполнения расчётов их размерных связей. Разработан метод снижения неуравновешенностей роторов ГТД с помощью балансировки на цифровом двойнике, в основе которого заложено обеспечение противонаправленности возбуждающего воздействия от неуравновешенностей деталей и сборочных единиц.

**Практическая значимость работы.** Практическая значимость работы заключается в разработке цифровой технологии на основе программной реализации предложенных методов и моделей, обеспечивающих повышение достоверности размерного анализа, повышение геометрической точности технологических операций в производстве и снижение в конечном итоге уровня вибраций роторов при эксплуатации ГТД.

**Область исследования** соответствует п. 9 – Теоретические основы и технологические процессы изготовления деталей двигателей и агрегатов летательных аппаратов, включая технологическую подготовку производства, в том числе автоматизированные системы проектирования и управления, технологические процессы и специальное оборудование для формообразования и обработки деталей двигателей, их защита **паспорта научной специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.**

#### **Методология и методы исследований.**

Решение поставленных задач осуществлялось теоретическими исследованиями, выполненными на основе методов математического анализа, линейной алгебры, теории вероятностей, математической статистики, аналитической геометрии, вычислительной математики, теории колебаний и конечных элементов с помощью разработанных авторских модулей в программном обеспечении MATLAB, Visual Studio, Python, а также программных комплексов для решения метода конечных элементов: «NX» и «ANSYS». Экспериментальные исследования выполнялись с использованием поверенного измерительного и испытательного оборудования, а также разработанных разгонно-балансирующего стенда и аппаратно-программного комплекса для измерения геометрии лопаток ГТД. Обработка данных исследований производилась с использованием методов статистического анализа.

**Объект исследований.** Технологии сборки роторов газотурбинных двигателей.

**Предмет исследований.** Размерные связи в технологических процессах сборки узлов, координатные измерения, обработка и анализ геометрических данных, неуравновешенность роторов.

#### **На защиту выносятся следующие положения:**

1. Состав, информационное содержание и основные принципы создания и применения проблемно–ориентированных действительных моделей деталей и сборочных единиц для совершенствования технологий производства ГТД по управляемости, точности и производительности.

2. Метод определения действительных размеров деталей и сборочных параметров узлов с помощью новых технологий использования ВМ и КВС, позволяющих учитывать возможные сопряжения контактных поверхностей измеряемых объектов.

3. Эффективный метод и комплекс специальных моделей для оценки параметров сопряжений деталей и узлов при учёте контактного взаимодействия их поверхностей с использованием действительных моделей, применяемых при выполнении расчётов размерных связей.

4. Метод повышения точности сборки узлов за счёт автоматизации операции пригонки деталей с использованием их действительных моделей, позволяющий повысить площадь контакта поверхностей и обеспечить точность взаимного расположения деталей.

5. Метод снижения неуравновешенностей роторов ГТД с помощью балансировки на цифровом двойнике, учитывающий погрешности сборочных параметров и основанный на обеспечении противонаправленности влияния возбуждающего воздействия от неуравновешенностей деталей и сборочных единиц окружной ориентировкой деталей.

6. Каскадная модель определения рациональных условий сборки узлов (рационального углового положения собираемых деталей), в основе которой заложено использование метода машинного обучения для предварительного поиска области решения и уточнение определяемых параметров с применением численных моделей сопряжения деталей.

7. Алгоритм и оптимизационная модель определения рациональных условий сборки роторов ГТД для повышения точности и снижения трудоёмкости их сборки, предусматривающие комплексный учёт требований к точности сборочных параметров, дисбалансу и динамике узлов.

**Достоверность полученных результатов** обосновывается путём корректно поставленных задач исследования и научной цели, правильностью использования математического аппарата, теоретических методов и зависимостей, принятых допущений и ограничений, использованием в процессе исследований поверенного метрологического и испытательного оборудования и сертифицированного программного обеспечения, сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

**Апробация результатов исследования.** Основные положения работы докладывались на всероссийских и международных конференциях: международной научной конференции «40–е Гагаринские чтения», г. Москва, Московский авиационный институт, 7–11 апреля 2014 г.; международной научно-технической конференции «Перспективные информационные технологии ПИТ-2017», г. Самара, Самарский университет 14–16 марта 2017 г.; международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Высокие технологии в современной науке и технике», г. Томск, Томский политехнический университет, 27–29 ноября 2017 г.; международной научно-технической конференции «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2018), г. Самара, Самарский университет, 24–27 апреля 2018 г.; IV международной научной конференции «Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство», г. Казань, 31 мая, 2019 г.; III международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 15–17 ноября, 2020 г.; VI международной конференции и молодёжной школе «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2020), 26–29 мая, 2020 г. Цикл научных работ по теме «Разработка и внедрение на предприятиях Самарской области методов создания и использования действительных моделей деталей и узлов газотурбинных двигателей для прогнозирования и обеспечения уровня их вибраций» был удостоен губернской премией в области науки и техники за 2020 год.

Получен патент на изобретение «Устройство для автоматизированного контроля соосности и центровки механических конструкций» №2639993 от 25.12.2017 г. Зарегистрированы программы для ЭВМ: «Программный комплекс для моделирования процесса координатных измерений геометрических параметров деталей машиностроения» №2016616259 от 13.04.2016 г.; «Программный модуль для вычисления (определения) дисбаланса роторов на основе их полигональных 3D моделей» №2018661116 от 31.08.2018 г.; «Программный модуль для виртуального уравнивания роторов»

№2018661033 от 31.08.2018 г.; «Программный модуль для цифрового прогнозирования вибрационных параметров роторов» №2019661901 от 11.09.2019 г.; «Программный модуль для расчета параметров сопряжения реальных поверхностей собираемых деталей» №2020618835 от 05.08.2020 г.

#### **Реализация результатов работы.**

Результаты работы были внедрены на предприятиях: ПАО «ОДК-Кузнецов» (акт от 11.11.2021 г.) при выполнении опытного проекта по цифровой сборке турбины и компрессора низкого давления; АО «Металлист-Самара» (акт №6317 от 13.10.2021 г.) при снижении неуравновешенностей ротора НД в ходе его балансировки с использованием действительных моделей узлов; ООО «Газпром трансгаз Самара» (акт от 18.10.2021 г.) при создании 3D моделей и улучшению технологии сборки и ремонта ротора и камеры сгорания ГТД на основе использования результатов измерений.

Разработка теоретических положений, изложенных в диссертационной работе, проводилась по договорам и грантами: «Разработка комплекса технологий ремонта и восстановления функциональных характеристик ответственных деталей газотурбинных двигателей и энергетических установок», 2015 – 2017 г., идентификатор RFMEFI57815X0131, в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» (ответственный исполнитель); «Разработка алгоритма машинного обучения при использовании данных оптических или лазерных сканеров для управления роботизированными системами промышленного и двойного назначения», в рамках Государственного задания, 2018 г., шифр проекта 9.11560.2018/10.11 (руководитель); «Обеспечение качества изделий посредством разработки и использования их цифровых двойников в «Умных» фабриках будущего», в рамках Государственного задания, 2018 – 2019 г., шифр проекта 9.11978.2018/11.12 (руководитель). Созданные методы применяются в учебном процессе Самарского университета.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано более 100 научных работ, в том числе 32 статьи в периодических изданиях, включенных в перечень ВАК России, и 45 статей в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 252 наименований и восьми приложений. Общий объём диссертации составляет 359 страницы, 156 рисунков и 39 таблиц.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** изложена актуальность исследуемой научно-технической проблемы, сформулирована цель диссертационной работы, определены положения, выносимые автором на защиту, перечислены основные положения, характеризующие научную новизну, практическую значимость полученных результатов, содержатся сведения о реализации результатов работы, публикациях, структуре и объёме диссертации.

**В первой главе** приведен статистический анализ причин повышенной вибрации изделий. Основными причинами съема изделий с кратковременных испытаний являются: несоответствие размеров посадочных диаметров деталей, вызывающие нарушение требований к посадкам деталей в узлах; повышенный остаточный дисбаланс и биения узлов; неблагоприятные сочетания геометрических параметров и остаточных дисбалансов деталей и узлов; не соблюдения технических условий (ТУ) при сборке; прочие причины. Наиболее существенные проблемы наблюдаются в каскадах низкого и высокого давлений изделий. Вибрация изделий может быть существенно снижена за счёт повышения геометрической точности и снижения неуравновешенностей составляющих узлов и деталей компрессоров и турбин.



Проведён анализ современного состояния исследований по обеспечению технических показателей производства ГТД, включающих: теоретические основы взаимосвязей параметров деталей и узлов с техническими параметрами изделий; теоретические основы решения задач точности размерных связей; метрологические основы обеспечения точности измерений. При переходе к цифровому производству характеристики качества изделий, подтверждаются на основе измерений. Особую роль в обеспечении качества, надёжности изделий играет геометрическая точность. Использование цифровых технологий в производстве сборочных единиц ГТД позволяет снизить: 1) трудоёмкость и погрешности сборки узлов за счёт управления суммированием систематических погрешностей геометрических параметров комплекта деталей; 2) уровень дисбалансов роторов в процессе их сборки при учёте фактического распределения дисбалансов деталей и узлов и др.

Теоретические основы функциональных связей параметров с эксплуатационными показателями рассматривались в работах А.И. Якушева, И.В. Ляндона, И.Г. Фридлиндера и др. Среди зарубежных исследователей можно отметить A. Zia, M. Mazur, H. Sasahara, T. Kandikjan и др. Установление взаимосвязей параметров точности изготовления и технических (функциональных) показателей изделий является сложной междисциплинарной задачей. Такие задачи находятся на стыке конструкторской и технологической сфер деятельности, и зачастую требуют описания функционирования изделий в рабочих условиях. Среди множества показателей качества особую роль в их обеспечении играет геометрическая точность.

Развитием теоретических основ решения задач точности занимались отечественные исследователи Б.С. Балакшин, Н.А. Бородачев, Н.Г. Бруевич, А.П. Соколовский, А.Н. Гаврилов, В.П. Фираго, В.Н. Кован, В.С. Корсаков, Д.Н. Решетов, И.А. Иващенко, А.С. Шевелев, И.С. Солонин, П.Ф. Дунаев, И.Г. Фридлиндер, Б.М. Базров, В.П. Булатов, Ф.И. Демин, Л.Н. Прокофьев, Г.П. Федорченко, О.С. Сурков. К числу зарубежных исследователей относятся K.W. Chase, A. Requicha, H. Chen, H. Wang, M. Mazur, A. Zia, A. Ballu, J.J. Shah, J.K. Davidson, A.J. Qureshi. Выполненные исследования сформировали теоретический задел, позволяющий решать задачи анализа размерных связей в технологических процессах изготовления деталей и их сборки.

Вопросам обеспечения точности сборочных размерных связей посвящены работы В.А. Богуслаева, А.Я. Качана, А.И. Долматова, Е.А. Кореневского, В.Ф. Мозгового, Б.Н. Леонова, В.Ю. Ерошкова, В.А. Захарова, В.Ф. Безъязычного, В.В. Непомилуева, М.Е. Ильиной, Е.А. Майоровой, А.Н. Семенова, В.Н. Брюханова, М.Г. Косова, А.А. Гарькавого, А.М. Каца, М.М. Иванова, Г.С. Коняфиева, А.А. Федорова, Е.В. Кожевникова, Е.В. Кононова, В.П. Тимофеева, И.Ф. Кравченко, Э.В. Кондратюка, Г.Б. Филимонихина, Г.И. Пейчева и других учёных. Среди зарубежных исследователей можно отметить J.J. Shah, A.J. Qureshi, H. Wang, B. Schleich, S. Wartzack и др.

Перспективным направлением совершенствования сборочных процессов является использование технологии виртуальной сборки (В.В. Непомилуев). Прогнозирование сборочных параметров на основе цифровых результатов измерений деталей позволит определять приемлемый или оптимальный варианты сборки, характеризующиеся допустимыми значениями сборочных параметров. Задачи прогнозирования состояния собранных узлов требуют учёта: отклонений формы и расположения поверхностей деталей, влияющих в ходе сборки на их напряжённо-деформированное состояние; действия силовых факторов, сопряжений по множеству поверхностей деталей, образующих главную центральную ось ротора, и другие факторы. Анализируя текущее состояние вопроса теории размерных связей, необходимо отметить, что существующие модели не удовлетворяют в полной мере всем

требованиям по точности, производительности вычислений и универсальности, которые к ним предъявляет современное производство. Исходными данными для прогнозирования собранного состояния роторов являются измеренная геометрия присоединительных поверхностей деталей и остаточные дисбалансы. Подходами, описанием и представлением реальных поверхностей деталей и сборочных единиц занимались отечественные и зарубежные учёные Л.А. Кашуба, D. Whitehouse, V. Muralikrishnan и др. В разработанных ими подходах в неполной мере проработан вопрос о математическом описании геометрии маложёстких деталей и определении их геометрических параметров.

В метрологических основах обеспечения точности измерений геометрии деталей и узлов наряду с исследованием физических основ получения измеряемых величин особую роль играют методы и модели обработки результатов измерений, а также методики выполнения измерений. Оценка неопределённостей измерений выполняется с использованием подхода «Виртуальная координатно-измерительная машина», который реализуется с использованием метода Монте-Карло и рассматривается в трудах E. Trapet, R.G. Wilhelm, F. Waldele и др. Определение оптимальных условий выполнения измерений, обеспечивающих требуемую точность контроля при минимально возможной трудоёмкости, исследовалось в работах авторов S.M. Obeidat, M. Poniatowska, S.V. Acharya. Совершенствование методов и моделей обработки измеренных координат точек рассматривалось в работах В.А. Гапшиса, В.Г. Лысенко, О.В. Захарова, В.П. Суслина, А.В. Джунковского, В.Д. Вермея, D. Whitehouse и др. Основным методом обработки результатов измерений является метод наименьших квадратов (МНК). Использование метода МНК не может гарантировать выполнение принципа подобия «предельных размеров» Тейлора, являющегося основным принципом в теории взаимозаменяемости. Существующие методы и модели в этой связи в полной мере не удовлетворяют предъявляемым требованиям авиационного двигателестроения.

Резюмируя результаты аналитического обзора, можно отметить, что технические показатели производства ГТД могут быть улучшены за счёт повышения управляемости технологическими процессами изготовления деталей и сборки узлов при учёте их реальной геометрии. Указанное обеспечивается за счёт разработки методов, позволяющих учитывать реальную геометрию деталей и узлов ГТД, предусматривающих решение проблемы обеспечения информационной достаточности представления геометрии в их цифровых моделях. На основании проведённого анализа литературных источников сформулированы задачи диссертационного исследования.

**Вторая глава** посвящена изложению основополагающих сведений о понятии, разработке и использовании действительных моделей для повышения технических показателей производства ГТД. В главе решаются задачи определения оптимального взаимного расположения деталей и условий выполнения технологических операций их изготовления, а также сборки узлов с учётом контактного взаимодействия в условиях эксплуатации в составе изделий. Понятие «действительная модель» связано с метрологическими основами, поскольку модель формируется по результатам измерений. Важными рассматриваемыми геометрическими параметрами объектов авиационных двигателей являются: форма поверхностей; параметры их расположения; вариация формы рассматриваемых поверхностей; случайные и систематические погрешности.

Сформированы принципы разработки и использования действительных моделей объектов: информационной достаточности, информационной необходимости, целеполагания, оперативности управления, необходимого и достаточного количества операций контроля и управления процессами производства ГТД.

Место и роль действительных моделей деталей и узлов при решении технологических задач описываются структурно-функциональной диаграммой взаимосвязи конструкторских и технологических уровней подготовки производства ГТД (рисунок 1). В строках диаграммы представлены уровни функциональных связей. Столбцы диаграммы включают основные параметры и объекты, необходимые для повышения эксплуатационных и технологических характеристик ГТД. Стрелки 1 – 8 обозначают функциональные связи и решаемые задачи. Нечётным номерам соответствуют задачи анализа, чётным – синтеза параметров подсистем разных уровней. Приведены этапы формирования и использования действительных моделей объектов для решения технологических задач.

Методика создания действительных моделей объектов, описывающих их геометрические параметры, приведена на рисунке 2. На первом этапе создания действительных моделей объектов выполняется подготовка измеренного массива координат точек поверхностей. В ходе второго этапа выполняется предварительное математическое базирование с целью определения собственной системы координат измеряемого объекта. На третьем этапе производится математическое описание поверхностей деталей посредством аппроксимации или интерполяции измеренных массивов координат точек поверхностей с использованием сплайнов профилей или поверхностей. Поверхности объектов могут описываться полигональными моделями. Четвёртый этап содержит оценку отклонения формы и расположения поверхностей, в том числе сложнопрофильных, а также уточнение базирования. На пятом этапе производится уточнение базирования и оцененных геометрических параметров, исходя из функционального назначения объекта. Заключительный этап содержит проверку достоверности действительной модели.

Разработан метод получения действительных размеров деталей и сборочных параметров узлов, учитывающий сопряжения их поверхностей с помощью технологий использования ВМ и ВКС. Использование ВМ предусматривает назначение требований к точности, методам и средствам получения действительных размеров деталей для адекватного представления их геометрии в составе узла путем моделирования функциональных и размерных связей изделий при работе технической системы. ВКС расширяет понятие ВМ применительно к операциям сборки узлов. Геометрические параметры деталей и узлов определяются на основе моделирования сопряжений виртуальных мер с измеренными поверхностями деталей. Предложено использование ВМ в статическом и динамическом вариантах. В статическом варианте виртуальные меры не изменяют свои размеры, и имеют возможность имитирования движения по одной или нескольким степеням свободы. В динамическом варианте ВМ могут изменять свой размер и имитировать движения по одной или нескольким степеням свободы. ВКС предназначены для моделирования соединений измеряемых деталей по сопрягаемым поверхностям. Технологии ВМ и ВКС могут использоваться для разработки новых моделей и алгоритмов обработки результатов измерений. Предложена обобщенная методика анализа отклонений геометрии поверхностей деталей и узлов. Технология ВМ позволяет установить связь между отклонениями формы отдельных деталей с одной стороны и сборочными параметрами с другой.

Уровни	Параметры	Этапы	Связи (задачи)	Функции	Модели
1 уровень Эксплуатационные связи	Показатели качества изделий (ПКИ), Сборочные параметры (СП)	Испытаний	← ↑	– Прогнозирование ПКИ – Определение требований к сборочным параметрам	– Прогнозирование ПКИ – Определения требований к сборочным параметрам
2 уровень Сборочные связи	ГП деталей	Технологической подготовки, сборки	① ↑ ② ↓	– Прогнозирование сборочных параметров – Синтез требований к сборочным параметрам	– Прогнозирование сборочных параметров – Действительные модели сборочных единиц
3 уровень Связи в деталях	Построение ГП и способы обеспечения требований	Техн. подготовки, обраб. заготовок	← ↑	– Размерный анализ в ГП – Размерный синтез в ГП	– Размерных связей – Действительные модели деталей
4 уровень Связи в технологической системе (ТС)	Параметры, связанные с: -установкой -обработкой -базированием		③ ↑ ④ ↓	– Размерный анализ технологических элементов – Размерный синтез технологических элементов – Коррекция 3D моделей деталей – Обработка и анализ измеренных данных	– Размерных связей в технологических системах – Обработки и анализа измеренных данных
5 уровень Структурные связи ТС	Оснастка, оборудование, инструмент, и др. элементы ТС	Технологической подготовки Обработки заготовок Заготовительный (аддитивный)	← ↑	– Обработка и анализ измеренных данных	– Коррекции управляющих программ оборудования с ЦПУ – Процессы обработки – Аддитивных процессов – Действительные модели заготовок
6 уровень Элементов ТС	Установочные и зажимные элементы, обрабатывающий материал, и др. элементы ТС		← ↑	– Анализ влияния первичных факторов – Выбор оптимальной конструкции	– Действительные модели поверхностей деталей – Действительные модели технологической оснастки – Первичных погрешностей
7 уровень Материалов	Свойства материала		⑦ ↑ ⑧ ↓	– Оптимальный выбор условий обработки или вырашивания материалов – Уточнение параметров ГО – Уточнение свойств материалов	– Действительные модели элементов технологической оснастки и технологических систем – Материала

Рисунок 1 – Структурно-функциональная диаграмма взаимосвязи конструкторской и технологических сфер при создании и производстве специальной техники с повышенными эксплуатационными характеристиками в условиях цифрового производства

<p><i>I. Подготовка измеренного массива координат точек</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– предварительная обработка измеренных данных;</li> <li>– фильтрация;</li> <li>– создание полигональной модели.</li> </ul>	<p><i>II. Предварительное математическое базирование</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– аппроксимация измеренных координат точек поверхности заменяющими геометрическими элементами;</li> <li>– трансформация систем координат в соответствии со схемой базирования объекта.</li> </ul>	<p><i>III. Формирование поверхностей деталей</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– описание поверхностей деталей посредством аппроксимации или интерполяции измеренных массивов координат точек поверхностей;</li> <li>– использование различных типов сплайнов.</li> </ul>	<p><i>IV. Оценка отклонения формы и расположения поверхностей, уточнение базирования</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– совмещение сформированных сложнопрофильных поверхностей с номинальными 3D моделями объектов;</li> <li>– оценка отклонения расположения и формы поверхностей;</li> <li>– уточнение базирования посредством совмещения поверхностей.</li> </ul>	<p><i>V. Уточнение базирования и геометрических параметров исходя из функционального назначения объекта</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– анализ конструкции и функций объекта;</li> <li>– формирование имитационной расчётной модели, учитывающей функциональные и размерные связи;</li> <li>– оценка геометрических параметров поверхностей объектов;</li> <li>– уточнение системы координат.</li> </ul>	<p><i>VI. Проверка достоверности созданной действительной модели</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– повторные измерения объекта;</li> <li>– предварительное базирование;</li> <li>– сравнение измеренных массивов координат точек поверхностей со сформированными поверхностями;</li> <li>– экспериментальная проверка формирования функциональных связей.</li> </ul>		
<p><b>Погрешности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– инструментальные;</li> <li>– формирования массивов координат точек;</li> </ul>		<p><b>Погрешности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– описания измеренных массивов координат точек;</li> </ul>		<p><b>Погрешности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– обработка результатов измерений;</li> </ul>		<p><b>Погрешности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– инструментальные;</li> <li>– эксперимента;</li> </ul>	

Рисунок 2 – Блок-схема методики создания действительных моделей деталей и узлов ГТД

Например, при исследовании (рисунок 3) влияния отклонений формы базовых и контрольных поверхностей деталей «Проставка» на её сборочные параметры, оцениваемые методом МНК и с помощью технологии ВМ на выборке 1200 деталей, было установлено, что отклонения формы являются причиной разброса значений сборочных параметров до 50% от полей допусков по среднеквадратичным отклонениям (СКО). Исследования проводились с использованием математического описания поверхностей деталей и сборочных единиц, учитывающих отклонения формы и расположения их поверхностей.

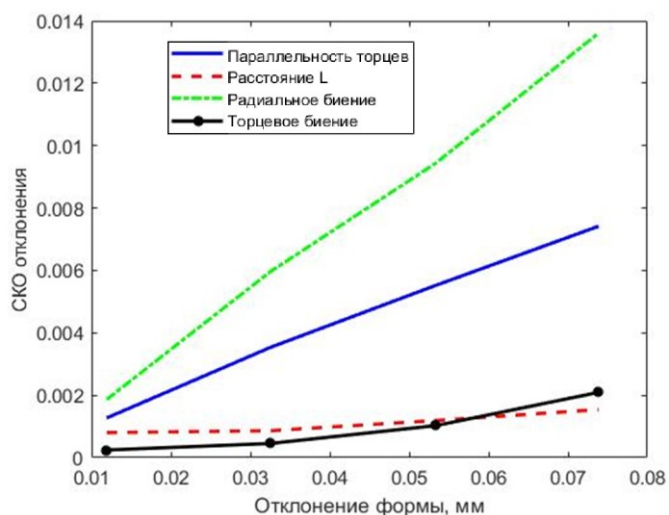


Рисунок 3 – Оценки расхождения измеряемых параметров детали «Проставка»

Описаны разработанные программные средства для автоматизации создания действительных моделей деталей и технологических объектов.

В третьей главе изложены теоретические положения прогнозирования и обеспечения геометрической точности размерных связей при использовании действительных моделей объектов. Предложен метод оценки точности размерных связей, основанный на моделировании сопряжений поверхностей объектов на основе действительных моделей. Метод включает: разработку расчётной схемы технологических или сборочных размерных связей, назначение требований к информативности действительных моделей объектов моделирования, определение условий формирования размерных связей, моделирование сопряжений поверхностей объектов, обработку и анализ полученной информации. Производственные погрешности могут быть представлены в виде вариации формы и размеров поверхностей действительных моделей объектов. На рисунке 4, а приведен пример сопряжения двух деталей на основе моделирования производственных погрешностей с использованием действительных моделей.

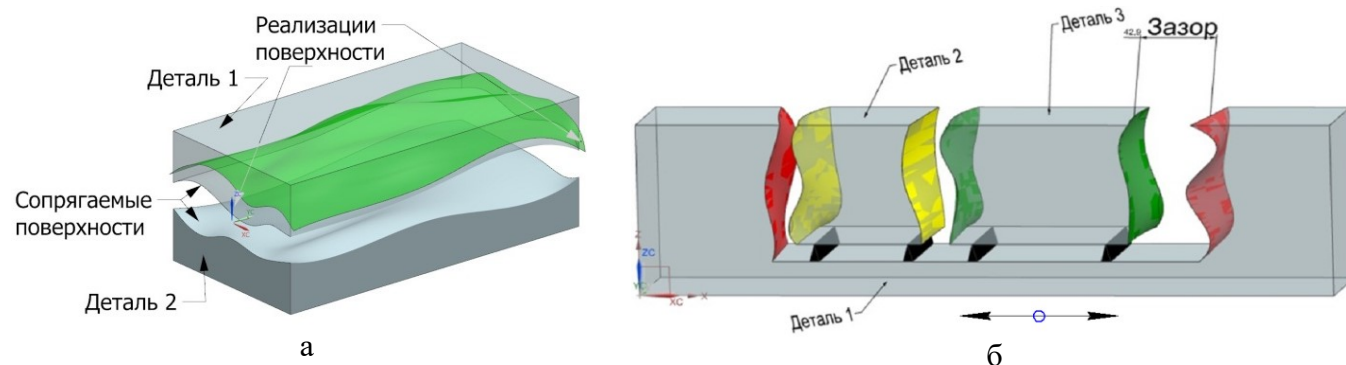


Рисунок 4 – Иллюстрация метода оценки точности размерных связей на примере сопряжения двух деталей (а) и формирования зазора в соединении трёх деталей (цветом обозначены варианты реализации поверхностей) (б)

Пример расчетной схемы формирования зазора представлен на рисунке 4, б. В схему входят действительные модели деталей 1...3 как составные звенья размерных связей и оператор расчета зазора в условиях сборки, определенный как замыкающее звено.

Для оценки геометрических параметров сопряжений поверхностей деталей в зависимости от поставленной задачи используются специальные модели. Задача

оптимизации сборки деталей поясняется рисунком 5. Сборка деталей  $S$ , определенная в системе координат (СК)  $O$  с базисом  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  и началом СК  $P_0$ , включает множество деталей

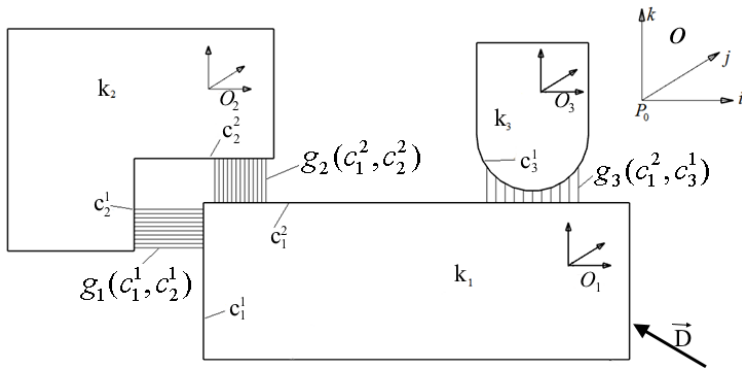


Рисунок 5 – Формализованное описание сборки

$K = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$  (1). Для каждой из деталей задана локальная СК  $O_i$  с базисом  $\vec{i}_i, \vec{j}_i, \vec{k}_i$  и началом СК  $P_{0i}$ . Каждая деталь  $k_i$  включает множество поверхностей  $B_i = \{b_i^1, b_i^2, \dots, b_i^{m_i}\}$  (2). Кроме того, на множестве  $K$  определено множество состояний  $\Omega$  сборки  $S$ , элементы которого содержат вектор параметров положения локальных СК

$$O_i \text{ относительно глобальной СК } O: \Omega = \left( \omega: \omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n), \omega_i = (dx_i, dy_i, dz_i, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i) \right), \quad (3)$$

где  $dx_i, dy_i, dz_i$  – смещение  $P_{0i}$  относительно  $P_0$ ;  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  – углы разворота базисных векторов  $\vec{i}_i, \vec{j}_i, \vec{k}_i$  относительно  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ . Последовательность переходов сборки может быть определена в виде дискретных состояний системы:  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ , (4). Промежуточным или финальным состояниям системы сопоставляются множество характеристик качества (целевых показателей)  $F$  сборки:

$$F = \left\{ \{f_i\}, \{f_j^r \rightarrow f_j, f_j^r > f_j\}, \{f_k^r \rightarrow f_k, f_k^r < f_k\}, \dots \right\}, \quad (5) \text{ где } f_m - \text{целевые показатели, численные величины которых могут быть заданы в технических требованиях к узлу или изделию или предписаны другим образом; } f_m^r - \text{расчётная (достигнутая) характеристика качества.}$$

Состояния системы должны удовлетворять совокупности ограничений по параметрам состояний:  $\Omega_b = \left\{ \left\{ \omega_i^0 \leq \omega_i \leq \omega_i^1 \right\}, \omega_m \in \left\{ \omega_m^0, \omega_m^1, \dots, \omega_m^N \right\} \right\}$ , (6) где  $\omega_i$  – вектор параметров  $i$ -го рассматриваемого состояния системы;  $\omega_i^0, \omega_i^1$  – нижнее и верхнее допустимые значения вектора параметров  $i$ -го состояния системы соответственно, определяемые конструкцией сборочной единицы или условиями сборки;  $\left\{ \omega_m^0, \omega_m^1, \dots, \omega_m^N \right\}$  – множество допустимых значений состояний системы.

Схемы контактирующих пар деталей представлены в виде упорядоченного множества сопряжений контактирующих поверхностей  $c_i$  при сборке:  $C = \left\{ \{c_i, c_k\}_n, \{c_i, c_k, c_{k+1}\}_{n+1}, \dots \right\}; C \subset B$ , (7) где  $\{c_i, c_k\}_n$  – подмножество контактирующих поверхностей  $c_i, c_k$  на  $n$ -ом этапе сборки узла, сборочной единицы или изделия. Каждому подмножеству контактных поверхностей соответствует группа состояний  $M_{\omega} = \{m_j\} = \Omega_b \cdot C^T$  (8). Введено понятие функционала качества  $P$ , заданного на множестве возможных комбинаций вариантов сборки  $M_{\omega}: P(m_j) = \{f_i^r\}$  (9).

Результатом применения  $P$  является расчёт одной или нескольких характеристик качества. Достижение целевых характеристик качества  $f_i$  определяется как:  $f_i^r \rightarrow f_i$ , (10) где  $f_i^r$  – целевые характеристики качества.

Оценка геометрических параметров сопряжений поверхностей абсолютно жёстких деталей производится по двум моделям. Первая модель основана на методе наилучшего совмещения поверхностей при ограничениях на их пересечение. Задача наилучшего совмещения поверхностей формулируется как задача минимизации функции:

$$f(R, t) = \frac{1}{n_p} \sum_{ip=1}^N w m_i \left\| R \cdot \bar{p}_{нов2\_ip} + \bar{T} - \bar{p}_{нов1\_ip} \right\|^2 \rightarrow \min, \quad (11) \text{ где } n_p - \text{количество точек совмещения;}$$

$\bar{P}_{нов1\_ip}$  – вектор координат точки поверхности первого сопрягаемого объекта;  $R, \bar{T}$  – матрица поворота и вектор перемещения соответственно;  $\bar{P}_{нов2\_ip}$  – вектор координат точки поверхности второго сопрягаемого объекта, соответствующий  $\bar{P}_{нов1\_ip}$ ;  $wt$  – матрица весов. Для решения (11) применяются методы нелинейной оптимизации. Система ограничений заключается в исключении пересечений поверхностей:

$$\begin{cases} (\bar{P}_{нов2\_1} - \bar{P}_{нов1\_1})^T \cdot \bar{n}_1 \geq 0, \\ \dots \\ (\bar{P}_{нов2\_i} - \bar{P}_{нов1\_i})^T \cdot \bar{n}_i \geq 0; \end{cases} \quad (12) \quad \text{где } \bar{n}_i \text{ – вектор нормали } i \text{-й точки сопрягаемой первой} \\ \text{поверхности. Расстояния между соответствующими} \\ \text{точками поверхностей объектов } \bar{P}_{нов1\_ip} \text{ и } \bar{P}_{нов2\_ip}$$

формируют зазоры  $g$  между ними. Решение, определяемое параметрами  $R$  и  $T$ , зависит от  $wt$  и последовательности выполнения совмещения поверхностей. Последовательность совмещения поверхностей задаётся, исходя из анализа сопряжений деталей и соответствия результата экспериментальным данным. Оптимальному состоянию сборки  $\omega_{opt}$  соответствует минимальные значения зазоров между сопрягаемыми поверхностями, которые определены в соответствии с величинами весовых коэффициентов.

Вторая модель сопряжения поверхностей деталей базируется на численном методе множества сечений. Её целесообразно использовать для моделирования сопряжений деталей, имеющих поверхности с градиентом координат в направлении последовательности переходов сборки. Модель решает задачи: 1) определения допустимости состояния сборки деталей; 2) оценки состояния системы; 3) определения оптимального расположения деталей при их сборке. Схема моделирования по 2-му алгоритму приведена на рисунке 6. Определение допустимости состояния  $\Omega$  выполняется

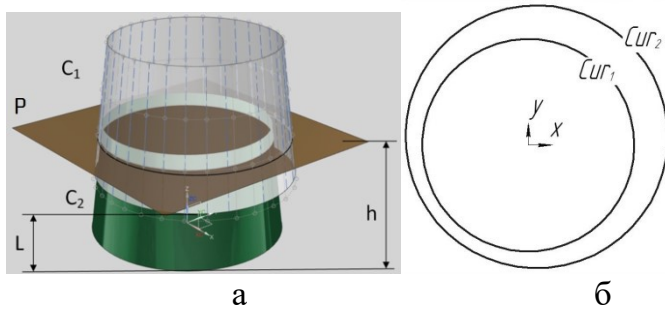


Рисунок 6 – Схема сопрягаемых поверхностей (а) и их сечения (б)

с помощью кривых  $Cur_1$  и  $Cur_2$ , являющихся пересечением поверхностей  $C_1$  и  $C_2$  с плоскостью  $P$ . Для допустимого состояния кривые  $Cur_1$  и  $Cur_2$  не должны пересекаться. Утверждение справедливо для любой плоскости  $P$ , пересекающей поверхности  $C_1$  и  $C_2$  и удовлетворяющей условию:  $h \in [L; \min(H_1, L + H_2)]$ , где  $L$  – расстояние между границами

поверхностей,  $h$  – расстояние от  $P$  до границы,  $H_1$  и  $H_2$  – высота поверхностей  $C_1$  и  $C_2$ . Нахождение оптимального состояния узла при его сборке выполняется в два этапа: поиск максимального перекрытия  $L$  и определение положения, при котором достигается минимальное значение функции зазора между кривыми  $Cur_1$  и  $Cur_2$ . Параметрическая модель рассматриваемой поверхности представлена в виде:

$$\begin{cases} \Delta F = \Delta F(u, v) \\ x(u, v) = (Nx(u, v) + \Delta F(u, v)) \cdot \cos(v) \\ y(u, v) = (Ny(u, v) + \Delta F(u, v)) \cdot \sin(v) \\ z(u, v) = u \end{cases} \quad (13) \quad \text{где } \Delta F \text{ – функция отклонения формы поверхности} \\ \text{от её номинального значения; } x(u, v), y(u, v), z(u, v) \text{ –} \\ \text{координаты точки поверхности; } Nx(u, v), Ny(u, v) \text{ –} \\ \text{функции, описывающие номинальную форму}$$

профиля поверхности;  $u, v$  – параметры поверхности. Для конусной поверхности

$$Nx(u, v) = Ny(u, v) = \frac{R_2 - R_1}{H} \cdot \left( \frac{R_1 \cdot H}{R_2 - R_1} + H - u \right), \quad (14), \quad \text{где } R_1, R_2, H \text{ – радиусы конусной}$$

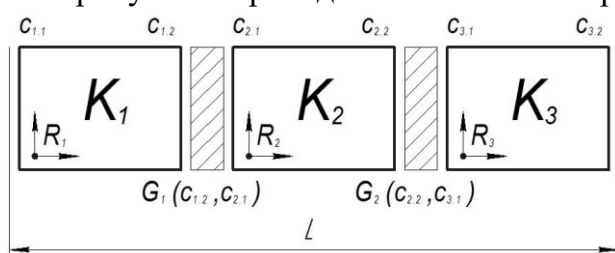


поверхности и её высота соответственно. Поиск величины максимального перекрытия выполняется с использованием алгоритма, основанного на последовательном перемещении сопрягаемой поверхности в направлении уменьшения  $L$  и подбором координат вектора совмещения.

Разработана методика моделирования сопряжений поверхностей деталей на основе использования метода конечных элементов (КЭ), включающая восемь этапов: 1) анализ сборочной единицы, выявление сопрягаемых поверхностей деталей и технических требований к ним, анализ конструкции и технологии сборки узлов, определение метода, условий и характеристик процесса сборки; 2) определение геометрических отклонений по статистическим наблюдениям (данные обобщаются с целью их распространения на партию или серию изготавливаемых деталей); 3) создание действительных моделей деталей на основе статистических данных, либо по результатам измерений; 4) разработка расчётной схемы, включающей действительные модели сопрягаемых деталей, приложенные к ним нагрузки и систему ограничений; 5) анализ расчётной схемы и формирование моделей расчёта сборочных параметров узла; 6) разработка КЭ модели собираемой системы; 7) расчёты с использованием КЭ модели; 8) обработка результатов моделирования (решение задачи корреляционно-регрессионного анализа).

Проверка достоверности разработанных моделей выполнялась на имитаторах деталей ротора, имеющих конусные, цилиндрические и торцевые поверхности с близкими требованиями по геометрической точности. Величина расхождения результатов теоретических и экспериментальных исследований не превышает 25%.

Приведен метод оценки параметров сопряжений деталей на основе использования технологий машинного обучения, позволяющий оперативно оценивать геометрические параметры размерных связей в цеховых условиях. Метод включает три этапа: 1) выявление влияющих факторов; 2) формирование структуры модели на основе анализа требований к универсальности, применимости, обобщающей способности, производительности и точности моделирования; 3) формирование обучающих и тестовых выборок; обучение моделей. Предусмотрены детальные и укрупнённые сборочные модели узлов. Детальные модели могут описывать геометрические параметры сопряжений деталей по ряду поверхностей. Укрупнённые модели могут описывать выходные параметры размерных связей. На рисунке 7 приведено пояснение к предложенному методу.



Представлена схема размерных связей трёх деталей, формирующих параметр  $L$  между поверхностями  $C_{1,1}$  и  $C_{3,2}$ . Детали сопрягаются между собой по поверхностям и формируют соответствующие функции зазоров  $G_1(C_{1,2}, C_{2,1})$  и  $G_2(C_{2,2}, C_{3,1})$ .

Рисунок 7 – Пояснение к методу оценки сопряжений деталей с использованием машинного обучения

Формирование детальных моделей производится последовательно на основе размерных связей деталей. Определяются сопряжения между поверхностями деталей и формируются соответствующие модели  $M_1$ ,  $M_2$  описывающие размерные связи. Интересующий размерный параметр  $L$  определяется, исходя из параметров, оцениваемых моделями  $M_1$  и  $M_2$ , а также поверхностей  $V_{1,1}$ ,  $V_{3,2}$ . На рисунке 8, а приведено пояснение формирования детальных моделей.

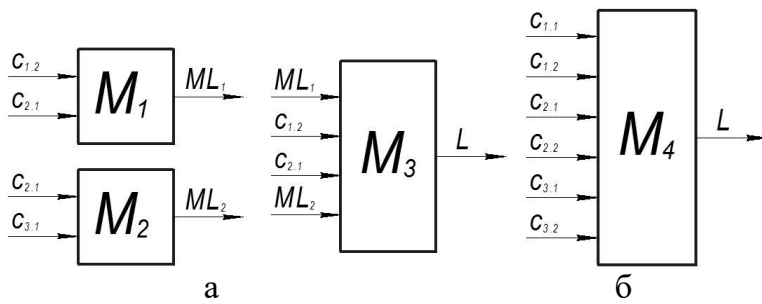


Рисунок 8 – Формирование детальных (а) и укрупнённых (б) моделей сопряжений деталей

Укрупнённая модель  $M_4$  позволяет оценивать параметр  $L$  на основе информации о поверхностях деталей  $C_{1,1}$ ,  $C_{1,2}$ ,  $C_{2,1}$ ,  $C_{2,2}$ ,  $C_{3,1}$  и  $C_{3,2}$  как показано на рисунке 8, б. Разрабатываемые нейросетевые модели могут быть

Необходимая точность наблюдается при использовании многослойного перцептрона радиально-базисной и свёрточной структур. Наилучшие результаты обучения наблюдаются для глубоких нейросетевых моделей, включающих свёрточные структуры. Использование глубоких нейросетевых моделей формирует семантику, описывающую особенности геометрических отклонений поверхностей деталей и их сопряжений.

Приводится метод повышения точности сборки узлов за счёт автоматизации операции пригонки деталей с использованием их действительных моделей. Предусматривается цифровое моделирование сопряжений деталей и определение варианта коррекции поверхностей исходя из наилучшего соответствия заданным величинам сборочных параметров. Метод состоит из трёх этапов, определяющих: предварительное расположение деталей; уточнённое расположение деталей; параметры доводки сопрягаемых поверхностей деталей. Уточненное расположение деталей определяется, исходя из уменьшения погрешностей сборочных параметров узла. Используется целевая функция:  $K = \sum_{j=1}^N |AsP_j - [AsP_j]| / T_{AsP_j} \rightarrow \min$ , (15) где  $AsP_j$  –  $j$ -й сборочный параметр ротора;  $[AsP_j]$  – допустимое значение параметра;  $T_{AsP_j}$  – допуск сборочного параметра.

Определяются корректировки к параметрам расположения деталей при выполнении сборки узла:  $Adj = (\Delta x \ \Delta y \ \Delta z \ \Delta \alpha \ \Delta \beta \ \Delta \gamma)$ , (16) где  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  – перемещения соответственно по осям  $x, y$  и  $z$ ;  $\Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma$  – углы поворотов вокруг осей  $x, y$  и  $z$ . Учитываются ограничения на недопустимость пересечений поверхностей и допуски на сборочные параметры узла:  $AsP \leq [AsP] \in R$  (17). Параметры доводки деталей (положение и объём снимаемого материала) вычисляются на третьем этапе (рисунок 9).

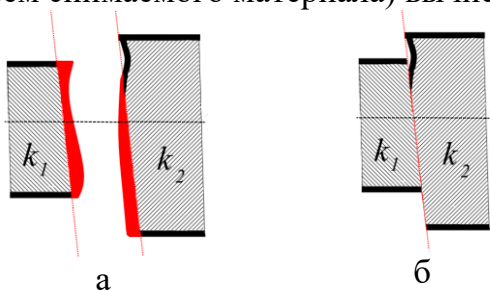


Рисунок 9 – Определение параметров доводки деталей (а) и после пригонки (б)

Определение припуска на каждой из сопрягаемых поверхностей выполняется путём нахождения двух параллельных секущих плоскостей  $Pl_{sbc}^1$  и  $Pl_{sbc}^2$ , минимизирующих объём снимаемого материала при соблюдении требуемого уровня контакта поверхностей. Найденные параметры могут быть использованы при ручной или машинной обработке сопрягаемых поверхностей деталей, что позволит повысить точность сборочных параметров узлов.

Приведено описание обобщённой методики цифровой коррекции формообразования поверхностей заготовок с применением их действительных моделей для повышения точности обработки заготовок и точности сборки узлов.

**Четвёртая глава** посвящена прогнозированию и снижению неуравновешенностей роторов с использованием их действительных моделей.

Предложен метод снижения неуравновешенностей роторов ГТД с помощью балансировки на цифровом двойнике. Идея балансировки ротора с использованием цифрового двойника состоит в выборе относительных взаимных угловых положений деталей, при которых обеспечивается противонаправленность возбуждающего воздействия от их неуравновешенностей и определения величин корректировочных масс. Уменьшение суммарной неуравновешенности ротора выполняется по значениям виброскоростей на опорах двигателя, получаемых с помощью цифрового двойника изделия. На рисунке 10 приведена схема, поясняющая предложенную идею.

Для расчета суммарного дисбаланса пары деталей  $k_1, k_2$  необходимо и достаточно иметь контактные поверхности  $b_1, b_2$ , координаты сосредоточенных масс  $x_1, y_1, x_2, y_2$  и их значения  $m_1, m_2$ , возможные линейные и угловые перемещения поверхностей  $\omega_x, \omega_y, \omega_\alpha$  и центров масс. Необходимо учитывать внешние силовые факторы  $F$ , возникающие от затяжки болтовых соединений, запрессовки и др. Исходные данные о деталях получаются посредством измерения их геометрии и дисбалансов. В процессе

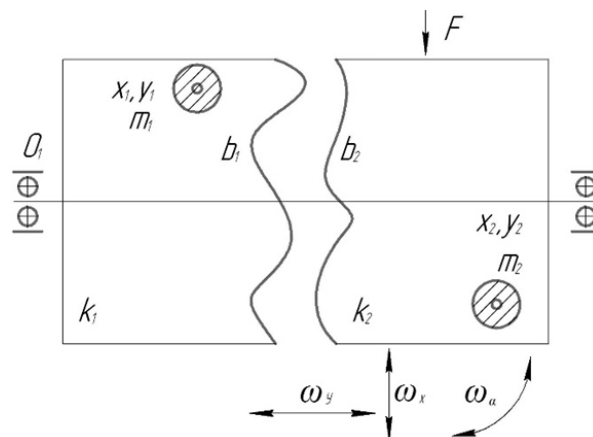


Рисунок 10 – Схема предлагаемого подхода

измерения дисбалансов определяются величины и угловые положения сосредоточенных масс относительно поверхностей деталей и оси вращения ротора  $O_1$ . На основе измерений координат точек поверхностей формируются триангуляционные или сплайновые модели основных поверхностей деталей. Выполняется расчёт векторов и моментов нагрузок, возникающих при контактном взаимодействии поверхностей деталей и возможные перемещения координат их центров масс. Полученные данные используются для построения упрощённой модели, содержащей номинальные поверхности и координаты сосредоточенных масс. Упрощённая модель может использоваться для определения суммарной величины дисбаланса узла, его главной центральной оси инерции или уровня вибраций на опорах. Рассмотрена математическая формулировка предложенного метода. Критерием балансировки ротора являются значения виброскоростей на опорах двигателя:

$K_r = \sum_{j=1}^k v_j St_j \rightarrow \min$ , (18). Где  $St_j$  – величина виброскоростей  $j$ -ой опоры ротора;  $v_j$  – вес

важности  $j$ -й опоры ротора;  $k$  – количество опор. Изменяемыми параметрами являются относительные угловые положения деталей, которые представлены в виде множества:

$PP = \{\alpha p_1, \alpha p_2, \alpha p_3, \dots, \alpha p_l\}$ , (19). Где  $\alpha p_i$  – относительное угловое положение  $i$ -й детали. Для

параметров  $\alpha p_i$  указываются их допустимые значения, определяемые конструкцией

деталей. Формируется множество возможных состояний собираемого ротора:

$S = \{s : \alpha p_i \in V_{\alpha p_i}\}$ ,  $V_{\alpha p_i} = \{\alpha p_i^1, \alpha p_i^2, \dots, \alpha p_i^{n_i}\}$  (20). Метод снижения уровня

неуравновешенностей роторов ГТД можно представить в форме:  $\{\alpha p_i^{opt}\}_{S, V_{\alpha p_i}} = \arg \min \{K_r^j\}$ ,

(21), где каждому  $j$ -ому угловому положению детали  $i$  соответствуют значения целевой

функции балансировки  $K_r^j$  (22). Реализация метода включает два этапа. На первом этапе

производится поиск начального приближения для определения углов  $\alpha p_i^{opt}$  с

использованием модели балансировки, рассматривающей ротор как абсолютно жёсткое

тело без учёта погрешностей, возникающих при сопряжении деталей. На втором этапе

выполняется определение углов  $\alpha p_i^{opt}$  с использованием конечно-элементной модели, учитывающей деформации ротора. Для реализации предложенного метода разработаны специализированные методики и алгоритмы.

Приводится описание модели, используемой на первом этапе. Дисбаланс ротора и центробежные моменты инерции как узла, состоящего из нескольких  $i=1...N$  деталей сборочной единицы (ДСЕ), уменьшаются за счёт оптимизации углового положения  $\varphi_i$  каждой  $i$ -ой ДСЕ относительно оси вращения ротора. Локальная система координат  $O'_i$  каждой  $i$ -ой ДСЕ включает ось  $\overline{OX}_i$ , совпадающую с осью  $\overline{OX}$  глобальной системы координат  $O$  (рисунок 11).

Радиус-вектор материальной точки  $i$ -ой ДСЕ  $\vec{r} = (x_i, y_i, z_i)^T$ , в глобальной системе координат, в локальной системе координат  $O'_i$  имеет вид:  $\vec{r}' = (x'_i, y'_i, z'_i)^T$ . Локальная система координат  $O'_i$  может быть повернута вместе с  $i$ -ой ДСЕ на любой угол  $\varphi_i$  относительно глобальной системы  $O$ .

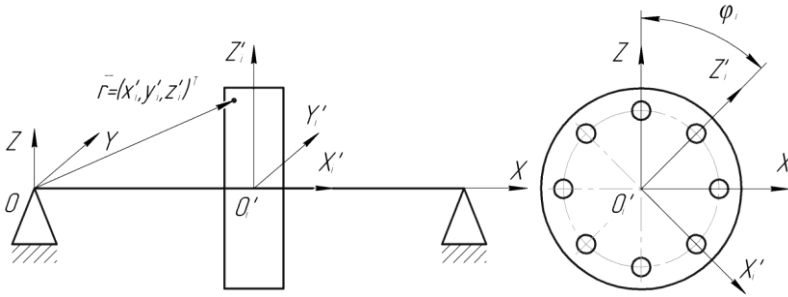


Рисунок 11 – Принятые системы координат в роторе

Условия равенства нулю главного вектора и главного момента неуравновешенных сил, учитывающих углы разворота  $\{\varphi_i\}$ ,  $i = 1...N$  каждой ДСЕ могут быть заданы в виде:

$$\begin{cases} J_{xy} = \sum_{i=1}^N \rho_i (\cos \varphi_i (J'_{xy})_i + \sin \varphi_i (J'_{xz})_i) \rightarrow 0 \\ J_{xz} = \sum_{i=1}^N \rho_i (\cos \varphi_i (J'_{xz})_i - \sin \varphi_i (J'_{xy})_i) \rightarrow 0 \\ D_y = \sum_{i=1}^N (\cos \varphi_i (D'_y)_i + \sin \varphi_i (D'_z)_i) \rightarrow 0 \\ D_z = \sum_{i=1}^N (\cos \varphi_i (D'_z)_i - \sin \varphi_i (D'_y)_i) \rightarrow 0 \end{cases}, (23)$$

$$\text{где } \begin{cases} (J_{xy})_i = \int_{V_i} x'_i y'_i dV \\ (J_{xz})_i = \int_{V_i} x'_i z'_i dV \end{cases} (24)$$

– центробежные моменты инерции каждой  $i$ -ой ДСЕ;

$$\begin{cases} (D'_y)_i = \int_{V_i} y'_i \rho_i dV \\ (D'_z)_i = \int_{V_i} z'_i \rho_i dV \end{cases} (25)$$

– дисбалансы  $i$ -ой ДСЕ в локальной системе координат детали.

Поскольку углы  $\varphi_i$  могут принимать фиксированные значения, то учитывается условие:  $\{\varphi_i\} = \{\frac{2\pi}{k_i} n_i \mid \forall n_i : n_i = 1 \vee 2 \vee 3 \dots \vee k_i, i = 1...N\}$ , (26) где  $k_i$  - количество отверстий в  $i$ -ой ДСЕ.

Остаточная неуравновешенность, определяемая значениями параметров  $J_{xy}, J_{xz}, D_y, D_z$ , после решения системы (23) устраняется за счёт размещения грузов массой  $m_1$  и  $m_2$  в плоскостях коррекции 1 и 2 с координатами  $x = x_1$  и  $x = x_2$  соответственно

(рисунок 11). Грузы с неизвестными массами  $m_1$  и  $m_2$ , находящиеся соответственно на заданных радиусах  $r_1$  и  $r_2$ , а также неизвестных углах  $\alpha_1, \alpha_2$ , определяются, исходя из системы уравнений (27).

$$\begin{cases} J_{xy} - m_1 x_1 r_1 \cos \alpha_1 + m_2 x_2 r_2 \cos \alpha_2 = 0 \\ J_{xz} - m_1 x_1 r_1 \sin \alpha_1 + m_2 x_2 r_2 \sin \alpha_2 = 0 \\ D_y - m_1 r_1 \cos \alpha_1 + m_2 r_2 \cos \alpha_2 = 0 \\ D_z - m_1 r_1 \sin \alpha_1 + m_2 r_2 \sin \alpha_2 = 0 \end{cases}, (27)$$

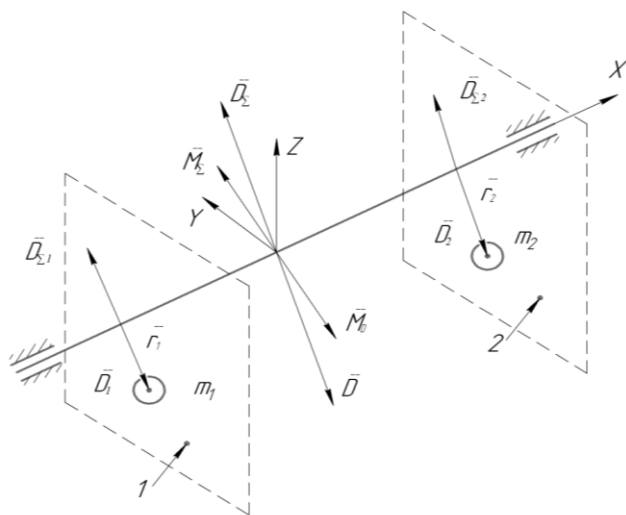


Рисунок 12 – Схема расположения корректировочных масс в 2-х плоскостях коррекции

Суммарные дисбаланс  $\bar{D}_\Sigma = \bar{D}_{\Sigma 1} + \bar{D}_{\Sigma 2}$  и момент  $\bar{M}_\Sigma$  представлены на рисунке 12 двумя векторами.

Разработан алгоритм формирования параметрических действительных моделей роторов, предназначенных для оценки уровня их дисбалансов при условии, что они являются жёсткими. Параметрическая действительная модель ротора учитывает: его номинальную геометрию, отклонения геометрических сборочных параметров и неуравновешенности деталей.

На втором этапе определяются углы  $\alpha p_i^{opt}$  с использованием КЭМ ротора турбины низкого давления, учитывающей его деформации. В качестве нулевого

приближения используются углы  $\varphi_i, \alpha_1, \alpha_2$ , определённые на первом этапе. Создание КЭМ ротора турбины низкого давления выполнялось с использованием его параметрической модели созданной в CAD системе NX и модулей Modal и Harmonic Response системы Ansys Workbench. В модуле Harmonic Response определяются амплитудно-частотных характеристики, деформации и виброскорости на опорах ротора. Интеграция параметрической и КЭМ моделей, управление процессом вычислений выполнялось посредством информационной системы, включающей модули: определения геометрических параметров по результатам измерений для формирования действительных 3D моделей ротора; формирования действительных 3D моделей ротора турбины; виртуального уравнивания 3D модели сборочной единицы; расчёта эксплуатационных параметров (например, уровня вибраций); управления проведением расчётов. Внешний вид сетки КЭ модели исследуемого ротора с внесенными дисбалансами, учитывающими неуравновешенности лопаток, представлен на рисунке 13.

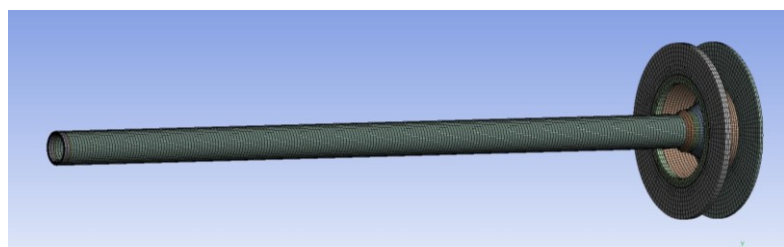


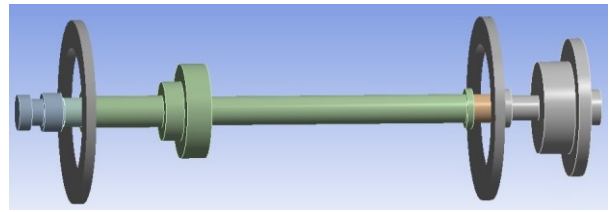
Рисунок 13 – Сетка конечно-элементной модели ротора турбины низкого давления

Верификация разработанных моделей выполнялась с использованием имитатора ротора турбины низкого давления (ТНД), который воспроизводит его размеры в масштабированном виде и содержит: вал, диск и две ступицы для установки диска и образования плоскостей коррекции.

Внешние виды имитатора ротора для исследования вынужденных колебаний и его конечно-элементной модели приведены на рисунках 14, а и 14, б. Имитатор ротора позволяет воспроизводить погрешности сборки и балансировки ротора турбины низкого давления с учётом существующей технологии сборки и балансировки. Виброскорости на опорах и изгибные формы колебаний имитатора ротора исследовались с использованием разгонно-балансирующего стенда. При частоте вращения имитатора ротора 8000 об./мин. максимальная величина его деформации составляет 0,02 мм. Расхождение результатов теоретических и экспериментальных исследований не превысило 17% для рассмотренных частот вращения ротора 2115, 4286 и 7909 об./мин.



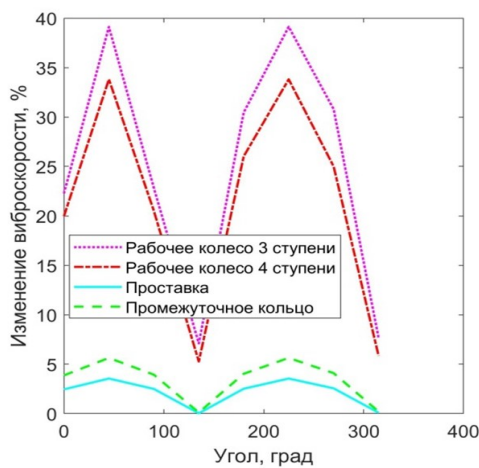
а)



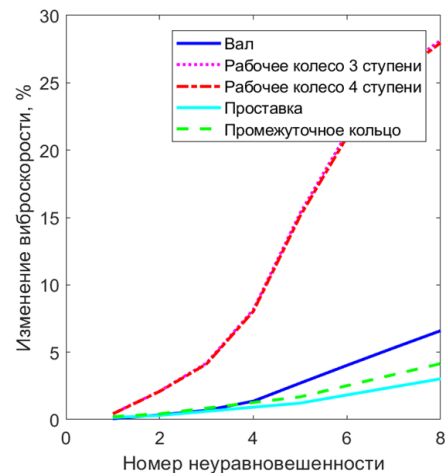
б)

Рисунок 14 – Внешний вид имитатора ротора турбины низкого давления (а) и его конечно-элементной модели (б)

Исследовалось влияние неуравновешенностей, и углового положения деталей ротора на величины виброскоростей его опор относительно к исходному уровню вибраций. Исходный уровень вибраций определялся при отсутствии неуравновешенностей деталей ротора. Значения неуравновешенностей деталей обозначены соответствующими номерами 1, 2 ... 8 и изменяются в диапазоне от 1 до 200 г·см. Ротор имеет три критические частоты: 50, 75, 110 Гц. На рисунках 15, а и 15, б приведены зависимости относительных значений виброскоростей первой опоры двигателя от угловых положений деталей и величин остаточного дисбаланса деталей для угловой частоты вращения 100 Гц.



а)



б)

Рисунок 15 – Зависимости относительных значений виброскоростей первой опоры от углового положения деталей (а) и остаточного дисбаланса деталей (б)

Наибольшее влияние на величину вибраций оказывают остаточные дисбалансы деталей исследуемого ротора, имитирующих рабочие колёса 3 и 4 ступеней, а также вала. Влияние деталей ротора на уровень его вибрации повышается при увеличении частоты вращения от нескольких процентов при 20 Гц до десятков процентов при 100 Гц и около ста процентов при 160 Гц по отношению к исходному уровню вибрации. Определены рациональные угловые положения деталей, позволяющие снизить уровень вибрации до 30%.

Определение вибраций роторов по результатам измерений деталей в цеховых условиях может выполняться с использованием технологии машинного обучения на основе расчётных данных, полученных с использованием КЭМ исследуемого ротора. Обучены нейронные сети двух типов. Первым типом является обобщенно-регрессионная нейронная сеть (GRNN, Generalized Regression Neural Networks). Вторым - однонаправленная сеть с двумя слоями. Входными параметрами нейронных сетей являются векторы смещений деталей относительно номинального положения и остаточных дисбалансов. Выходными параметрами являются относительные значения

виброскоростей опор. Разработанные модели используются для выбора рационального варианта сборки ротора.

**В пятой главе** описаны технологические решения для производства сборочных единиц ротора низкого давления, основанные на использовании действительных моделей и ориентированные для применения в цифровом производстве. Анализировалась сборка роторов турбины и компрессора низкого давления.

Приведены результаты экспериментальных исследований геометрических отклонений сопрягаемых поверхностей деталей рассматриваемых роторов. Обобщённые радиальные профили отклонений формы поверхностей деталей роторов представлены на рисунках 16, а и 16, б.

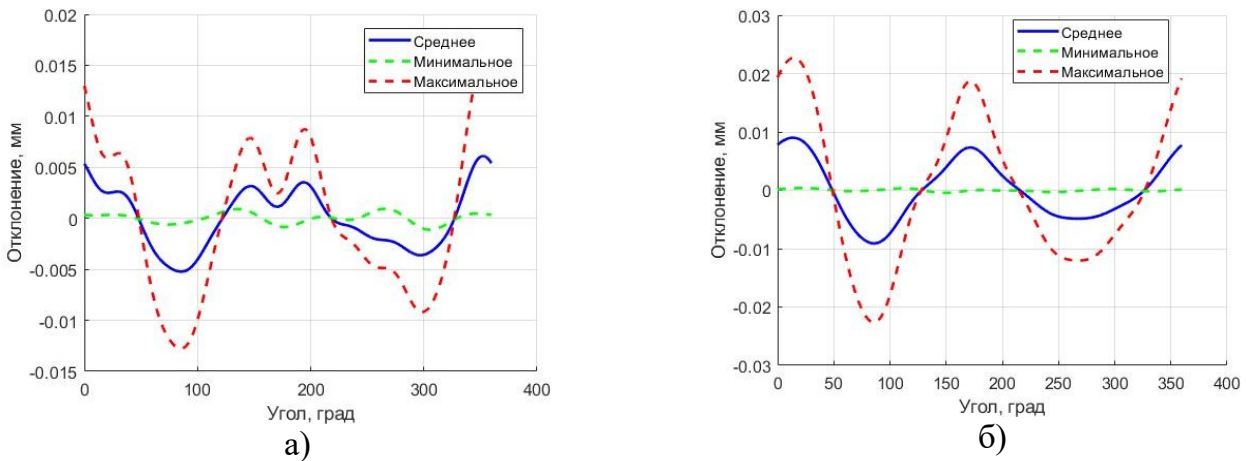


Рисунок 16 – Радиальные профили отклонений формы цилиндрических (а) и торцевых (б) поверхностей деталей роторов

Отклонения формы торцевых и цилиндрических поверхностей сопрягаемых деталей представлялось в виде ряда:  $\delta_n(x) = \sum_{k=1}^{+\infty} A_k \sin(k \cdot (2 \cdot \pi \cdot x / \tau + \theta_k) + (1 + (-1)^k) \cdot \pi / 2)$ , (28) где  $A_k$  – набор амплитуд членов гармонического ряда;  $\theta_k$  – фазы членов гармонического ряда;  $\tau$  – период функции (длина кривой);  $x$  – текущая длина кривой от начальной до текущей точки (угол). Для описания отклонений формы поверхностей с погрешностью не более 4 мкм использовалось 8 членов тригонометрического ряда.

Информация по моделям возможных реализаций отклонений формы поверхностей использовалась для решения задач: 1) выбора минимальной достаточности объёма измеряемых точек поверхностей, при которых обеспечивается представление действительных моделей деталей роторов с требуемой точностью; 2) отладки математической модели определения рациональных условий выполнения сборки; 3) определения характера и топологии зависимостей геометрических сборочных параметров ротора при учёте отклонений формы поверхностей комплектов деталей.

Предлагаемая математическая модель оптимальных условий выполнения операций сборки роторов предназначена для определения относительных угловых положений деталей в роторе согласно комплекточной ведомости. Изменяемые параметры в операции сборки описываются множеством  $PP = \{\alpha p_1, \alpha p_2, \alpha p_3, \dots, \alpha p_l, r p_1, r p_2, \dots, r p_m\}$ , (29)

где  $\alpha p_i$  – параметр, обозначающий относительное угловое положение  $i$ -й детали,  $r p_j$  –  $j$ -й размерный параметр деталей-компенсаторов. Каждый вариант сборки описывается множеством, компоненты которого содержат значения указанных параметров:  $s = (\alpha P_1, \alpha P_2, \alpha P_3, \dots, \alpha P_l, r P_1, r P_2, \dots, r P_m)$ . (30) Конструктивные особенности деталей

ограничивают допустимые значения параметров и формируют множество возможных состояний сборки:  $S = \{s : \alpha P_i \in V_{\alpha P_i}, r P_j \in V_{r P_j}\}$ ,  $V_{\alpha P_i} = \{\alpha P_i^1, \alpha P_i^2, \dots, \alpha P_i^{n_i}\}$ ,  $V_{r P_j} = [r P_j^{\min}, r P_j^{\max}]$  (31). После выполнения сборки определяется множество параметров качества сборки –  $QP = \{q P_1, q P_2, \dots, q P_n\}$  (32) и вектор, содержащий вычисленные значения данных параметров  $q = (q P_1, q P_2, \dots, q P_n)$ . (33) Во время стендовых испытаний изделия и его эксплуатации фиксируются значения эксплуатационных параметров –  $EP = \{e P_1, e P_2, \dots, e P_k\}$  и  $r = (e P_1, e P_2, \dots, e P_k)$ . (34) Рациональный вариант сборки предлагается определять, исходя из трёх вариантов критериев.

Первый вариант предусматривает наилучшее соответствие заданным параметрам качества сборки:  $K_q = \sum_{j=1}^n w_j |q P_j - q P_j^*| / T_{q P_j} \rightarrow \min$ , (35) где  $q P_j^*$  – номинальное значение параметра  $q P_j$ ,  $T_{q P_j}$  и  $w_j$  допуск и его весовой коэффициент на  $j$ -й параметр качества сборки соответственно.

Второй вариант предусматривает наилучшее соответствие эксплуатационных параметров заданным требованиям к изделию:  $K_r = \sum_{j=1}^k v_j |e P_j - e P_j^*| / T_{e P_j} \rightarrow \min$ , (36) где  $e P_j^*$  – номинальное значение параметра  $e P_j$ ,  $T_{e P_j}$  и  $v_j$  допуск и параметр предпочтительности на  $j$ -й эксплуатационный параметр ротора соответственно.

Третий вариант является смешанным и предусматривает компромиссное решение по достижению наиболее значимых параметров качества и эксплуатационных параметров ротора. Используется сводный критерий:  $K_\Sigma = \nu_q K_q + \nu_r K_r \rightarrow \min$ , (37) где  $\nu_q$  и  $\nu_r$  – коэффициенты значимости представленных критериев соответственно.

Определение рациональных параметров сборки роторов (радиальных биений дисков и других геометрических параметров) формулируется как задача нелинейной оптимизации, которая решается с использованием моделей прогнозирования геометрических размерных связей и величин дисбалансов, изложенных в главах 2, 3 и 4.

В основу реализации технологии сборки турбины и компрессора низкого давления положены теоретико-экспериментальные исследования, в ходе которых выполнялось измерение геометрии комплекта деталей турбины и компрессора низкого давления, создавались их действительные модели. С использованием модели оценки сборочных параметров ротора выполнялась их оценка для различных взаимных угловых положений деталей. Выполнялась сборка узла, измерялись сборочные параметры. Сравнивались величины сборочных параметров, полученных в ходе измерений и моделирования. Производилось определение оптимальных условий сборки деталей, к которым относятся взаимные угловые положения деталей. На рисунке 17, а представлены деформации и перемещения ротора ТНД при его сборке. Сборка ротора ТНД представлена на рисунке 17, б.

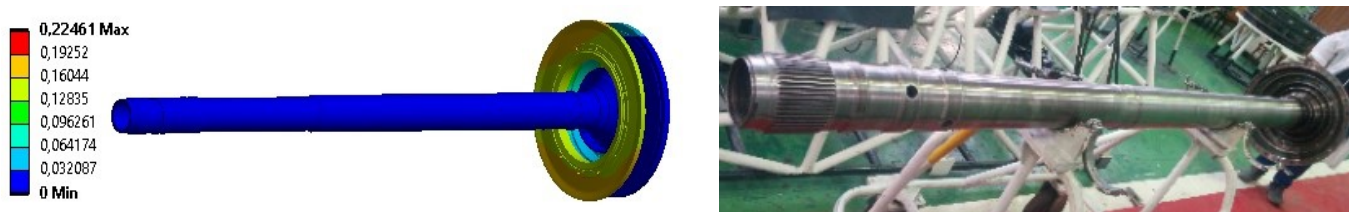


Рисунок 17 – Деформации и перемещения ротора ТНД при его сборке (а) и выполнение сборки ротора ТНД (б)



На рисунке 18, а представлены деформации и перемещения ротора компрессора низкого давления (КНД) при его сборке. Сборка ротора КНД представлена на рисунке 18, б.

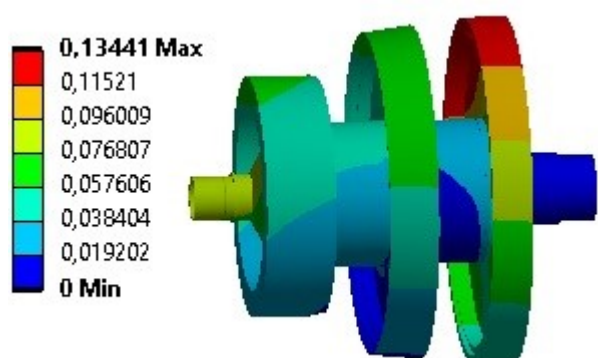
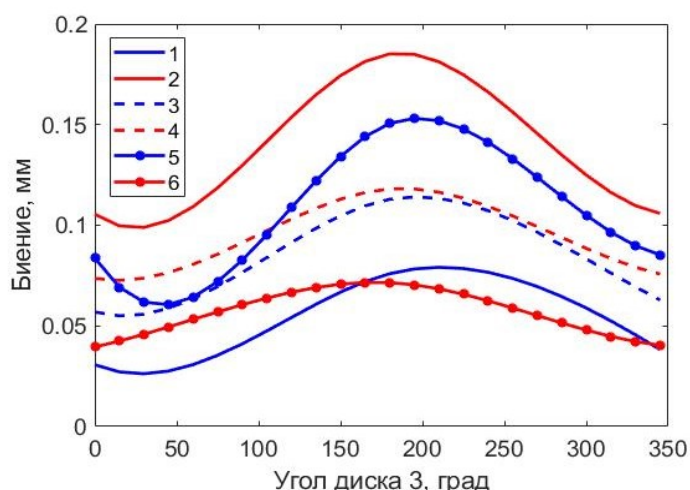


Рисунок 18 – Деформации и перемещения ротора КНД при его сборке (а) и выполнение сборки ротора КНД (б)

Отработка технологических решений выполнялась при сборке роторов турбины и компрессора низкого давления без лопаток. Суммарный дисбаланс ротора может быть учтён на основе данных балансировки рабочих колёс в сборе с лопатками. На рисунке 19 приведены зависимости сборочных параметров ротора компрессора низкого давления от



- 1, 3, 5 – радиальные биения соответственно по дискам 1, 2 и 3 ступеней;
- 2, 4, 6 – торцевые биения соответственно по дискам 1, 2 и 3 ступеней;
- 7 – общий дисбаланс ротора

Рисунок 19 – Сборочные параметры ротора компрессора низкого давления

относительного углового положения диска третьей ступени.

Анализ полученных зависимостей показывает их монотонный характер и гармоническую форму, которая может быть представлена в виде тригонометрического ряда. Принимая во внимание характер и форму названных зависимостей, в работе использовались методы простого перебора, последовательного квадратичного программирования и др.

Расхождения между оценёнными и измеренными сборочными параметрами рассматриваемых роторов составили не более 25%. Определялись оптимальные условия выполнения сборки ротора по трём критериям.

На рисунке 20 приведены результаты определения оптимальных условий сборки ротора компрессора низкого давления. Соответствующими столбиками по каждому сборочному параметру обозначены результаты оптимизации для: первого варианта, исходя из условия наилучшего соответствия заданным геометрическим сборочным параметрам; второго варианта, исходя из достижения наилучшего соответствия заданным требованиям дисбаланса ротора; третьего варианта, предусматривающего компромиссное решение по достижению геометрических сборочных параметров и требований к дисбалансу ротора. Применение критерия  $K_q$  позволило уменьшить геометрические погрешности ротора до 76% и величину его суммарного дисбаланса на 62%. Использование критерия  $K_r$  приводит

к повышению геометрических отклонений ротора и снижению его суммарного дисбаланса, почти на 100%. Применение компромиссного критерия  $K_{\Sigma}$ , позволяет уменьшить геометрические погрешности в среднем на 23%, а величина суммарного дисбаланса снижается на 80%. Достигнутое повышение точности сборочных параметров затруднительно получить экспериментальным подбором, поскольку количество вариантов сборки рассматриваемых роторов более 331 тысяч.

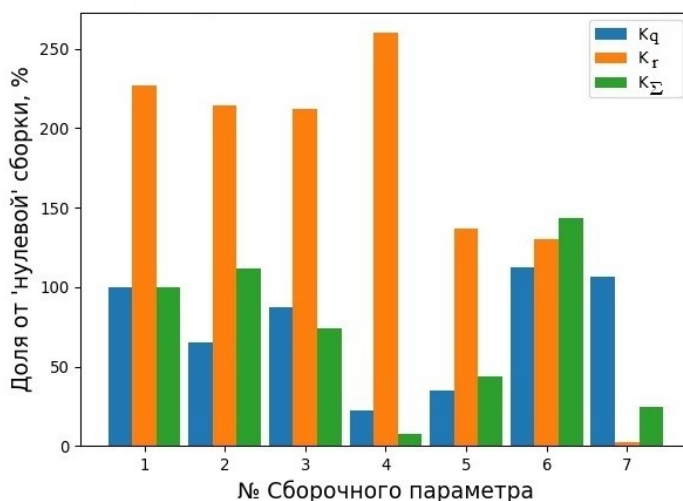
Экономический эффект от внедрения разработанных решений при сборке одного ротора КНД из 7 деталей ( $n_{дет} = 7$ ) оценивался на основе: исходных трудоёмкостей сборки и балансировки ротора –  $t_{сб}, t_{бал}$ , коэффициентах их

снижения:  $k_{t_{сб}}, k_{t_{бал}}$ , исходной трудоёмкости измерений –  $t_{из}$  деталей и коэффициента её роста –  $k_{t_{изм}}$ , цеховой стоимости нормо-часов операций сборки, балансировки, измерений на координатно-измерительной машине –  $C_{ч_{сб}}, C_{ч_{бал}}, C_{ч_{изм}}$ . Оценка производилась по формуле:  $\Delta = C_{ч_{сб}} \cdot t_{сб} \cdot k_{t_{сб}} + C_{ч_{бал}} \cdot t_{бал} \cdot k_{t_{бал}} - n_{дет} \cdot C_{ч_{изм}} \cdot t_{из} \cdot k_{t_{изм}}$  (38). Экономический эффект на один ротор составляет 32688 рублей. Расчёт не учитывает технико-экономического эффекта, заключающегося в минимизации риска снятия изделий с испытаний по причине повышенных вибраций. Так, при традиционных не управляемых с помощью цифровых моделей технологиях сборки, вероятность нахождения оптимального углового положения деталей ротора при регламентированных  $k = 4$  экспериментальных переборки положений деталей с дискретностью вращения равной  $n_{омв} = 24$  отверстий для каждой детали равна:  $P = k/n_{омв}^{n_{дет}-1}$ , что составляет всего  $2 \cdot 10^{-8}$ . Величина  $n_{омв}^{n_{дет}-1}$  представляет предельное количество возможныхборок ротора.

Заключительная часть пятой главы содержит изложение двух инженерных методик. Первая инженерная методика описывает последовательность внедрения предлагаемых в работе технологических решений, основанных на цифровом моделировании технологических операций и процессов с использованием действительных моделей. Вторая инженерная методика описывает укрупнённую последовательность использования технологических решений на рабочих местах контролеров деталей и сборщиков роторов.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В ходе выполнения комплекса теоретических и экспериментальных исследований решена крупная научная проблема, имеющая важное значение для развития авиационного двигателестроения, направленная на повышение технологических характеристик двигателей в условиях цифрового производства применительно к операциям сборки и доводки. Можно выделить следующие основные результаты, полученные в ходе работы:



1, 3, 5 – радиальные биения соответственно по дискам 1, 2 и 3 ступеней;

2, 4, 6 – торцевые биения соответственно по дискам 1, 2 и 3 ступеней;

7 – общий дисбаланс ротора

Рисунок 20 – Результаты определения оптимальных условий сборки ротора

1. Предложена научная идея, предусматривающая разработку и сквозное использование действительных моделей объектов при решении технологических задач обеспечения качества при производстве и ремонте ГТД. Разработаны базовые принципы использования действительных моделей деталей и узлов для повышения управляемости технологий производства ГТД, а также повышения точности и производительности операций сборки. Обоснованы содержание и применимость действительных моделей деталей и узлов ГТД в процессе технологической подготовки и производства изделий. Рассмотрены возможности снижения неуравновешенностей ГТД за счёт использования действительных моделей деталей и узлов для определения оптимизированных вариантов их сборки.

2. Разработана обобщённая методика создания действительных моделей деталей и узлов ГТД по результатам их измерений. Решена задача определения необходимого и достаточного объёма измеренных данных для создания действительных моделей деталей и узлов ГТД применительно к операциям сборки роторов.

3. Разработан метод получения действительных размеров деталей и сборочных параметров узлов, учитывающий сопряжения контактирующих поверхностей с помощью новых технологий использования ВМ и КВС. Применение разработанного метода позволяет повысить точность создания действительных моделей деталей и узлов на 20% за счёт учёта возможных сопряжений контактирующих поверхностей измеряемых объектов, которые определяют особенности формируемых размерных связей.

4. Разработан расчетный комплекс для оценки параметров сопряжений деталей по возможной комбинации контактирующих поверхностей с целью уточнения технологических размерных расчётов, основанный на создании и использовании действительных моделей объектов. Комплекс позволяет определять геометрические параметры сопряжений деталей при допущении их абсолютной жёсткости, а также при учёте податливости технической системы собираемое изделие – технологическое оснащение. Проведены теоретико-экспериментальные исследования геометрических сопряжений деталей при их контактном взаимодействии на основе статистически обоснованных возможных вариантов геометрии контактирующих поверхностей. Исследования показывают удовлетворительную сходимость комплекса расчетных и статистических моделей, в пределах 25%.

5. Предложен метод повышения точности оснастки и сборки узлов за счёт автоматизации операции пригонки деталей с использованием их действительных моделей. Применение метода на операциях доводки при сборке узлов ГТД позволяет обеспечивать требуемую площадь контакта поверхностей, что в конечном итоге позволяет повысить точность взаимного расположения деталей.

6. Предложен метод снижения неуравновешенностей роторов ГТД с помощью цифровой балансировки, учитывающий расчётную вибрацию на опорах, геометрические погрешности и неуравновешенности деталей с использованием действительных моделей деталей и узлов роторов. Снижение уровня вибраций роторов достигается за счёт выбора рационального углового положения деталей и узлов, позволяющего компенсировать возбуждающие воздействия от их неуравновешенностей. Показано, что использование предложенного метода снижения неуравновешенностей роторов ГТД позволит уменьшить вибрации на опорах ГТД не менее чем на 30% в процессе его сборки за счёт учёта производственных погрешностей балансировки и сборки входящих в него деталей и узлов.

7. Предложены варианты определения рациональных условий сборки узлов роторов ГТД, обеспечивающие в зависимости от целевой функции: 1)наилучшее соответствие заданным параметрам качества сборки узла; 2)наилучшее соответствие заданным

требованиям к рабочим и эксплуатационным параметрам изделия; 3) компромиссное решение по двум перечисленным случаям. Определялись рациональные угловые положения деталей ротора компрессора низкого давления. Результативность оценивалась по сравнению с использованием предварительных сборок узлов. Определённые относительные угловые положения деталей ротора компрессора низкого давления с использованием компромиссного решения позволяют снизить погрешности сборочных параметров в среднем на 23% и уменьшить величину дисбаланса на 80%.

Таким образом, поставленная цель достигнута и может считаться выполненной в полном объёме. Комплекс разработанных методов, моделей и программных средств позволяет повысить точность технологических размерных расчётов, сборки узлов ГТД, снизить трудоёмкость выполнения упомянутых технологических операций, уменьшить уровень вибраций изделий. Предложенные методики и алгоритмы позволяют решать практические задачи для обеспечения точности и производительности изготовления деталей, а также сборки узлов ГТД, и предназначены для использования инженерно-техническим персоналом предприятий авиадвигателестроительной отрасли.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

### Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. **Болотов, М.А.** Модели и методы оптимизации методик измерения деталей ГТД при их контроле на координатно-измерительных машинах / **М.А. Болотов, И.А. Лёзин** // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2011. – № 2 (26). – С. 140-149.

2. **Болотов, М.А.** Разработка технологии контроля геометрических параметров ГТД комплексной системы обеспечения качества, основанной на использовании современных средств измерений / **М.А. Болотов, И.Л. Шитарев** // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2011. – № 2 (20). – С. 39-44.

3. **Болотов, М.А.** Моделирование технологических процессов при производстве сложных изделий авиакосмической техники: проблемы и пути их решения / **М.А. Болотов, А.Н. Жидяев, О.С. Сурков** // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2012. – № 3-2 (34). – С. 146-150.

4. **Болотов, М.А.** Погрешности контактных измерительных средств станков с ЧПУ при контроле геометрических параметров изделий / **М.А. Болотов, А.Н. Жидяев, О.С. Сурков, Н.В. Рузанов, И.В. Папсуев** // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2012. – № 3-2 (34). – С. 157-163.

5. **Болотов, М.А.** Повышение точности оценки отклонения расположения в координатных измерениях профилей лопаток компрессора и турбины газотурбинного двигателя / **М.А. Болотов, В.А. Печенин, Н.В. Рузанов** // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2014. – № 5-3 (47). – С. 202-211.

6. Печенин, В.А. Оптимизация измерений геометрии деталей со сложными поверхностями / **В.А. Печенин, М.А. Болотов, Н.В. Рузанов, М.В. Янюкина** // Измерительная техника. – 2015. – №3. – С. 18-23.

7. Печенин, В.А. Сравнительное исследование алгоритмов измерения геометрии сложных профилей лопаток компрессора газотурбинного двигателя / **В.А. Печенин, М.А. Болотов, Н.В. Рузанов, Е.Р. Степанова** // Вестник Самарского государственного

аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2015. – Т. 14. – № 3-2. – С. 438-447.

8. Печенин, В.А. Модель анализа и классификации геометрии лопаток газотурбинных двигателей / Печенин В.А., **Болотов М.А.** // Вестник Московского авиационного института. – 2015. – т.22, №2. – С.55-65.

9. Печенин В.А., **Болотов М.А.** Погрешности базирования при координатных измерениях цилиндрических зубчатых колес / В.А. Печенин, **М.А. Болотов** // Вестник машиностроения. – 2016. – №5. – С. 47-50.

10. **Болотов, М.А.** Определение неопределенностей измерения параметров профиля лопаток компрессора ГТД / **М.А. Болотов**, В.А. Печенин, Н.В. Рузанов // СТИН. – 2016. – №6. – С.34-40.

11. Печенин, В.А. Исследование неопределённостей измерений геометрических параметров профилей лопаток компрессора газотурбинного двигателя / В.А. Печенин, **М.А. Болотов**, Н.В. Рузанов, М.В. Янюкина // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета), – 2016. – т.15, №2. – С.162-170.

12. **Болотов, М.А.** Метод оценки неопределённостей пространственного сопряжения высокоточных оптических и механических деталей / **М.А. Болотов**, В.А. Печенин, С.П. Мурзин // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 3. – С. 360-369.

13. **Болотов, М.А.** Модель сопряжения деталей с коническими поверхностями / **М.А. Болотов**, В.А. Печенин, Н.В. Рузанов, И.А. Грачев, И.В. Щербаков // СТИН. – 2017. – № 3. –С. 28-33.

14. Печенин, В.А. Модель распознавания элементов геометрии пера лопаток газотурбинных двигателей / В.А. Печенин, **М.А. Болотов**, Н.В. Рузанов // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2018. – № 3. – С. 102-108.

15. Елисеев Ю.С., **Болотов М.А.**, Печенин В.А., Грачев И.А., Кудашов Е.В. Прогнозирование погрешностей сборки изделий с использованием действительных моделей деталей / Ю.С. Елисеев, **М.А. Болотов**, В.А. Печенин, И.А. Грачев, Е.В. Кудашов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2019. – т. 18, №2. – С. 128-137.

16. **Болотов, М.А.** Алгоритм прогнозирования вибрационного состояния ротора турбины с использованием машинного обучения / **М.А. Болотов**, В.А. Печенин, Е.Ю. Печенина, Н.В. Рузанов // Вестник самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2020. – № 1. – С. 18-27.

17. Дилигенский, Д.С. Разработка методики оценки параметров посадки упругих колец демпфера опоры ротора / Д.С. Дилигенский, Д.К. Новиков, В.А. Печенин, **М.А. Болотов** // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2020. – № 1. – С. 44-50.

18. Грачев И.А., Кудашов Е.В., **Болотов М.А.**, Проничев Н.Д. Модель оценки торцевых биений ротора с параллельными связями деталей / И.А. Грачев, Е.В. Кудашов, **М.А. Болотов**, Н.Д. Проничев // Вестник самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2021. – № 2. – С. 83-96.

19. Хаймович А.И., **Болотов М.А.**, Печенина Е.Ю. Модель виртуального уравнивания жёстких роторов / А.И. Хаймович, М.А. Болотов, Е.Ю. Печенина // Вестник самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2021. – Том 21. № 1. – С. 99-109.

#### Статьи в изданиях, индексируемых базой данных Scopus/Web of Science

20. **Bolotov, M.A.** Modeling of coordinate measuring geometrical parameters form and location complexity profile of compressor blade GTE / **M.A. Bolotov**, V.A. Pechenin, N.V.

Ruzanov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2014. – Vol. 9, Issue 12. – P. 1143-1148.

21. Pechenin, V.A. Development of a method of ICP algorithm accuracy improvement during shaped profiles and surfaces control / V.A. Pechenin, **M.A. Bolotov**, N.V. Ruzanov // International Journal of Engineering and Technology. – 2014. – T. 6. № 5. – P. 2229-2235.

22. **Bolotov, M.A.** Information model for estimate of the geometric parameters between the surfaces trapezoidal shape in the measurements of compressor blades of GTE / M.A. Bolotov, V.A. Pechenin, N.V. Ruzanov, N.D. Pronichev // 2015 5th International Workshop on Computer Science and Engineering: Information Processing and Control Engineering, WCSE 2015-IPCE. – 2015. – P. 208-212.

23. Pechenin, V.A. Technique of Decomposition of Form Deviation for Freeform Surface / V.A. Pechenin, **M.A. Bolotov**, N.V. Ruzanov // Key Engineering Materials. – 2016. – V. 685. – P. 334-339.

24. **Bolotov, M.A.** Model of mating of parts with nominal coaxial surfaces of rotation / **M.A. Bolotov**, V.A. Pechenin // Journal of Materials and Environmental Science. – 2016. – 7 (9). – P. 3431-3436.

25. Pechenin, V.A. Determination of the bilateral filter's parameters for the analysis of surface geometry deviations / V.A. Pechenin, **M.A. Bolotov**, E.R. Stepanova // CEUR Workshop Proceedings. – 2016. – V. 1638. – P. 386-392.

26. Pechenin, V.A. Mathematical models for forecast of geometrical parameters of assembly units / V.A. Pechenin, **M.A. Bolotov**, N.V. Ruzanov // CEUR Workshop Proceedings. – 2017. – V. 1904. – P. 23-28.

27. **Bolotov, M.A.** Investigation of the vibration state of the turbine rotor taking into account the influence of geometric accuracy of parts / **M.A. Bolotov**, V.A. Pechenin, E.Yu. Kolchina // MATEC Web of Conferences. – 2018. – 224. – 02085.

28. **Bolotov, M.A.** Prediction of the vibration state of the GTE turbine rotor taking into account the influence of the geometric accuracy of parts / **M.A. Bolotov**, E.J. Kolchina, V.A. Pechenin, N.D. Pronichev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – 450(2). – 022022.

29. **Bolotov, M.A.** Predicting geometric parameters of assemblies with neural network models / **M.A. Bolotov**, V.A. Pechenin, N.V. Ruzanov, I.A. Grachev // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – 1096(1). – 012198.

30. Ruzanov, N.V. The model for estimating the measurement error in geometric parameters of complex surfaces / N.V. Ruzanov, **M.A. Bolotov**, V.A. Pechenin // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1096, Issue 1. – 012163.

31. **Bolotov, M.A.** Neural network model in digital prediction of geometric parameters for relative position of the aircraft engine parts / **M.A. Bolotov**, V.A. Pechenin, N.V. Ruzanov, D.M. Balyakin // CEUR Workshop Proceedings. – 2019. – V. 2416– p. 87-94.

32. **Bolotov, M.A.** Surface recognition of machine parts based on the results of optical scanning / **M.A. Bolotov**, V.A. Pechenin, N.V. Ruzanov, E.Yu. Kolchina // CEUR Workshop Proceedings, 2391. – 2019. – p. 342-349.

33. **Bolotov, M.A.** Information model and software architecture for the implementation of the digital twin of the turbine rotor / **M.A. Bolotov**, V.A. Pechenin, N.V. Ruzanov, I.A. Grachev // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – 1368(5). – 052013.

34. **Bolotov, M.A.** Technological features of aircraft engine repair in digital production / **M.A. Bolotov**, I.A. Grachev, E.V. Kudashov, V.A. Pechenin, N.D. Pronichev, // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – 1399(4), 044114.

35. **Bolotov, M.A.** Issues for Virtual Simulation of Complex Assemblies / **M.A. Bolotov, V.A. Pechenin, D.M. Balyakin** // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. – 2019. – 8933940.

36. **Bolotov, M.A.** Simulation for Pretensioning Bolted-Type Connections of High – Loaded Assembly Units / **M.A. Bolotov, V.A. Pechenin, I.A. Grachev, E.V. Kudashov** // 2019 International Multi -Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. – 2019. – 8934112.

37. Grachev, I.A. Problems and ways to reduce measurement uncertainties in evaluating the geometric assembly parameters of gas turbine engine assemblies / I.A. Grachev, **M.A. Bolotov**, E.V. Kudashov, V.A. Pechenin // IOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies. – 2020. С. 52035.

38. **Bolotov, M.A.** Simulation of a gas turbine engine rotor assembly / **M.A. Bolotov, V.A. Pechenin, D.M. Balyakin, E.Yu. Pechenina** // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. P. 012024.

39. Grachev I. A., **Bolotov M.A.**, Pechenin V.A. etc. Comparative analysis of simulation options for the real geometry of the surfaces of gas turbine engine parts // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 1745. Issue 1.

40. **Bolotov M.A.**, Pechenin V.A., Ruzanov N.V. etc. Methods for determining the location parameters of GTE blade profiles based on their measurement results // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 1745. Issue 1.

41. **Bolotov M.A.**, Pechenin V.A., Yu Pechenina E. etc. Digital model to optimize the rotor assembly for aircraft engine compressor models // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 1745. Issue 1.

42. Grachev I. A., Kudashov E. V., **Bolotov M.A.** etc. Parameterized FEM for estimation of product unit assembly parameters // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2021. — Vol. 1047. Issue 1.

#### Публикации в других изданиях

43. Печенин, В.А. Разработка модели оценки погрешностей измерений углового расположения отверстий в дисках и валах ГТД с использованием метода "максимум-минимум" / В.А. Печенин, **М.А. Болотов** // В сборнике: Самолетостроение России. Проблемы и перспективы. Симпозиум с международным участием. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет). – Самара: СГАУ, 2012. – С. 315-317.

44. Рузанов, Н.В. Интеллектуальная система для автоматизации измерений геометрических параметров лопаток газотурбинного двигателя / Н.А. Рузанов, **М.А. Болотов**, В.А. Печенин // Материалы докладов международной научно-технической конференции «Перспективные информационные технологии (ПИТ-2013)». – Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2013. – С. 84-86.

45. Рузанов, Н.В. Теоретико-вероятностная модель для оценки сборочных параметров изделий / Н.В. Рузанов, **М.А. Болотов**, В.А. Печенин // В сборнике: Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2017). Сборник трудов III международной конференции и молодежной школы. Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. – Самара: Предприятие "Новая техника", 2017. – С. 1063-1068.

46. **Болотов, М.А.** Математическая модель оптимизации размерно-точных параметров деталей газотурбинных двигателей / **М.А. Болотов, В.А. Печенин, Н.В. Рузанов** // В сборнике: Высокие технологии в современной науке и технике. Сборник научных трудов VI Международной научно-технической конференции молодых ученых,

аспирантов и студентов. Под редакцией А.Н. Яковлева. – Томск: Ид-во ТПУ, 2017. – С. 298-299.

47. **Болотов, М.А.** Прогнозирование геометрических параметров сборок изделий с использованием нейросетевых моделей / **М.А. Болотов**, В.А. Печенин, Н.В. Рузанов // В сборнике: Информационные технологии и нанотехнологии. Сборник трудов ИТНТ-2018. Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. – Самара: Предприятие "Новая техника", 2018. – С. 1933-1941.

48. **Болотов, М.А.** Нейросетевая модель в цифровом прогнозировании геометрических параметров относительного положения деталей авиационных двигателей / **М.А. Болотов**, В.А. Печенин, Н.В. Рузанов, Д.М. Балякин // V международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии». – Самара: Предприятие "Новая техника", 2019. – Т.4 – С. 608-616.

49. **Болотов, М.А.** Информационная модель и архитектура программной системы для реализации цифрового двойника ротора турбины / **М.А. Болотов**, В.А. Печенин, Н.В. Рузанов, И.А. Грачев // V международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии». – Самара: Предприятие "Новая техника", 2019. – Т.4 – С. 833-842.

50. Балякин, Д.М. Разработка геометрических моделей изделий по результатам их измерений в "Умных" фабриках будущего / Д.М. Балякин, В.А. Печенин, **М.А. Болотов** // Сборник тезисов докладов международной молодёжной научной конференции «XV Королёвские чтения». – Самара: АНО «Издательство СНЦ», 2019. – С. 263-264.

51. Голев, Н.С. Методика обработки данных сканирования для создания действительных моделей деталей / Н.С. Голев, Е.В. Кудашов, Е.Ю. Печенина, В.А. Печенин, **М.А. Болотов** // Сборник научных статей по итогам девятой международной научной конференции «Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство». – Казань: ООО «Конверт», 2019. – Ч.1 – С. 55-57.

52. **Болотов, М.А.** Прогнозирование вибраций ротора газотурбинного двигателя / **М.А. Болотов**, В.А. Печенин, Е.Ю. Печенина // Материалы VI Международной научно - практической конференции «Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн». – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2020. – Т. 1. – с.223-229.

53. Печенина, Е.Ю. Исследование вибрационных параметров ротора с использованием технологии виртуальной балансировки / Е.Ю. Печенина, В.А. Печенин, **М.А. Болотов**, Н.Д. Проничев // В сборнике: Машиностроение: инновационные аспекты развития. Материалы III международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург: Индивидуальный предприниматель Жукова Елена Валерьевна, 2020. – С. 55-60.

54. **Болотов, М.А.** Цифровая модель оптимизации сборки ротора компрессора авиационного двигателя / **М.А. Болотов**, В.А. Печенин, Е.Ю. Печенина, Н.С. Голев // В сборнике: Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2020). Сборник трудов по материалам VI Международной конференции и молодежной школы. В 4-х томах. Под редакцией В.А. Соболева. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2020. – С. 1-8.