

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи

Болотов Михаил Александрович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
МОДЕЛЕЙ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ГТД ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИХ ПРОИЗВОДСТВА**

**2.5.15. – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных
аппаратов**

Диссертация на соискание учёной степени
доктора технических наук

Научный консультант:

Хаймович Александр Исаакович,
доктор технических наук, доцент

Самара – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ.....	2
ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1 ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УЗЛОВ ГТД.....	15
1.1 Анализ состояния проблемы повышения технических показателей узлов ГТД.....	15
1.2 Статистический анализ причин возникновения и путей снижения вибрации изделия.....	18
1.3 Анализ состояния проблемы обеспечения точности измерений геометрии деталей и узлов ГТД.....	20
1.3.1 Исследование влияния измерительных погрешностей средств координатных измерений на погрешность измерения геометрических параметров.....	24
1.3.2 Исследование влияния погрешностей формы поверхностей на погрешность измерения геометрических параметров.....	26
1.3.3 Особенности моделирования процесса координатных измерений..	28
1.4. Анализ состояния вопроса прогнозирования и обеспечения точности геометрических параметров деталей узлов.....	36
1.5. Причины возникновения и оценка дисбалансов роторов ГТД.....	44
1.6. Особенности сборки роторов авиационных ГТД с учётом условий цифрового производства.....	51
1.7 Выводы по главе 1. Цель и задачи исследования.....	58
ГЛАВА 2 ФОРМИРОВАНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ.....	63
2.1 Принципы формирования и использования действительных моделей деталей и узлов ГТД в производстве авиадвигателей в условиях цифрового производства.....	63
2.2 Методика создания действительных геометрических моделей деталей и узлов.....	72
2.3 Разработка метода получения действительных размеров ДСЕ и их сборочных параметров, учитывающего сопряжения деталей с помощью использования виртуальных мер (ВМ) и комплектных виртуальных сборок (КВС).....	81
2.4 Математическое представление и анализ действительных поверхностей объектов.....	92

2.5	Формирование действительных поверхностей объектов на основе заданных параметров.....	104
2.6	Определение необходимого и достаточного объёма измеренных данных для построения действительных моделей деталей и узлов.....	105
2.7	Методика прогнозирования неопределённостей координатных измерений	107
2.8	Исследование неопределённостей измерений при контроле геометрии деталей с учётом формирования размерных связей в составе сборочных единиц	113
2.8.1	Формирование множества деталей с различными геометрическими отклонениями поверхностей для исследования неопределённости измерений.....	115
2.8.2	Оценка геометрических параметров деталей с использованием метода наименьших квадратов и технологии виртуальных мер.....	119
2.8.3	Сравнительный анализ и обобщение полученных результатов.....	120
	Выводы по главе 2	123
<p style="text-align: center;">ГЛАВА 3 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ СБОРОЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ГТД</p>		
3.1.	Методика оценки геометрической точности сборочных параметров на основе моделей сопряжений поверхностей деталей и их действительных моделей	124
3.2	Формализованная постановка задачи сборки деталей.....	129
3.3	Прогнозирование геометрических параметров сопряжений поверхностей абсолютно жёстких деталей.....	134
3.3.1	Моделирование сопряжения поверхностей деталей методом совмещения	134
3.3.2	Моделирование сопряжения поверхностей деталей с использованием метода сечений.....	138
3.4	Методика оценки геометрических параметров сопряжений поверхностей деталей с учетом податливости деталей.....	143
3.5	Метод оценки параметров сопряжений поверхностей деталей на основе технологий машинного обучения	147
3.6	Метод повышения точности сборки узлов за счёт автоматизации операции пригонки деталей с использованием их действительных моделей	148
3.7	Обобщённая методика цифровой коррекции формообразования заготовок с применением их действительных моделей.....	152

Выводы по главе 3	155
ГЛАВА 4 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ВИБРАЦИЙ РОТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ	157
4.1 Разработка метода снижения неуравновешенностей роторов ГТД с помощью цифровой балансировки	158
4.2 Описание принципиальной схемы структурно-параметрической модели ротора	160
4.3 Модель предварительного уравнивания абсолютно-жестких роторов	164
4.4 Анализ конструкции ротора турбины низкого давления и причин возникновения первичных дисбалансов	177
4.5 Численная модель для оценки дисбалансов с учётом отклонения расположения собираемых деталей в статической постановке	182
4.6 Построение конечно-элементных моделей для оценки дисбалансов и вибраций роторов на основе их действительных моделей	190
4.7 Исследования зависимостей вибраций ротора от неуравновешенностей его деталей и узлов	193
4.8 Разработка модели прогнозирования параметров вибрационного состояния ротора ТНД на основе использования технологий машинного обучения	199
4.7 Выводы по главе 4	200
ГЛАВА 5 ПРАКТИКА СОЗДАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОБЛЕМНО–ОРИЕНТИРОВАННЫХ ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ СБОРКИ КОМПРЕССОРА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ГТД	202
5.2 Модель для определения оптимальных условий сборки роторов	209
5.3 Теоретико-экспериментальные исследования геометрической точности сборочных параметров компрессора низкого давления	212
5.3.1 Конструкция и технологический процесс сборки ротора	213
5.3.2 Теоретические исследования влияния геометрической точности деталей на точность сборочных параметров	215
5.3.3 Теоретико-экспериментальные исследования точности сборочных параметров	222
5.3.4 Определение рациональных условий выполнения сборки	229
5.4 Разработка рекомендаций по использованию полученных результатов на производстве	233
5.5 Оценка эффекта от внедрения предложенных теоретических решений	240
5.6 Выводы по главе 5	241

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	244
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	247
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	255
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акты внедрения результатов диссертационной работы	276
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Диаграмма IDEF0 «Прогнозирование и обеспечение показателей качества ГТД с использованием действительных моделей деталей и узлов»	282
ПРИЛОЖЕНИЕ В Моделирование и исследование параметров затяжки болтовых соединений	298
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Исследование сопряжений имитаторов деталей ротора	308
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Исследование сопряжений детали с малой жёсткостью	317
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Исследование сопряжений деталей ротора.....	325
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Апробация (верификация) метода снижения уровня вибраций роторов на экспериментальном стенде.....	337
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 Результаты статистических исследований геометрической точности деталей каскада низкого давления газотурбинного двигателя	353

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Конкурентоспособность выпускаемой продукции определяется её качеством и стоимостью производства. Важным условием обеспечения конкурентоспособности продукции является технологическое развитие предприятий. В свою очередь технологическое развитие предприятий возможно за счёт применения современного высокопроизводительного оборудования, внедрения цифровых технологий и, в немаловажной степени, повышения квалификации персонала. Большое внимание уделяется внедрению цифровых технологий, позволяющих качественно повысить технологические возможности и эффективность производства.

Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации» предусматривает повышение конкурентоспособности отечественной продукции и создаваемых технологий на основе цифровизации жизненного цикла изделий. В сфере наукоёмкого производства требуется повышение производительности труда, снижение затрат на разработку и производство продукции, что предусматривает не только «технологическое обновление промышленности», но также разработку методов и средств измерений, «создание эталонов нового поколения» (госпрограмма РФ «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности»), включаемых в технологическую цепочку создания продукции.

Решение задачи повышения эксплуатационных характеристик ГТД в том числе связано с реализацией комплекса мероприятий, в которых можно выделить два исследуемых в настоящей работе направления. Первое из них связано с прогнозированием и обеспечением геометрической точности деталей и 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 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 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 назначаемого припуска последующих операций. 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 «пробных 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 производства ГТД является наличие повышенной вибрации при стендовых испытаниях. Для выявления повышенного уровня вибрации и подготовки 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 представления 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, следует отметить, что существенное повышение технических показателей производства ГТД возможно за счёт разработки и использования комплекса цифровых моделей процессов и операций, учитывающих реальную геометрию деталей и узлов. Изложенное позволяет заключить, что тема диссертационной работы «Разработка методов создания цифровых технологических 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, а также другие. Анализ публикаций позволил сделать следующие заключения. Разработка технологических процессов производства ГТД выполняется без учёта в них реальной геометрии деталей и контактного взаимодействия их поверхностей в собранном узле. Технологические процессы сборки роторов ГТД разрабатываются без учёта взаимного влияния положения каждой деталей на уровень вибраций ротора.

Цель работы. Повышение точности и снижение трудоёмкости технологических процессов сборки роторов ГТД за счёт разработки методов для обеспечения требуемой точности сборки и снижения неуравновешенностей роторов, основанных на использовании в производственном процессе действительных моделей деталей¹, учитывающих результаты измерения их геометрии, рассчитанные контактные деформации при сборке, а также динамические параметры сборочных единиц в составе роторов.

Задачи исследования:

1. Разработка состава и основных принципов создания действительных моделей деталей и узлов для совершенствования технологий производства ГТД по повышению управляемости выполнения сборочных операций, их точности и производительности.

2. Разработка обобщённой методики создания действительных моделей деталей и узлов ГТД с учётом специфики сборочных параметров.

3. Разработка метода определения действительных геометрических параметров деталей и сборочных параметров узлов с помощью виртуальных мер (ВМ) и комплектных виртуальных сборок (КВС), которые учитывают сопряжения поверхностей объектов, то есть их макрогеометрию.

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.

¹ *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. Автоматизация операции пригонки деталей при сборке узлов с использованием действительных моделей деталей, обеспечивающая повышение точности их взаимного расположения и увеличение площади контакта поверхностей.

6. Разработка метода снижения неуравновешенностей роторов ГТД с помощью балансировки на цифровой модели, применяемой 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 возмущающих воздействий, возникающих от их неуравновешенностей.

7. Разработка и верификация модели определения рациональных угловых положений деталей ротора 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 выявленными и учтёнными 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 геометрических параметров деталей и сборочных параметров узлов с помощью ВМ и КВС, отличающийся от существующих методов анализом возможных сопряжений контактных поверхностей измеряемых объектов, которые определяют особенности формируемых размерных связей с учётом деформаций деталей в ходе их контактного взаимодействия при сборке.

3. Разработан метод оценки параметров сопряжений деталей и узлов для расчётов размерных связей, отличающийся от известных методов использованием действительных моделей геометрических объектов, позволяющий определять их деформации при сборке с 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 цифровой модели, отличающийся от существующих методов

способом расчёта их оптимального положения в окружном направлении за счёт обеспечения противонаправленности возмущающих воздействий от неуравновешенностей деталей и сборочных единиц.

б. Разработаны алгоритм и модель определения рациональных условий сборки роторов ГТД с целью повышения точности и снижения трудоёмкости сборки, отличающиеся от существующих решений возможностью комплексного учёта требований к точности сборочных параметров и величине дисбаланса 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 для прогнозирования параметров взаимодействия контактирующих поверхностей деталей, применяемые для выполнения расчётов их размерных связей. Разработан метод снижения уровня вибраций роторов ГТД с помощью балансировки на цифровой модели, в основе которого заложен способ обеспечения противонаправленности возмущающего 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 и геометрической точности технологических операций в производстве, снижение 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 и управление производством, технологические процессы и специальное оборудование для формообразования и обработки деталей двигателей, их защита – паспорта научной специальности 2.5.15 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов (технические науки).

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, реализующих расчеты напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов: «NX» и «ANSYS». Экспериментальные исследования выполнялись с использованием поверенных средств измерения и аттестованного испытательного оборудования, а также разработанных разгонно-балансировочного 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 летательных аппаратов.

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 геометрических параметров деталей и сборочных параметров узлов с помощью ВМ и КВС, позволяющий учитывать параметры сопряжений контактных поверхностей измеряемых объектов.

3. Метод 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 цифровой модели, учитывающей погрешности сборочных параметров, за счёт обеспечения противоположности возмущающего воздействия от неуравновешенностей

деталей и сборочных единиц, путём выбора оптимального положения деталей в окружном направлении.

6. Модель определения рациональных условий сборки узлов (рационального положения собираемых деталей в окружном направлении), в которой предварительно используется метод машинного обучения для сужения границ области решения, а затем производится уточнение определяемых параметров с применением численных моделей сопряжения деталей.

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

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 поверенных средств измерения, аттестованного 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 премии 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 расчёта 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 28.02.2024 г.) при выполнении балансировки ротора методом двух сборок; АО «Металлист-Самара» (акт от 26.02.2024 г.) при снижении неуравновешенностей ротора НД в ходе его балансировки с использованием действительных моделей узлов; ООО «Газпром трансгаз Самара» (акт от 12.02.2024 г.) при создании 3D моделей и улучшении технологии сборки и ремонта ротора и камеры сгорания ГТД на основе использования результатов измерений. Результаты работы внедрены в учебный процесс.

Разработка теоретических положений, изложенных в диссертационной работе, проводилась по договорам и грантам: «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, включённых 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 361 страницу, 156 рисунков и 39 таблиц.

ГЛАВА 1 ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УЗЛОВ ГТД

1.1 Анализ состояния проблемы повышения технических показателей узлов ГТД

Производство авиационных газотурбинных двигателей является одной из наиболее сложных и наукоемких отраслей машиностроения. Помимо России только США, Англия и Франция владеют полным циклом создания и выпуска авиационных газотурбинных двигателей, производство которых, базирующееся на наиболее передовых технологиях, является одной из наиболее динамичных отраслей машиностроения, обеспечивающей интенсивное развитие других смежных отраслей, где необходимы компактные и мобильные энергетические установки, электроэнергетики, водного и наземного транспорта, газовой, нефтяной промышленности и других [12, 75].

Ключевой задачей авиадвигателестроения является повышение технических показателей качества производства ГТД при снижении их стоимости. Изделия двигателестроения отвечают самым высоким требованиям по энергетической эффективности, минимальной массе и надежности, что достигается на основе использования новейших специальных материалов, применения новых методов упрочняющей обработки и специальных покрытий [6, 92, 75].

Отличительными особенностями эксплуатации газотурбинных двигателей являются высокая силовая и температурная нагруженность элементов конструкций и значительные градиенты температур в различных зонах изделий, что обуславливает повышенные требования к эксплуатационным свойствам и служебным характеристикам деталей [202]. Основными материалами, используемыми в настоящее время для изготовления двигателей, являются: высокопрочные стали, титановые сплавы и сплавы на никелевой основе, имеющие высокие значения удельной прочности в заданном диапазоне рабочих температур. Технология изготовления деталей во многом определяет комплекс их эксплуатационных характеристик, обуславливающий долговечность, вероятность безотказной работы и технический ресурс узлов, агрегатов и изделия в целом. Качество поверхностного слоя обеспечивается используемыми технологиями обработки, особую роль в которых играют специальные технологии обработки.

Вопросы надежности и увеличения ресурса газотурбинных двигателей изложены в работах [43, 44], в них описаны современные методы контроля и технической диагностики. Большое внимание уделено ремонту и восстановлению работоспособности основных

деталей и узлов двигателя, испытаниям газотурбинных двигателей на серийном заводе и ремонтном предприятии. Эффективность работы газотурбинных двигателей и энергетических установок определяется их надежностью и рядом технических показателей. Среди показателей надежности выделяют особую роль показателя безотказности, долговечности и сохраняемости [4]. Ключевые показатели качества авиационных двигателей и энергетических установок – тяга (механическая мощность), расход топлива, ресурс, надежность – в значительной степени зависят от достигнутой геометрической точности деталей и сборочных единиц. По этой причине обеспечение показателей качества неразрывно связано с обеспечением точности производства изделий.

Имеет место качественное изменение в создании инновационных технологий производства и ремонта в авиадвигателестроении. К числу таких технологий, которые называют критическими, относят [75]:

- технологии высокоточного и производительного контроля геометрических параметров деталей, узлов и изделий с использованием координатно-измерительных машин, машин технического зрения и др.;

- технологии сборки узлов и изделий, обеспечивающие достижение требуемой точности размерных связей.

Качественное изменение в создании инновационных технологий производства и ремонта в авиадвигателестроении может быть достигнуто за счёт разработки и использования цифровых технологий. Наблюдается тенденция перехода к созданию так называемых «Фабрик будущего», в которых предполагается широкое внедрение цифровых технологий в различные этапы жизненного цикла изделия [89]. В зависимости от охватываемых этапов жизненного цикла продукции различают понятия: «Цифровая фабрика», «Умная фабрика» и «Виртуальная фабрика» [89]. Решение проблемы повышения технических показателей качества производства ГТД тесно связано с созданием Цифровой и Умной фабрик. На этапах проектирования изделия и планирования производства Цифровых фабрик предполагается широкое использование технологий цифрового проектирования и моделирования CAD, CAE, CAM, Smart Big Data (управления расчётными данными) и другие технологии. Этапы пусконаладочных работ и серийного производства Умной фабрики включают использование MES систем (Manufacturing Execution System, Система Управления Производственными Процессами), датчиков и сенсоров, промышленного интернета и других технологий.

Развитие современных вычислительных возможностей компьютерной техники создаёт возможность широкого использования в Фабриках будущего технологий цифрового предсказательного моделирования, которые являются сквозными для ряда

критических технологий. Предполагается создание и использование так называемых цифровых двойников процессов, изделий и других объектов. На сегодняшний день существует множество определений понятия «Цифровой двойник», приведём одно из них:

Цифровой двойник – это цифровая копия живого или неживого физического объекта. Соединяя физический и виртуальный мир, данные передаются плавно, позволяя виртуальному объекту существовать одновременно с физическим объектом [174].

В контексте критических технологий производства авиадвигателей, цифровые двойники технологических процессов должны позволять прогнозировать их основные параметры и позволять осуществлять оптимальное управление производственными процессами. Применительно к производимым изделиям, цифровые двойники должны позволять прогнозировать их основные параметры и предоставлять возможности по выбору и принятию конструктивных и иных решений. Можно отметить, что цифровой двойник является совокупностью множества различных взаимодействующих между собой моделей объектов и процессов. При создании цифровых двойников технологических процессов и изделий необходимо учитывать их специфику. По этой причине существенным является развитие методов, моделей и алгоритмов, ориентированных на создание цифровых двойников технологических процессов и изделий, позволяющих эффективно и с требуемой точностью решать поставленные задачи. Использование цифровых двойников производимых изделий в Цифровой и Умной фабриках позволит:

- определять уровень технических требований, обеспечивающих требуемое качество изделий;
- обнаруживать отклонения по техническим показателям качества изделий до выполнения дорогостоящих натурных испытаний;
- формировать рекомендации, обеспечивающие достижение заданного уровня технических показателей качества изделий до этапа его сборки в условиях производства и ремонта с учётом индивидуальных особенностей каждого изделия;
- осуществлять постоянный мониторинг важных показателей производственных процессов в Цифровых и Умных фабриках, включающих стабильность достигаемых технических показателей качества изделий, устойчивость к различным возмущениям и управляемость.

Применительно к производству авиационных газотурбинных двигателей, цифровые двойники изделий должны позволять прогнозировать их технические показатели качества в зависимости от конструкции и индивидуальных особенностей. Индивидуальные особенности изделий могут характеризоваться рядом параметров, отражающих состояние деталей и узлов: конкретными размерными характеристиками и распределением центров

масс, существующим напряжённо-деформированным состоянием, физико-химическим составом материалов, микро- и макроструктурой материала и прочее. Вариация названных параметров оказывает значительное влияние на технические показатели качества производимых изделий. Прогнозирование технических показателей качества создаёт необходимость разработки совокупности математических моделей и их реализацию в программных системах. Использование разработанных математических моделей позволит решать и обратную задачу, заключающуюся в определении требуемых уровней параметров, характеризующих индивидуальные особенности и гарантирующих заданные уровни технических показателей качества изделия. В производственных условиях цифровые двойники изделий должны иметь возможность выполнять следующие функции: автоматизированный сбор необходимых данных, формирование сигналов, предупреждающих вероятность недостаточного уровня технических показателей качества изделий, формирование рекомендаций по своевременной коррекции индивидуальных параметров изделий для достижения заданного уровня их качества.

Значимой производственной проблемой является обеспечение предельного уровня вибрации авиационных газотурбинных двигателей. В следующем подразделе приведен анализ статистических данных по возникновению повышенной вибрации серийно производимого изделия.

1.2 Статистический анализ причин возникновения и путей снижения вибрации изделия

Исходными данными для выполнения статистического анализа являются результаты кратковременных стендовых испытаний серийно производимого изделия, а также информация по выявленным расхождениям в ходе их изготовления и сборки. Информация о съёмах изделий с кратковременных испытаний по причинам, вызвавшим повышенные вибрации, в привязке к узлам приведена на рисунке 1.1 (на следующей странице).

Основными причинами съема изделий из-за повышенной вибрации являются:

- несоответствие посадочных диаметров деталей, вызывающее нарушение технических условий (ТУ) посадок узлов;
- повышенный остаточный дисбаланс узлов;
- повышенные биения узлов;

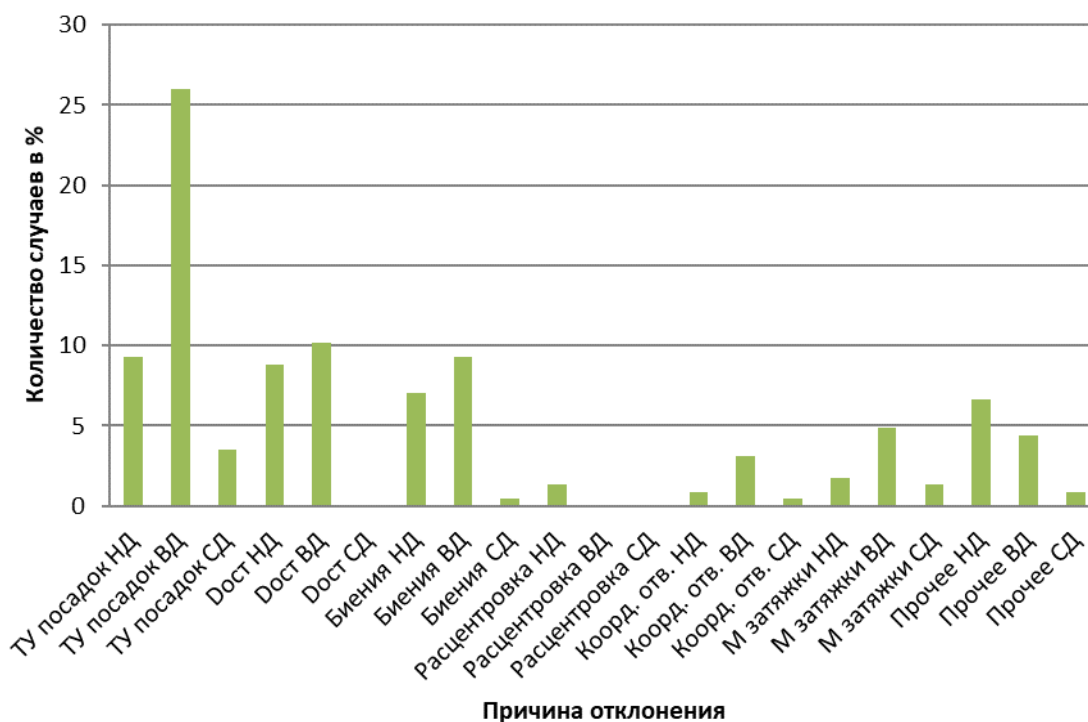


Рисунок 1.1 – Причины повышенных вибраций изделий

- неблагоприятные сочетания геометрических параметров и остаточных дисбалансов входящих деталей и узлов;
- несоблюдения ТУ при сборке;
- отклонения формы и расположения поверхностей, не соответствующие ТУ;
- прочие причины.

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что проблемным местом являются каскады низкого и высокого давлений. Основной причиной повышенной вибрации в компрессорах и турбинах является дисбаланс составляющих узлов и деталей. Известно, что повышенная вибрация узлов возникает из-за дисбаланса по трём причинам: конструктивным, технологическим и эксплуатационным [67, 68]. В общем количестве съёмов изделий с кратковременных испытаний из-за повышенных вибраций на конструктивные, технологические и эксплуатационные причины приходится соответственно 4%, 35% и 12%.

Множество приведенных причин требуют более внимательного отношения к выдерживанию размерных параметров деталей и узлов в ходе механической обработки, а также их комплектования на этапе сборки. Однако имеются причины, требующие выполнения глубокого анализа, особенно в части причины: неблагоприятное сочетание

геометрических параметров и остаточных дисбалансов входящих деталей и узлов. Можно предложить сделать мероприятия, направленные на снижение уровня вибрации роторов:

– повышение значимости контроля и использования его результатов при изготовлении деталей, выполнении сборочных работ, включая комплектование деталей и их доработку методами механической обработки;

– разработка цифровых моделей, позволяющих решать задачи оценки уровня геометрической точности сборочных параметров роторов, а также определять условия их сборки, способствующие обеспечению заданных требований конструкторской документации;

– разработка цифровых моделей, позволяющих решать задачи оценки уровня вибраций изделий при учёте их геометрической точности и уровня дисбалансов, а также определять параметры сборки, способствующие обеспечению установленных требований к ним.

В последующих подразделах будут последовательно рассматриваться области исследований, направленные на обеспечение точности измерений геометрических параметров деталей и узлов, геометрической точности сборки узлов и обеспечения уровня дисбалансов изделий.

1.3 Анализ состояния проблемы обеспечения точности измерений геометрии деталей и узлов ГТД

Возможным мероприятием, направленным на снижение вибраций изделий, является повышение значимости контроля и использования его результатов при изготовлении деталей и выполнении сборочных работ. Результаты геометрических измерений могут быть использованы при комплектовании деталей и их доработки методами механической обработки в ходе выполнения сборки узлов. Поскольку результаты контроля геометрии заготовок, деталей и узлов оказывают существенное влияние на размерные параметры технологических операций, то измерения должны характеризоваться требуемым уровнем точности. Обеспечение заданной точности геометрических измерений объектов включает комплекс мероприятий, к важнейшим из которых можно отнести: поверку средств измерений, разработку и аттестацию методик измерений, разработку технологических инструкций по выполнению измерений, обучение профильных сотрудников, проведение исследований погрешностей измерений геометрических параметров измеряемых объектов, разработку моделей и программного обеспечения для обработки результатов измерений и другие.

Рассмотрим состояние вопроса, посвящённого исследованиям точности измерений геометрии деталей и узлов. Подходы к описанию и различные модели процесса координатных измерений геометрических параметров объектов освещались в трудах многих исследователей: В.А. Гапшиса, А.Ю. Каспарайтиса [20], В.Г. Лысенко [70], Д.В. Гоголева [21], О.В. Захарова [250, 251], R.G. Wilhelml, R. Hocken, H. Schwenke [192], J.P. Kruth, N. Van Gestel, P. Bleys, F. Welkenhuyzen [155] и других.

На процесс координатных измерений геометрических параметров объектов действует множество источников неопределённостей (погрешностей). Укрупнённо совокупность факторов, оказывающих влияние на суммарную неопределённость измерений геометрических параметров объектов, представлена в работах [20, 192 и др.]. К ним относятся:

- 1) погрешности, вносимые средством координатных измерений;
- 2) параметры методики измерения;
- 3) особенности измеряемых деталей (вид и характер погрешности формы измеряемых поверхностей, обусловленные деформациями от зажимных механизмов, качеством поверхностного слоя, релаксациями внутренних напряжений в поверхностном слое деталей, доступностью измерительных наконечников для выполнения измерений);
- 4) алгоритмы обработки координат точек, получаемых в процессе измерения;
- 5) внешние факторы (влияние температуры, вибраций, влажности, засоренности).

На рисунке 1.2 (на следующей странице) приведены факторы, влияющие на погрешность измерения геометрических параметров КИМ [192].

Представление неопределённостей измерений выполняется с использованием точечных и интервальных оценок. Точечные оценки включают среднеарифметическое \bar{X} и среднеквадратическое отклонение σ . Интервальные оценки определяются с использованием точечных и содержат указание уровня доверительной вероятности p , а также количества степеней свободы ν_{eff} с использованием t -распределения:

$$(\bar{X} - t_{p, \nu_{eff}} \sigma; \bar{X} + t_{p, \nu_{eff}} \sigma) . \quad (1.1)$$

Определение параметров, характеризующих неопределённости измерений, может выполняться экспериментальным и расчётным методами. Экспериментальные исследования предполагают выполнение измерений эталонов с заранее известными параметрами. Оценка неопределённостей измерений выполняется на основе сравнения результатов измерений эталонов с их ранее аттестованными параметрами.



Рисунок 1.2 – Факторы, влияющие на погрешность измерения геометрических параметров КИМ [192]

Экспериментальная оценка неопределённостей сопряжена с рядом трудностей, к которым относятся высокая стоимость и сложность производства эталонов, а также значительная трудоёмкость выполнения их измерений. Теоретические исследования предполагают создание моделей процесса измерений и выполнение его моделирования при разных исходных условиях. Совокупность математических методов, моделей, алгоритмов и программных модулей, предназначенных для имитирования процесса измерения геометрии объектов, объединяются названием «Виртуальная координатно-измерительная машина» (ВКИМ) [186, 122]. Рисунок 1.3 (на следующей странице) содержит укрупнённую диаграмму исследований с использованием ВКИМ, включающей восемь элементов [186, 122].

Диаграмма показывает процесс экспериментальных исследований неопределённостей измерений, представленный элементами 1, 2, 3 и 4 и связанный черными стрелками. Процесс теоретических исследований неопределённостей измерений с использованием математических моделей представлен элементами 5, 5а, 6, 7 и 8, его связи отражены на рисунке 1.3 серыми стрелками. Рассмотрим последовательность выполнения теоретико-экспериментальных исследований.

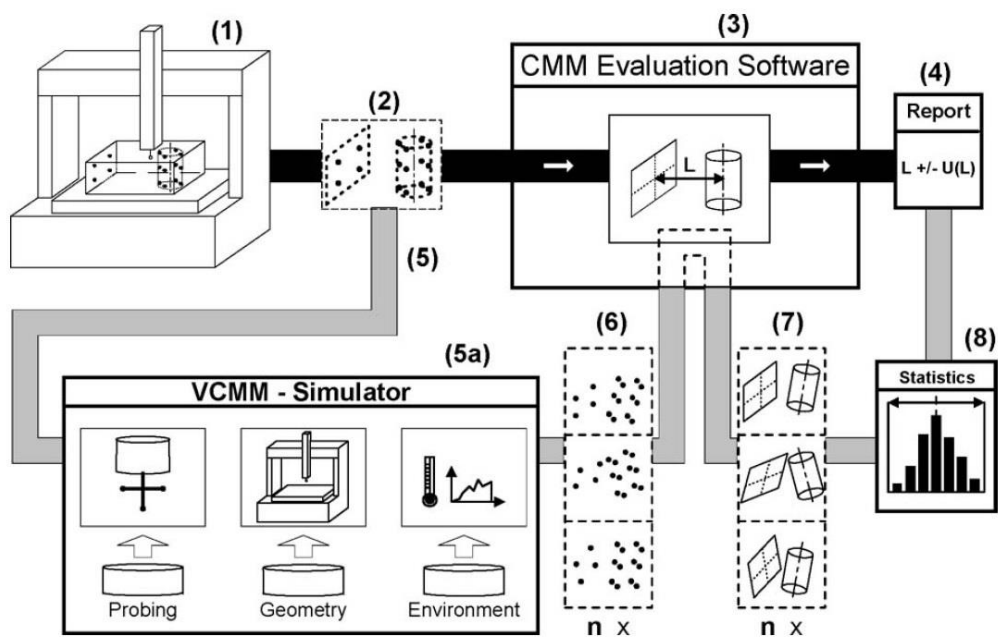


Рисунок 1.3 – Подход «Виртуальная координатно-измерительная машина»

Выполнение экспериментальных исследований включает измерение координат точек реальных поверхностей объектов или их эталонов на координатно-измерительных машинах *1*. Массивы координат измеренных точек поверхностей деталей *2* направляются в программное обеспечение *3*, предназначенное для управления процессом измерений, обработки их результатов и формирования протокола *4* об оценках геометрических параметров, а также неопределённостей измерений.

Теоретическое моделирование процесса координатных измерений предполагает формирование координат измеряемых точек *6* поверхностей объектов или их эталонов в блоке *5a*. В качестве учитываемых в блоке *5a* факторов могут выступать неопределённости, вносимые датчиками, кинематической системой измерительных машин, внешней средой и другими. Блок *5a* позволяет учитывать факторы *1, 2, 3, 5*, нумерация которых принята выше в данном подразделе. После обработки массивов точек *6* в программном обеспечении *3* формируются массивы параметров заменяющих элементов *7*. Оцениваются статистические параметры *8* на основе сформированных массивов параметров заменяющих элементов *7*. Полученные статистические параметры *8* используются для формирования выводов и заключений. Моделирование процесса измерения осуществляется с помощью метода Монте-Карло. Реализуется многократное моделирование измерения координат точек поверхности с генерированием погрешности, распределенной по известным законам распределения. Метод Монте-Карло применяется из-за вероятностного характера действующих факторов и сложности геометрической постановки задач, что зачастую не

позволяет производить прямое аналитическое описание процесса. Теоретические положения и порядок использования метода Монте-Карло применительно к любой области метрологии приведены во множестве источников, в частности, в [45, 105 и др.]. Особенности использования метода Монте-Карло описаны в [134]. Законодательная база использования данного метода закреплена в [28].

Зарубежными и отечественными учеными проведено достаточно много работ, реализующих подход ВКИМ, в основе которого используется метод Монте-Карло [49, 197 и др.].

Работы, направленные на исследование погрешностей в области точности контроля геометрических параметров можно условно разделить на 3 группы. К первой группе относятся работы, исследующие влияние следующих факторов: погрешностей, вносимых средством координатных измерений; параметров методики измерения; алгоритмов обработки координат точек. Ко второй группе относятся работы, исследующие главным образом влияние вида и характера погрешности формы измеряемых поверхностей, обусловленных деформациями от зажимных механизмов, качеством поверхностного слоя, доступностью измерительных наконечников для измерения. К третьей группе можно отнести работы, направленные на контроль сложных поверхностей. Рассмотрим работы по данным группам.

1.3.1 Исследование влияния измерительных погрешностей средств координатных измерений на погрешность измерения геометрических параметров

Важнейшим мероприятием, направленным на обеспечение заданной точности геометрических измерений объектов, является оценка и поверка неопределённостей измерения КИМ, рассматриваемые в работах [39, 20, 134, 49, 197, 252].

Теоретические положения обеспечения единства измерения геометрических параметров обработанных поверхностей рассматривались в работе [70]. Приведены модели и выполнен анализ погрешностей компонентов КИМ (датчика, направляющих). Получены модели и проведен анализ погрешностей контроля геометрических параметров заменяющих элементов «плоскость», «цилиндр» в зависимости от величин инструментальных погрешностей КИМ.

Рассмотрены вопросы исследования и разработки методов и средств метрологического обеспечения координатных измерений геометрических параметров обработанных поверхностей.

В работе [70] также рассмотрены вопросы обеспечения единства измерений эталонных деталей (зубчатых колес, зеркал, макета корабля «Буран»). Однако не были проведены исследования по влиянию особенностей измеряемых деталей, а именно, определению последовательности и условий выполнения измерений, обеспечивающих достоверность при контроле рассмотренных деталей с учетом характера погрешностей формы данных поверхностей. Данный фактор значительно влияет на достоверность контроля геометрических параметров. Другими словами, в работе рассматривались вопросы измерения поверхностей, не имеющих погрешности формы (эталонных, прецизионных деталей). При измерении серийных деталей контролируемые поверхности имеют погрешность формы. Влияние погрешности формы на погрешность измерения необходимо оценить дополнительными исследованиями.

В работе [204] исследуется способ повышения точности измерений на координатно-измерительных машинах за счет нового способа их калибровки. Также приводится систематизация и классификация погрешностей, возникающих в технической системе КИМ.

В работе [203] анализируется влияние инструментальных погрешностей КИМ на контроль геометрических параметров заменяющих элементов («линия», «окружность», «цилиндр»). Рассматривались параметры элементов: координаты точки центра тяжести, угол расположения оси, величина, характеризующая размер (например, для элемента «окружность» – радиус), отклонения формы (прямолинейность, плоскостность, круглость, цилиндричность). Проведен анализ влияния типа алгоритма для обработки массива точек. Рассматривались два типа. Первый – на основе метода наименьших квадратов, второй – исходя из условия минимальной зоны заменяющего элемента номинальной формы. В процессе моделирования инструментальная погрешность КИМ моделировалась двумя законами распределения: Гаусса и равномерным.

Погрешности измерения радиуса сферических поверхностей, в зависимости от количества измеряемых точек и угла охвата, рассматривались в работе [198]. Инструментальная погрешность КИМ принималась распределенной по закону Гаусса. Окончательное выражение погрешности формировалось в соответствии с рекомендациями, приведенными в [73, 143]. Проверка достоверности разработанных моделей осуществлялась с помощью прибора 3D Form Talysurf.

Исследование погрешностей измерения сферичности проводилось в работе [126]. Рассматривалось влияние способа расположения контролируемых точек по поверхности (случайный, систематический, рядами Хаммерсли), количества контролируемых точек, разные способы получения параметров геометрии заменяющих элементов.

В работах [65, 108, 169] показана проблема значительной зависимости погрешностей измерений цилиндрических поверхностей от измеряемого угла охвата цилиндрических поверхностей в диапазонах малых углов. Данные измерительные задачи также называются плохо обусловленными.

В статье [39] приводится сравнительный анализ способов измерения концевых мер длины на координатно-измерительных машинах с целью выявления оптимального для различных задач, показано влияние способа измерения на точность измерений. Работа полезна для случаев разработки методик измерения линейных параметров поверхностей, имеющих малое (менее 2...3 мкм) отклонение от плоскостности.

Другой работой, посвященной исследованию данной проблемы, является [108]. В ней приводится новый метод улучшения точности измерений цилиндрических поверхностей с малыми угловыми секторами. Данный метод основан на модификации целевой функции, на основе которой производится идентификация параметров цилиндрической поверхности. Он назван методом номинальных значений.

Исследования, полученные в данных работах полезны для учета погрешностей контроля геометрических параметров конструктивных элементов деталей «окружность» и «цилиндр» по их малой части. Это актуально при контроле фасок, радиусных переходов между поверхностями, радиусных желобков и других элементов конструкций, где необходимо обеспечить сравнительно высокую точность.

В рассмотренных работах содержатся результаты исследований, направленные на изучение влияния инструментальных погрешностей средств измерений при измерении геометрических параметров объектов. Существенное влияние на неопределённости измерений геометрических параметров оказывают отклонения формы поверхностей, которые не учитывались при рассмотрении в вышеприведенных работах. Последующие рассматриваемые работы будут содержать исследования влияния отклонений формы поверхностей на неопределённости их измерений.

1.3.2 Исследование влияния погрешностей формы поверхностей на погрешность измерения геометрических параметров

Существует ряд работ, посвященных исследованию измерения цилиндрических поверхностей [205, 206, 207, 208, 209]. В работах [207, 209, 210,] проводились исследования измерений геометрических параметров цилиндрических поверхностей заменяющего элемента «окружность». Учитывались типичные отклонения от круглости.

В [211] исследовалось влияние количества контролируемых точек, способа их распределения по поверхности (равномерное, случайное, Хаммерсли и Хелтона-Зарембы), метод обработки массива точек (метод наименьших квадратов и минимальной зоны) на погрешность выявления отклонения от круглости. Погрешность выражалась в виде относительного отклонения, как отношение выявленного отклонения от круглости к действительному значению (что характеризует достоверность выявления круглости) и среднеквадратического отклонения круглости (характеризует стабильность результата). Исследовался ряд профилей, имеющих трехгранную огранку с различными амплитудами, что характерно для деталей, полученных точением в трёхкулачковом патроне. Исследования показали, что вид распределения точек по поверхности оказывает незначительное влияние на результат измерения, получены регрессионные зависимости относительного и среднеквадратического отклонений от количества контролируемых точек. Работа полезна для разработки методик измерения отклонения от круглости колец, имеющих трёхгранную огранку.

В работе [207] исследовалось влияние количества контролируемых точек, способа их расположения по поверхности для геометрических параметров заменяющего элемента «окружность»: радиус, положение и отклонение от круглости. Рассматривались профили, имеющие огранку 2 (овальность), 3 (трехгранный) до 10. Сформированы рекомендации для выбора рационального количества измеряемых точек при контроле данных профилей, которые обеспечивают наилучшее совместное выявление рассматриваемых геометрических параметров.

Работа [209] посвящена исследованию измерения цилиндрических поверхностей заменяющего элемента «цилиндр». Рассматривались влияние количества измеряемых точек, способа их расположения и метода обработки массива точек на оценку отклонения от цилиндричности. Исследования проводились на серии отверстий, полученных различными методами обработки: сверлением, развертыванием и зенкерованием. В ходе реализации данных методов обработки формировались систематические отклонения от цилиндричности, в частности огранка, конусность, непрямолинейность оси. Для описания и синтеза поверхностей использовались ряды Фурье и полиномы Чебышева.

В ходе исследований получены рекомендации по выбору условий измерения отклонения от цилиндричности поверхностей деталей, которые будут учитываться при выполнении диссертационных исследований. Детали авиационных двигателей характеризуются малой жёсткостью, что в процессе их изготовления и сборки приводит к формированию специфических отклонений формы поверхностей, которые необходимо рассматривать дополнительно.

1.3.3 Особенности моделирования процесса координатных измерений

Моделирование процесса геометрических измерений объектов должно учитывать особенности реальных поверхностей. Исходные результаты измерений, формируемые координатно-измерительными машинами, представляются в виде координат точек поверхностей объектов. Сложной и важнейшей задачей является математическая обработка измеренных координат точек, в ходе которой решаются две крупные задачи:

- подготавливаются массивы координат точек, соответствующие отдельным поверхностям объектов;

- определяются геометрические параметры, характеризующие измеряемый объект в целом и отдельно его поверхности.

Обработка результатов измерений выполняется с использованием различных подходов и реализующих их моделей и алгоритмов, которые должны с достаточной достоверностью характеризовать реальную геометрию объектов. Термин «реальная геометрия» играет важную роль в обработке результатов измерений, технологии производства деталей и узлов. Известны следующие определения термина реальная геометрия.

Реальная геометрия детали – совокупность поверхностей, ограничивающих деталь и отделяющих ее от окружающей среды [53]. Реальную геометрию детали получают после ее изготовления из заготовок по выбранному технологическому процессу на выбранном оборудовании с помощью выбранных средств технологического оснащения (СТО): технологической оснастки, приспособлений, инструментов [53]. Реальная геометрия детали является следствием технологии и средств технологического оснащения, что и должно учитываться при проектировании её облика. Выбранными средствами измерения в системе координат системы измерения определяют реальную геометрию детали.

Обработанная (реальная) поверхность является ключевой связью между деталью, производственным процессом, в результате которого он был создан, и ожидаемыми функциональными возможностями [166, 191].

В работе [53] Л.А. Кашуба формулирует вопросы, связанные с обработкой результатов измерений геометрии деталей:

- чем реальная геометрия детали отличается от номинальной геометрии?
- что выбрать за начало отсчета, от которого вычисляются отклонения формы реальной поверхности?
- каким образом обеспечить однозначное определение отклонения геометрии поверхности?

– как построить собственные системы координат номинальной и реальной поверхностей, ограничивающих объём детали?

Основным способом определения геометрических параметров деталей является использование правила «средних элементов». Использование такого правила позволяет обеспечить однозначное определение геометрических параметров, способствует уменьшению влияния погрешностей измерений.

В работе Л.А. Кашубы [53] предлагается обработка результатов измерений таким образом, чтобы отклонение точек реальной геометрии поверхностей, представленных в системе координат системы измерения, определялось по нормали к номинальной геометрии, что достигается уточнением расположения собственной системы координат каждой из номинальных поверхностей деталей относительно системы координат системы измерения. Однозначное закрепление положения собственной системы координат элемента среди точек, принадлежащих этому элементу в системе координат системы измерения, выполняется с использованием «средних элементов» [24]. Поиск расположения среднего элемента и его системы координат среди измеренных точек, принадлежащих реальной поверхности детали, аналогичен поиску результатов ортогональной регрессии [53, 40, 109] к поверхности, имеющей номинальную форму. Однозначное расположение среднего элемента может уточняться с использованием реперных точек.

Оценка результатов геометрических измерений деталей и узлов не должна противоречить основам теории взаимозаменяемости. При изложении основ взаимозаменяемости приведено понятие «предельные размеры», которое носит название принципа Тейлора и зафиксировано в ряде международных документов, например, в рекомендациях ИСО Р1938–71. ГОСТ 25346–82 (СТ СЭВ 145–75) оно описывает названный принцип следующим образом:

«Для отверстий диаметр наибольшего правильного воображаемого цилиндра, который может быть вписан в отверстие так, чтобы плотно контактировать с наиболее выступающими точками поверхности (размер сопрягаемой детали идеальной геометрической формы, прилегающей к отверстию без зазора), не должен быть меньше, чем проходной предел размера. Дополнительно наибольший диаметр в любом месте отверстия не должен превышать непроходного предела размера». Аналогична этому формулировка для валов.

Проверка выполнения описанного условия возможна методом непосредственного контроля с использованием двух предельных калибров, один из которых, проходной, является комплексным и представляет собой прототип сопрягаемой детали, а другой, непроходной – элементный (например, при контроле отверстия – штихмасс). Такое

сочетание калибров диктуется различием физической природы границ поля допуска [212]. Контроль с помощью калибров является арбитражным и обычно включает небольшое число пробных сопряжений, полагаясь на так называемый «постулат гладкости». Суть названного принципа состоит в предположении, что любая регулярная технология накладывает более или менее жёсткие связи на взаимное расположение близких точек обрабатываемой поверхности. Поэтому проверка размера одного участка позволяет с некоторой вероятностью судить и о размерах соседних участков [213].

Рассмотрим координатные измерения в контексте возможности реализации понятия «предельные размеры». Координаты измеренных точек поверхностей не могут быть непосредственно сопоставлены с предельными образами, материализуемыми калибрами (например, цилиндром и отрезком). В соответствии с термином «предельные размеры» при имитировании контроля поверхности по проходному размеру с помощью калибров, необходимо измерить координаты большой совокупности точек поверхности, численно вписать в нее прилегающий цилиндр, определить его диаметр и сравнить с предельным значением. Даже с учетом постулата гладкости решение такой задачи возможно при измерении достаточно значительного количества точек и формирования моделей, приближающихся по достоверности к реальным поверхностям, что требует заметных затрат времени на вычисления. При контроле непроходного размера цилиндра каждое максимальное значение размера в плоскости продольного сечения необходимо сравнивать с предельным показанием. На практике для реализации этого требования необходимо выполнение значительного количества измерений.

С целью преодоления названных сложностей используется понятие средней поверхности, численно определяемой по достаточному множеству точек измерения на КИМ [214]. Такая трактовка не совпадает с принципом Тейлора как по проходной, так и по непроходной границе. Однако обеспечивается определенность, однозначность, а в ряде случаев допускаемые ею отступления от этого принципа могут оказаться практически несущественными.

Использование метода средних поверхностей при обеспечении взаимозаменяемости деталей и узлов в ряде случаев может приводить к неточным оценкам параметров формирующихся посадок, что обуславливается следующими причинами:

- недостаточной жёсткостью деталей и узлов, приводящей к существенным деформациям в процессе их сборки;
- сопряжения деталей и узлов выполняются одновременно по ряду поверхностей, что приводит к их сложному пространственному расположению;

– отклонения формы поверхностей деталей и узлов являются существенными по отношению к заданным требованиям по точности собираемого узла.

В версии международного стандарта ИСО 286–1 (опубликованного в 1988 году) для интерпретации размера размерного элемента по умолчанию применялось требование прилегания, размер по сопряжению ограничен пределом максимума материала, а любой местный размер ограничен пределом минимума материала [25]. Положения стандарта ISO/R1938:1971 [215] изменили эту интерпретацию на правило двухточечного измерения, предписывающего то, что любой местный размер ограничен верхним и нижним предельными размерами. Это означает, что при задании допуска размера по умолчанию, на отклонения формы теперь не накладывается каких-либо ограничений [30].

В тех случаях, когда установления допуска на размер согласно международному стандарту ИСО 286-1:2010 оказывается недостаточно для обеспечения выполнения посадкой своего функционального назначения, могут быть дополнительно установлены требование прилегания согласно стандарту [25], допуски геометрической формы, а также требования к шероховатости поверхности.

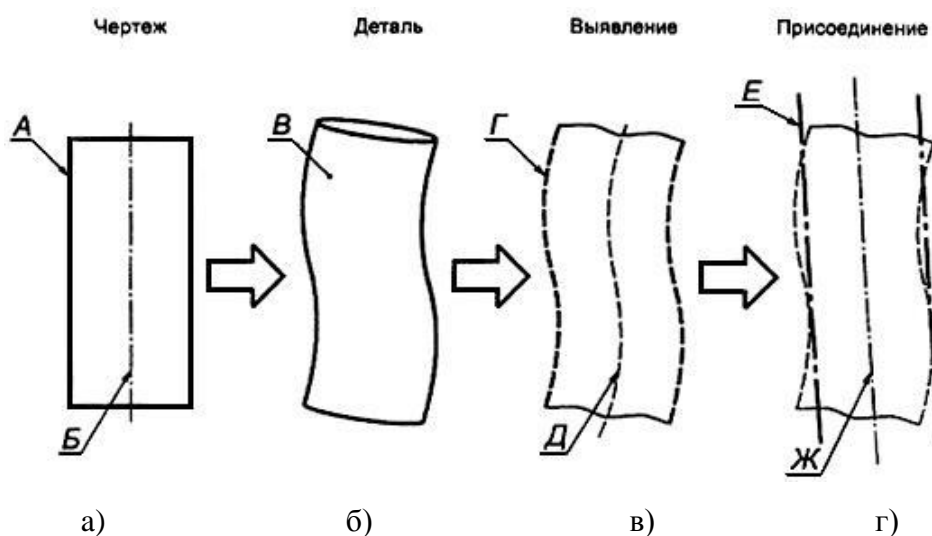
Действующие на настоящий момент основные нормы взаимозаменяемости приведены в ГОСТ 25346-2013 (ISO 286-1:2010) [25], в котором используются понятия «действительный размер» и «присоединенный полный элемент» «размерный элемент» и «полный номинальный элемент».

Действительный размер – это размер присоединенного полного элемента.

Присоединенный полный элемент – это полный элемент правильной формы, присоединенный (совмещенный) к выявленному полному элементу при соблюдении согласованных условий [25]. Действительный размер получают путем измерения. Таким образом, выявление действительного размера определяется присоединением (совмещением) к выявленному полному элементу. Под размерным элементом (feature of size) понимается геометрическая форма, определяемая линейным или угловым размером (ГОСТ 31254) [26].

Размерными элементами могут быть цилиндр, сфера, две параллельные противоположащие плоскости. В предыдущих версиях стандартов ISO 286-1:2010 [215] и [170], термины «гладкая деталь» и «гладкий элемент детали» применялись примерно в том же значении, что и термин «размерный элемент». Положения стандарта [215] распространяются только на такие, определяемые линейным размером, размерные элементы как цилиндр и две параллельные противоположащие плоскости.

Порядок выявления действительного размера путём присоединения (совмещения) к выявленному полному элементу (ГОСТ 31254-2004 [26]) проиллюстрирован на рисунке 1.4 с соответствующими введёнными терминами.



А – номинальный полный элемент; Б – номинальный производный элемент; В – реальный элемент; Г – выявленный полный элемент; Д – выявленный производный элемент; Е – присоединенный полный элемент; Ж – присоединенный производный элемент

Рисунок 1.4 – Взаимосвязь определений геометрических элементов по ГОСТ 31254:

а) чертёж; б) деталь; в) выявление; г) присоединение

С целью дальнейшего изложения приведём краткие определения используемых в ГОСТ 31254 [26] и приведенных на рисунке 1.4 терминов.

Производный номинальный геометрический элемент (Б) – это центр, ось или плоскость симметрии, которые произведены от одного или нескольких полных геометрических элементов.

Реальная поверхность детали (В) – это совокупность физически существующих геометрических элементов, которые отделяют всю деталь от окружающей среды.

Реальный полный геометрический элемент (Г) – это полный геометрический элемент как часть реальной поверхности детали, ограниченная соседними реальными полными геометрическими элементами. Приближенное представление реального полного геометрического элемента, которое получают с помощью регистрации конечного числа реального полного геометрического элемента при соблюдении согласованных условий.

Выявленный производный элемент (Д) – это центральная точка, средняя линия или средняя поверхность, произведенные от одного или нескольких реальных полных элементов.

Присоединенный полный элемент (Е) – это полный элемент правильной формы, присоединенный (совмещенный) к выявленному полному элементу при соблюдении согласованных условий.

Присоединенный производный элемент (Ж) – это центр, ось или плоскость симметрии, произведенные от одного или нескольких присоединенных полных элементов.

Анализируя представленные определения, можно отметить, что ключевыми факторами, определяющими формирование присоединенных элементов к реальному элементу, являются:

1) регистрация конечного числа (точек) реального полного геометрического элемента, что приводит к необходимости решения задачи определения минимально необходимого объема измеряемых данных, использование которого позволит достичь заданной достоверности результатов измерений;

2) соблюдение согласованных условий, обеспечивающих достоверное описание и представление реального геометрического элемента с учётом требуемой точности и его ограничения соседними реальными полными геометрическими элементами;

3) геометрические параметры, произведенные от одного или нескольких присоединенных полных элементов, используются для формирования присоединенного производного элемента, что может приводить к суммированию возникающих неопределённостей.

Оцененные параметры выявленного и присоединенного производных элементов используются для оценки множества линейно-угловых параметров. При измерении роторов ГТД оцениваются параметры: расстояния и углы, радиальные и торцевые биения. Корректное определение параметров выявленного и присоединенного производных элементов имеет важное значение. Существенным резервом повышения достоверности измерений геометрии деталей и узлов является совершенствование алгоритмов обработки результатов измерений, позволяющих определять параметры выявленного и присоединенного производных элементов.

Как было отмечено ранее, наряду с неопределённостями, вносимыми алгоритмами обработки результатов измерений, существует множество других неопределённостей, приведенных на рисунке 1.3, которые необходимо оценивать с целью определения их вклада в суммарную неопределённость.

Рассматривая классификацию факторов, оказывающих влияние на суммарную неопределённость измерений КИМ (см. рисунок 1.2), состав элементов виртуальной измерительной машины (см. рисунок 1.3) и приведенные особенности системы

взаимозаменяемости можно заключить, что моделирование координатных измерений должно включать в себя решение следующих подзадач:

- 1) моделирование реальных поверхностей с заранее известными параметрами;
- 2) моделирование выборочных процессов, воспроизводящих выборки из генеральной совокупности точек реальных поверхностей;
- 3) моделирование процессов определения параметров присоединенного полного и производного элементов;
- 4) оценку геометрических параметров деталей и узлов, рассчитываемых на основе присоединенных полного и производного элементов;
- 5) выбор условий измерений, обеспечивающих заданную точность при минимальных затратах времени на измерение и обработку их результатов.

Приведем ряд источников, сведения из которых необходимы при исследовании и моделировании неопределённостей измерения геометрических параметров, а также разработки методик измерений.

Нормативная база в области обеспечения единства измерений, определения норм взаимозаменяемости перечислена в основных источниках [30, 32, 216, 217, 218].

Порядку оценки погрешностей и неопределенностей результатов измерений посвящено множество работ и создана законодательная база [33, 219, 220, 143, 160].

Любые поверхности деталей машин, даже простейшие (цилиндрические, плоские, конические и т.д.), в силу особенностей методов обработки, реализуемых при их изготовлении, имеют систематические ошибки формы. Исключения составляют поверхности эталонов, которые также имеют отклонения формы, но значительно меньшей величины. Это, в свою очередь, требует рассматривать поверхности деталей и узлов как сложные. Методы и математические модели обработки результатов измерения реальных поверхностей изложены в работе [191]. Упомянутая работа содержит повествование об основных контролируемых геометрических параметрах, методах и проблемах, возникающих при их измерении, указывается достижимая точность. Классифицируются и указываются типичные систематические ошибки формы поверхностей.

Поскольку в процессе исследований потребуется моделировать погрешности формы поверхностей, произведен поиск работ в данном направлении. Особенности моделирования типичных погрешностей формы на простейших поверхностях посвящена работа [123], в которой приводится математическая формулировка определения поверхностей элементов.

Практическое использование координатно-измерительных машин требует разработки методик измерения, содержащих описание последовательности и условий

выполнения измерений и их ожидаемые неопределённости. Оценка ожидаемых неопределённостей измерений выполняется путём разработки математической модели процесса измерения и выполнения численных экспериментов. Условия выполнения измерений, приводимые в методиках измерений, могут включать количество точек измерений на поверхностях, тип, диаметр и скорость подвода измерительных наконечников, а также другие параметры. Определение рациональных значений условий выполнения измерений может выполняться экспериментальным методом и с использованием математических моделей процесса измерения.

Наиболее простой подход к определению рационального количества контролируемых точек (одного из параметров методики измерения) приведен в [97]. Он распространяется на случай одномерных измерений. В работе процесс контроля рассматривается как подчиненный нормальному распределению в некотором интервале. На основании данного предположения определяется зависимость количества контрольных точек (np) с учетом предположения о том, что измеряемая величина не выйдет за границы принятой доверительной вероятности (p):

$$np = \frac{D_{\xi}(x_k)}{\varepsilon_{\beta}^2} \left[\arg \Phi \cdot \left(\frac{1+p}{2} \right) \right]^2, \quad (1.2)$$

где $D_{\xi}(x_k)$ – заданная величина дисперсии значений измеряемых величин;

x_k – измеряемая величина;

$\arg \Phi \cdot \left(\frac{1+p}{2} \right)$ – функция, обратная интегралу Гаусса $\Phi \cdot \left(\frac{1+p}{2} \right)$;

ε_{β} – величина, характеризующая соотношение между допускаемой и реализуемой измерительной погрешностью.

Данный подход не позволяет учитывать особенности измеряемых поверхностей и в основе его лежит предположение о том, что измеряемые величины подчиняются закону распределения Гаусса. При этом инструментальная погрешность КИМ (например, повторяемость измерения одной точки поверхности) может быть приближена к нормальному распределению. Однако в практике измерений не всегда наблюдается соответствие распределения измеряемых геометрических параметров нормальному распределению. Например, для геометрического параметра отклонение от круглости, в зависимости от количества контролируемых точек наблюдается эволюция законов распределения от экспоненциального к нормальному. В соответствии с этим, результаты, полученные с помощью данного метода, не всегда могут быть достоверными. Также следует отметить, что данный метод не позволяет учитывать погрешность формы

контролируемых поверхностей. Как будет показано далее в работе, данный фактор в значительной степени влияет на погрешность измерения геометрических параметров.

Поскольку в процессе исследований потребуется моделировать погрешности формы поверхностей, произведен поиск работ в данном направлении. Особенности моделирования типичных погрешностей формы на простейших поверхностях посвящена работа [189], в которой приводится математическая формулировка определения поверхностей элементов.

Исходные измеренные данные содержат в себе различные погрешности, в том числе имеющие случайную природу. Для их отделения необходимо использование фильтров. В работе [121] излагается методика фильтрации данных на основе лифтинга вейвлетов, проводится экспериментальная проверка этой методики и показано её преимущество перед методиками фильтрации, используемыми для простых поверхностей.

В настоящее время для определения геометрических параметров измеренных деталей широко используется метод наименьших квадратов (МНК). В работе [137] проводится оценка точности алгоритмов вписывания сферы, основанных на МНК. Авторы показывают, что точность существующих алгоритмов зависит от величины ошибок измерения и для различных источников возникновения ошибок измерения необходимо использовать различные алгоритмы вписывания сферы.

Шероховатость поверхности оказывает влияние на точность измерений. В связи с этим необходимо учитывать влияние этого фактора на процесс измерения. В работе [180] показан способ моделирования и исследования влияния шероховатости поверхности на погрешность измерений. Исследуется вопрос взаимосвязи между радиусом измерительного щупа сферической формы и точностью измерений шероховатости поверхности.

Авторы работы [142, 249] предлагают алгоритм разделения составляющих погрешностей формы поверхностей для обработки массивов измеренных точек. Выделение ключевой информации позволит сформировать необходимую статистическую информацию для использования при моделировании процесса координатных измерений.

1.4. Анализ состояния вопроса прогнозирования и обеспечения точности геометрических параметров деталей узлов

Геометрическая точность деталей и узлов оказывает существенное влияние на рабочие параметры изделий в процессе изготовления и эксплуатации. При этом геометрические параметры непосредственно также влияют на физико-механические показатели деталей. Они определяют силовое и динамическое состояние как отдельных

элементов деталей, так и всего изделия в целом [38]. Уступы и реданы по проточной части двигателя существенно влияют на качество потока в компрессоре и турбине. Неуравновешенность роторов компрессора и турбины является следствием геометрической неточности по расположению масс материала относительно оси вращения роторов. Зазоры между лопатками компрессора и турбины с элементами корпусов; осевые зазоры между валами; зазоры в лабиринтных уплотнениях определяют тягу, расход топлива, температурную напряженность элементов конструкции и КПД отдельных узлов и всего двигателя. 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 А. Zia, М. Mazur, Н. Sasahara, Т. Kandikjan и др.

Обеспечение точности изготовления деталей, сборки узлов и изделия в целом связано с расчетами и выполнением заданных параметров и допустимых отклонений на всех уровнях производства [38]. Это является залогом высокого качества изделия. Таким образом, достижение заданных показателей качества изделий неразрывно связано с задачами прогнозирования и обеспечения их геометрической точности. Обеспечение высокой точности изготовления деталей, сборочных единиц и всего изделия тесно связано с основами взаимозаменяемости [10, 23, 38, 42, 61, 103].

Рассмотрим работы, посвящённые исследованию взаимосвязи между допусками на геометрические параметры деталей и узлов и заданными функциональными параметрами изделий. В работах [159, 201] приводятся методики, позволяющие оценить влияние геометрической точности на показатели качества изделия, а также на параметры, характеризующие работоспособность изделия. В работе [201] приводится методика, позволяющая оценивать влияние сборочных зазоров на напряженно-деформированное состояние деталей. В основе методики заложено использование метода конечных элементов. Авторы работы [175] оценивают влияние параметров шлифования на точность изготовления изделий из пластика, армированного углеродным волокном и влияние достигнутой точности на характеристики изделий, изготовленных из данного материала. Также авторы рассматривают взаимосвязь параметров шлифования и стоимость работ по изготовлению детали. Зарубежные исследователи в работе [163] предлагают математическую модель оценки стоимости измерения геометрических параметров детали. Во второй части работы исследователи на практических примерах показывают достоверность предложенной модели.

В работе [127] приводится методика анализа и синтеза допусков сборочных единиц, работающих под механическими нагрузками. Методика позволяет интегрировать процессы

разработки и оптимизации изделий и основана на комбинированном использовании инструментов компьютерной поддержки современных CAD и CAE систем. Приводится обзорное описание следующих инструментов, имеющихся в CAD и CAE системах: анализа допусков, моделирования допусков, оценки неопределенностей, синтеза допусков. В исследовательской части работы рассматривается влияние геометрической точности на силовые факторы, действующие в конструкции сборок. Разрабатываются модели оценки стоимости изготовления изделий, учитывающие величины назначенных допусков [161].

В работе [152] приводится методика, позволяющая определять вероятность дефектов, при которых не будет выполнено функциональное требование в массовом производстве. В качестве функционального требования выступает требование по работоспособности и собираемости сборочной единицы, которые выражается в необходимых зазорах. В основе методики заложен подход, использующий алгоритм оптимизации и моделирование с использованием метода Монте-Карло. Применение методики иллюстрируется с помощью двух промышленных механизмов: коаксиальных разъемов и поступательной пары. Приведенные механизмы характеризуются тем, что они переограничены, то есть наличием нескольких связанных сборочных параметров, определяемых несколькими деталями. Функциональные характеристики механизмов зависят от величины сборочных зазоров и явно не сформулированы. Существенным преимуществом методики является её относительно низкая трудоёмкость вычислений.

Приведенные выше работы показывают научные подходы и направление развития инженерных подходов к обоснованному назначению размерно-точностных параметров деталей и сборочных единиц, обеспечивающих функциональные характеристики изделий, что наиболее важно на этапах проектирования и доводки. Резюмируя представленные работы и анализируя проблему взаимосвязи параметров точности изделий и их параметров качества, можно заключить следующее. Установление взаимосвязей параметров точности и технических показателей изделий является сложной задачей, которая может быть междисциплинарной из-за многообразия параметров, характеризующих качество изделий. Задачи описания функциональных связей параметров находятся на стыке конструкторской и технологической сфер деятельности, и зачастую требуют описания рабочих процессов изделий. Корректное описание рабочих процессов связано с использованием различных дисциплин: динамики и прочности конструкций, газовой динамики, термодинамики и теплообмена и других. Целесообразно ограниченное перемещение отдельных задач описания функциональных связей в технологическую сферу, поскольку создаются предпосылки для повышения показателей качества изделий и эффективности их производства. Среди множества показателей, особую роль в обеспечении качества, надёжности и долговечности изделий играет геометрическая

точность. Прогнозирование эксплуатационных показателей изделий требует создания моделей сборочных единиц, описывающих их реальную геометрию. Рассмотрим работы, посвящённые исследованиям в области прогнозирования и обеспечения геометрической точности деталей и узлов.

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 учёных В.А. Богуслаева, А.Я. Качана, А.И. Долматова, Е.А. Корневского, 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 др. Среди зарубежных исследователей можно отметить J.J. Shah, A.J. Qureshi, H. Wang, B. Schleich, S. Wartzack и др.

К основополагающим относятся работы: академика Н.Г. Бруевича [16, 17] заложившего начала общей теории точности; профессоров Б.С. Балакшина [3], Н.А. Бородачева [14, 15], А.П. Соколовского [106], А.Н. Гаврилова [18, 19], В.П. Фигаро [115], В.С. Корсакова [62], В.М. Кована [59], А.С. Шевелева [116, 117] по основам теории точности производства и разработке технологических процессов; работы А.В. Подзея [90], Г.Н. Решетова [98], А.А. Маталина [72], А.М. Сулима [41] по исследованию механических и физических свойств деталей при обработке и А.И. Якушева [119, 120], И.В. Дунина-Барковского [104], А.К. Кутая [66] по теории взаимозаменяемости и обеспечению качества изделий.

Представителями Куйбышевской школы прогнозирования и обеспечения точности деталей и узлов являются **А.С. Шевелев, Ф.И. Демин**, Г.П. Федорченко, Л.А. Анипченко, Л.Н. Прокофьев, В.И. Журавлёв, В.А. Иванов, В.А. Захаров, И.М. Трухман, О.С. Сурков. Многочисленные работы посвящены фундаментальным и прикладным вопросам прогнозирования и обеспечения размерной точности при изготовлении деталей, а также сборки изделий.

Возможна постановка двух задач размерного анализа: прямой и обратной. В терминах размерных цепей, прямая задача заключается в оценке размерно-точностных параметров замыкающих звеньев по известным значениям составляющих звеньев. Таким образом, выполняется анализ влияния составляющих звеньев на величины замыкающего звена. Обратная задача заключается в определении размерно-точностных параметров составляющих звеньев таким образом, чтобы обеспечивались заданные параметры замыкающих звеньев. При этом решается задача синтеза. В ходе изготовления деталей формируются размерные цепи в технологическом процессе их производства. Выполнение сборки узлов сопряжено с формированием сборочных размерных связей. В англоязычной литературе задачи размерного анализа называют задачами Tolerance analysis и Tolerance synthesis. Обзорная работа [130] содержит изложение пяти различных значимых аспектов, связанных с задачей Tolerance analysis: этап анализа, принцип анализа, объект анализа, метод анализа и результаты анализа, представленных на рисунке 1.5.

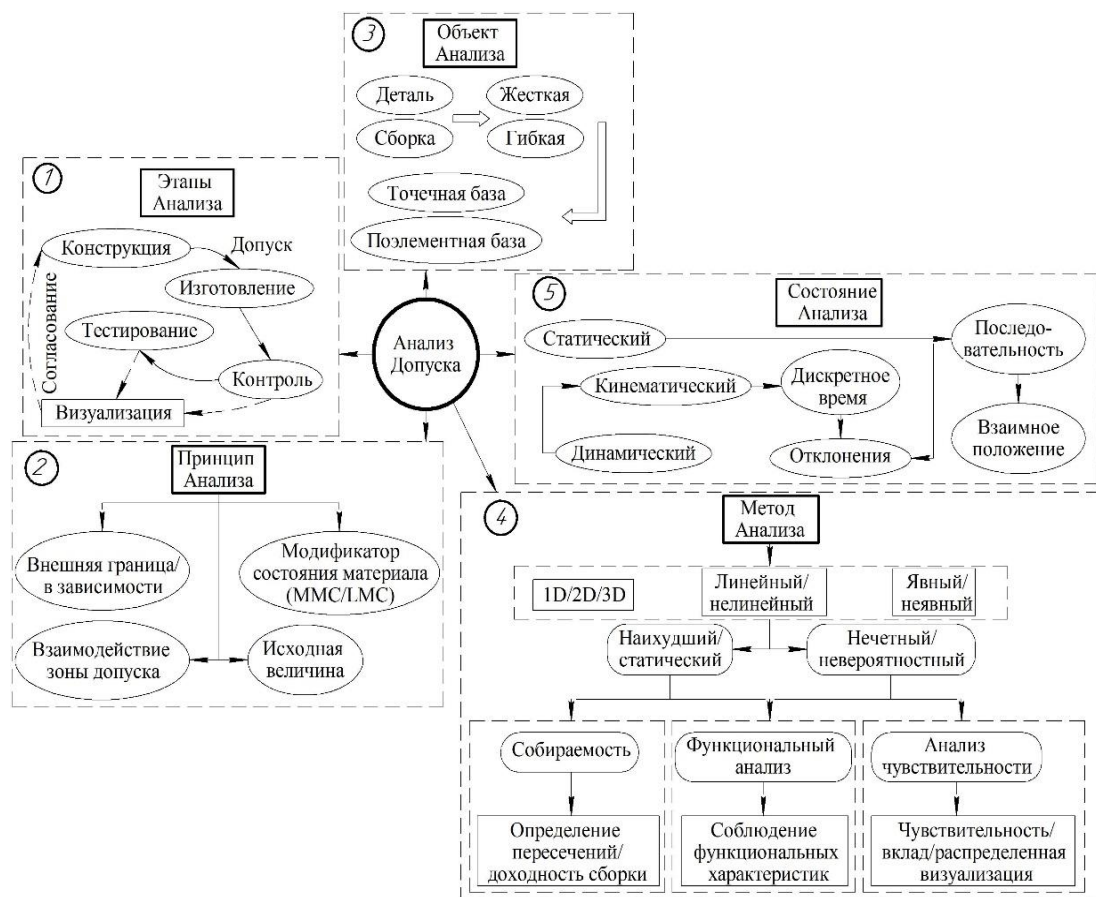


Рисунок 1.5 – Схема исследования анализа допуска [130]

На этапах жизненного цикла изделия решаются различные цели. Конструктором назначаются заданные технические требования, которые должны быть обеспечены в ходе производства и эксплуатации. В ходе изготовления и сборки обеспечивается точность

геометрии деталей и узлов, которая проверяется на этапе контроля. Производится тестирование для проверки эффективности предложенных методов в функциональном анализе. Полученные результаты визуализируются для наглядного представления, осмысления и оценки соответствия требованиям конструкции.

Анализ допусков может выполняться с учётом соответствия определенному принципу. Положение внешней границы поверхностей может быть зависимой или независимой от другой поверхности. Могут рассматриваться разные условия соответствия границе материала: максимальное требование к материалу (MMR) контролирует точность размеров, фактический контур удовлетворяет максимальной виртуальной границе материала (MMVB). Рассматриваются разные варианты выбора взаимодействий зон допусков с зонами допусков элементов (поверхностей), задаваемых в качестве базовых.

Рассматриваемым объектом анализа может выступать деталь или узел. В случае детали конструктором определяются допуски и их соответствующие зоны. Для узла указываются зазоры и натяги. Выполняется предварительный анализ жёсткости детали или узла. По результатам анализа принимается решение о моделировании в предположении абсолютной жёсткости либо необходимости учёта жёсткости деталей или узла. Модель Tolerance Map (T-Map, карта допуска) не учитывает жёсткость, тогда как модели Skin (поверхностная) и области отклонения (DD) могут учитывать жёсткость деталей и узлов [124]. Моделирование может включать точечное или поэлементное представление размерной информации [187].

В ходе анализа допусков могут использоваться различные методы, отличающиеся: количеством учитываемых координат (1D, 2D и 3D); характеристиками целевой функции, которые могут быть линейными или нелинейными, явными или неявными. Применяются два основных подхода: наихудший, называемый методом минимума-максимума, и статистический, в русскоязычной литературе определяемый как вероятностный. Метод наихудшего случая основан на полной взаимозаменяемости деталей. Вероятностные методы представлены методом корневых сумм (RSS) и Монте-Карло, учитывающих распределение вероятностей. Названные методы используются для решения трёх подзадач. Первая подзадача заключается в проверке собираемости узла на основе оценки пересечений поверхностей деталей. Вторая подзадача направлена на оценку соблюдения функциональных характеристик собираемого узла с учётом заданных геометрических параметров деталей. Третья задача заключается в оценке влияния геометрических параметров деталей на сборочные параметры узла, таким образом, выполняется анализ чувствительности.

Исследуемый узел может рассматриваться в статическом и движущемся состоянии. Анализ допусков движущейся системы выполняется путем кинематического анализа в различных дискретных положениях с учетом следующих отклонений: погрешности изготовления, деформации [187], зазор в соединении [182] и отклонение взаимодействия [188],

а также последовательности сборки для получения различных результирующих положений детали и требований к функциям, зависящим от времени [177]. Многие модели анализа допуска были представлены в опубликованной литературе, как показано в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Модели допуска [130]

Модель	Авторы	Производная модель
Variation model	Boyer и др. (1991), Gupta и др. (1993)	Объединенная со skin моделью [222]
TTRS	Charles et al. (1989), Clément и др. (1991)	FTTRS [223]
Matrix	Clément и др. (1994), Desrochers (1994, 1997)	–
Semantic	Wang (2006, 2007, 2008)	–
GapSpace	Morse и др. (2000), Zou и др. (2003, 2004)	Переработанная GapSpace [224]
T-Map	Davidson и др. (2002, 2003), Bhide и др. (2003)	M-Map [225]
Deviation domain	Giordano и др. (1993, 1999, 2001)	Объединенная с Modal [226]
Polytopes	Teissandier и др. (1999)	Объединенная с screws [227]
Torsor	Bourdet и др. (1976, 1988, 1996), Clément et al. (1991)	PCAV [228]; DP-SDT [229]; Объединенная со skin model [230]
Jacobian	Salomons и др. (1996), Laperrière и др. (1999)	Объединенная со skin model [230]
Jacobian-torsor	Laperrière и др. (2002, 2003), Ghie и др. (2003)	Объединенная с CLIC [231]
Vector loop	Chase и др. (1995, 1996), Gao и др. (1993, 1996), Демин Ф.И. (1993)	Объединенная со skin моделью [230]
Skin model	Ballu и др. (1993), Mathieu и др. (2007)	Skin model shapes [232]

Как видно из таблицы 1.1, известно восемь основных моделей представления допусков и их анализа. Всесторонне описание каждой из этих моделей может быть нецелесообразным в пределах проводимого аналитического обзора. Описание приведенных моделей можно найти в работах, на которые ссылается [130]. Возможности и ключевые характеристики моделей приведены в таблице 1.2 (на следующей странице) [130].

Таблица 1.2 – Сравнение моделей допусков по основным характеристикам

№	Модели	TTRS	Matrix	Vector loop	T-Map	Deviation domain	Unified Jacobian torsor	GapSpace	Scin model share
1	Размерность	3D	3D	3D	3D	3D	3D	3D	3D
2	Тип допуска: Двухмерный	+	+	+	+	+	+	+	+
	Геометрическая: форма	-	-	+	+	(Δ)	(Δ)	+	+
	ориентация	+	+	+	+	+	+	+	+
3	позиция	+	+	+	+	+	+	+	+
	Метод анализа: WC (минимума максимума)	+	+	+	+	+	+	+	-
	Статистический RSS	+	-	+	-	+	+	+	-
Другие	GA	GA	GA (Метод Монте Карло (Δ))	DLM/Метод Монте Карло/ другие (SOTA)	Свертка вероятности T-Maps	Монте Карло	Монте Карло	Монте-Карло / простой алгоритм / численное интегрирование	Статистический анализ формы
	Чувствительность/вклад	-	-	+	(Δ)	(Δ)	+	+	+
5	Объект анализа	Поверхность	Точка	Точка	Поверхность	Поверхность	Поверхность	Поверхность, зазор	Точка
6	Учёт границы поверхностей и независимости допусков	-	-	-	+	-	-	-	-
7	Базовый приоритет	+	-	-	+	+	+	+	+
8	Тип соединения	Контакт/ зазор	Контакт/ зазор	Контакт	Контакт/ зазор	Контакт/ зазор	Контакт/ зазор	Контакт/ зазор	Контакт/ зазор
9	Модификатор материала	-	-	-	+	+	-	+	-
10	Функция накопления	Линейная/ сеть	Линейная/ сеть	Линейная/ сеть	Линейная/ сеть	Линейная/ сеть	Линейная/ сеть	Линейная/ сеть	-
11	Взаимодействие допусков	+	+	-	+	+	+	-	+
12	Жесткий/ нежесткий	Жесткий	Жесткий	Жесткий	Жесткий	Жесткий/ нежесткий	Жесткий	Жесткий	Жесткий/ нежесткий
13	Подходит для синтеза допусков	+	-	+	+	+	+	+	(Δ)
14	Перенос допусков	+	-	-	+	+	+	+	+
15	Оценка допусков	-	-	-	-	+	-	+	+
16	Серия/параллельная сборка	Серия/ параллельная сборка	Серия	Серия	Серия/ параллельная сборка	Серия/ параллельная сборка	Серия/ параллельная сборка	Серия/ параллельная сборка	Серия
17	Применимость в CAD / CAM системах	CATIA 3D FDT/ FROOM	CATIA 3D FDT/ FROOM	SETOL/Sigmund.	-	-	-	GSAS1.0	-

Сравнение восьми моделей выполнялось по следующим характеристикам: размерность рассматриваемой задачи; тип моделируемого допуска, представленный размером, отклонениями формы, углового и позиционного расположения, биением; метод анализа (минимума-максимума, вероятностный и другие); возможность оценки чувствительности или вклада рассматриваемых параметров; объект анализа; возможность учёта границы поверхностей и независимости допусков на их размер и форму; возможность учёта приоритета в задании базовых элементов; тип соединения, включающий контакт или зазор; модификатор материала, представленный условиями MMC и LMC, соответственно максимального или минимального состояния материала на границе размеров; вид целевой функции; возможность учёта взаимодействия между назначаемыми допусками; жёсткая и нежёсткая постановка задачи; применимость для синтеза допуска; возможность передачи сформированных допусков на производство по спецификациям стандартов; возможность оценки отклонений с использованием данных измерений, полученных с координатно-измерительных машин; последовательная / параллельная сборка (возможность учёта взаимосвязанности при выполнении размерных расчётов); применимость в CAD, CAM системах. Представленные модели не полностью совместимы со спецификациями стандартов ISO и ASME.

В ходе дальнейшего повествования будут упоминаться модели, подходящие для решения задач прогнозирования и обеспечения геометрической точности узлов.

Важным параметром, характеризующим качество сборки изделий, является его вибрационное состояние, определяемое уровнями дисбалансов ротора. Следующий подраздел будет содержать повествование о видах и причинах возникновения дисбалансов роторов ГТД.

1.5. Причины возникновения и оценка дисбалансов роторов ГТД

Основным источником гармонических возбуждающих сил, действующих на ротор ГТД, являются дисбалансы вращающихся деталей, которые в сочетании с упруго-инерционными характеристиками узлов определяют уровень вибраций двигателя в целом. Важнейшими направлениями снижения вибраций машин с роторами являются технологические и конструктивные методы. Значимыми работами в названных направлениях являются работы М.Е. Левита и В.П. Ройзмана [52, 67], М.К. Леонтьева [245, 246].

Дисбалансы, вызывающие прогибы и вибрации, возникают вследствие конструктивных, технологических и эксплуатационных причин [67].

Конструктивные причины возникновения дисбалансов роторов обусловлены принятыми конструктивными решениями при разработке ГТД. Главным основанием обеспечения заданного уровня вибраций двигателя в процессе его работы является сохранение натягов по посадочным поясам соединяемых деталей на всех частотных режимах эксплуатации. Нарушение натягов в соединениях деталей из-за возможных градиентов температур и действующих силовых факторов приводит к появлению дисбалансов. Конструкция роторов, расположение его опор и жёсткость статора ГТД определяют наличие критических оборотов ротора. Повышенные вибрации могут появляться вследствие близости диапазона рабочих оборотов к диапазону критических оборотов ротора. Нежелательные колебания могут возникнуть из-за грубого расчёта подвески установки на самолёте или испытательном стенде, когда собственная частота всей системы двигатель–самолёт или двигатель–стенд находится в диапазоне рабочих оборотов. К конструктивным причинам также следует отнести наличие различных лабиринтных, маслозащитных, регулировочных и других колец в зоне подшипников. Неперпендикулярность торцов колец к оси вращения может привести при сборке к появлению торцовых биений и к значительным перекосам.

Технологические причины возникновения дисбалансов роторов обусловлены погрешностями изготовления деталей, сборки и балансировки узлов ГТД. Серьёзной причиной появления статического и динамического дисбаланса деталей являются погрешности, допущенные в процессе их изготовления. При изготовлении дисков роторов турбин возможны: различные отклонения по форме, значительная разностенность буртов, несимметричное расположение пазов и отверстий на дисках. При сборке ротора диски могут оказаться с торцевыми биениями выше допустимых, что вызывается неравномерным распределением толщин по диску. Материал диска может оказаться неоднородным, что приводит к явной и скрытой неуравновешенности. Явная неуравновешенность может быть обнаружена на балансировочном стенде на низких оборотах. Скрытая неуравновешенность проявляется при рабочих оборотах и температурах. Причиной появления скрытой неуравновешенности является неравномерная деформация частей диска под действием центробежных и температурных сил. Неравномерная деформация приводит к смещению центра тяжести диска относительно оси вращения. Дисбаланс на длинных валах может проявляться из-за биения наружных и внутренних стенок относительно оси вращения детали, а также разностенности вала. Важнейшей причиной появления вибраций и дисбалансов роторов служит неточная сборка узлов ГТД. В процессе сборки в роторе могут

возникать дисбалансы из-за несовпадения осей посадочных отверстий, а также биения посадочных поверхностей с осями вращения сопрягаемых деталей. Причиной появления неуравновешенности на отбалансированных роторах может быть несоосность опор, смещающая ось вращения диска относительно оси балансировки.

Для исправления неточностей, допущенных в процессе изготовления деталей и сборки роторов, применяется статическая и динамическая балансировки. Однако технологические процессы этих балансировок могут быть неточными и являться причиной появления неуравновешенных сил на роторе.

Эксплуатационные причины возникновения дисбалансов роторов обусловлены действующими в ходе работы и эксплуатации изделий внешними и внутренними факторами, в том числе деформацией деталей ротора под влиянием температурных и силовых полей, неравномерностью распределения массы на рабочих поверхностях, релаксацией, выжиганием и т.д. Причиной появления вибраций может быть непостоянность газового потока при несовпадении осевых газодинамических сил с осью ротора. Это приводит к деформациям вала из-за появляющегося изгибающего момента, действующего в перпендикулярной к дискам плоскости. В результате может произойти перекося ротора и рост вибраций на опорах. Несимметрия температурных полей в двигателе может привести к неравномерности расширений или подвижек деталей относительно оси симметрии ротора, что нарушает его распределение центра масс, достигнутое в ходе выполнения балансировки. Температурная неравномерность может приводить к более опасному явлению, заключающемуся в задевании ротора о статорные детали и заклинивании.

Конструктивные, технологические и эксплуатационные дисбалансы машин суммируются с учётом их направления и для случая жёстких роторов могут быть представлены в виде результирующего главного вектора дисбалансов и главного момента дисбалансов [29].

При этом суммарный дисбаланс можно представить в следующем виде:

$$D_{\Sigma} = D_K + D_T + D_{\text{Э}}, \quad (1.3)$$

где $D_K, D_T, D_{\text{Э}}$ – соответственно дисбалансы, возникающие из-за конструкторских, технологических и эксплуатационных факторов, г·мм.

Верхнее и нижнее значения главного вектора допустимых дисбалансов ротора при его балансировке в виде отдельной детали в соответствии с выбранным классом можно оценить по формулам [22]:

$$D_{\text{ст доп верх}} = m_p e_{\text{ст доп табл}} - D_{\text{ст.т}} + D_{\text{ст.э}}, \quad (1.4)$$

$$D_{\text{ст доп нижн}} = \frac{m_p e_{\text{ст доп табл}}}{2,5} - D_{\text{ст.Т}} + D_{\text{ст.Э}}, \quad (1.5)$$

где m_p – масса ротора, кг;

$e_{\text{ст доп табл}}$ – табличное значение удельного дисбаланса, соответствующее заданному классу точности балансировки роторов, приведенное в таблице [22], мм;

$D_{\text{ст.Т}}, D_{\text{ст.Э}}$ – соответственно значения главных векторов технологических и эксплуатационных дисбалансов изделия, г·мм.

В ГОСТ 22061–76 [22] приведены классы точности балансировки роторов, включающие 11 основных и два факультативных. Классы образованы посредством геометрической прогрессии величины $e_{\text{ст}} \omega_{\text{э макс}}$ со знаменателем 2,5. Значения главных векторов технологических и эксплуатационных дисбалансов изделия могут быть оценены в ходе выполнения конструкторских работ и получены на основе экспериментальных данных по схожим изделиям. Используя формулы (1.1) и (1.3), можно определить уровень требований к дисбалансам при выполнении балансировки роторов путём выражения

слагаемых $m_p e_{\text{ст доп табл}}$ и $\frac{m_p e_{\text{ст доп табл}}}{2,5}$. Положения балансировки жёстких и гибких роторов

приведены соответственно в ГОСТ ИСО 1940 [29] и ГОСТ 31320-2006 [27]. Роторы многих авиационных двигателей являются гибкими, что усложняет их технологию балансировки. В ГОСТ 31320-2006 [27] предусмотрена балансировка по модам, включающая балансировку с последовательной коррекцией дисбалансов с целью уменьшить амплитуду вибраций на каждой (существенной) собственной моде до установленных пределов.

Вопросы снижения уровня вибраций роторных машин рассматривались в работах отечественных исследователей М.К. Леонтьева [247, 248], А.А. Гусарова [35, 36], В.Н. Барке, Л.Н. Кудряшова, А.И. Максименко [69, 85], С.М. Белобородова [243], А.Ю. Ковалева [244]. Снижение уровня вибраций роторных машин достигается комплексом мероприятий, в том числе:

1) обеспечением высокой геометрической точности деталей для достижения равномерного распределения масс и минимизации дисбалансов;

2) обеспечением высокой геометрической точности сборочных параметров узлов для исключения смещения деталей относительно оси вращения и соответственно появления дисбаланса;

3) коррекцией дисбалансов в точках их возникновения или вблизи них [68].

Множество источников, посвященных изучению проблемы снижения вибраций роторных машин, можно разделить на три группы, посвящённые:

- 1) разработке методов и моделям оценки уровня вибраций;
- 2) исследованиям влияния геометрических параметров деталей и узлов на возникновение дисбалансов;
- 3) подходам к контролю и коррекции несбалансированности роторов.

Рассмотрим состояние исследований в каждой группе.

В значительном количестве работ, связанных как с первой и со второй группой, особое внимание уделяется применению метода конечных элементов для определения вибрационного состояния ротора и изделия в целом.

Роторные машины находятся в состоянии вынужденных колебаний из-за различных источников возбуждения. Синхронные вибрации из-за дисбалансов и геометрического изгиба ротора считаются одними из основных источников вынужденных колебаний. В статье [140] рассматривается балансировка роторов с геометрическим изгибом. Используется полиномиальная кривая, определяющая эксцентриситет на основе моделирования конечными элементами для идентификации распределения неуравновешенностей. Дисбаланс от эксцентриситета оценивается с использованием измеренных вибрационных реакций. Метод проверяется на экспериментальном роторе, имеющем как изгиб, так и дисбаланс. Количественная оценка распределенного дисбаланса заключается в использовании функции полинома эксцентриситета.

В статье [153] говорится об анализе динамики ротора на этапе проектирования. В процессе проектирования роторов турбомашин используется программное обеспечение, основанное на методах матриц переноса, коэффициентов жёсткости и конечных элементов. Начальный этап проектирования динамики ротора предполагает анализ на простой модели, состоящей из вала и подшипника, обычно выполняемый методом матрицы переноса. На заключительном этапе проектирования анализируется вся система методом конечных элементов. Анализ динамики ротора должен выполняться с использованием соответствующей модели, которая учитывает его динамические свойства.

В статьях [162, 164, 195] исследования дисбаланса во вращающихся роторах выполняются с использованием метода конечных элементов и формирования математической модели.

Авторы статьи [190] используют модель, которая описывается тремя функциями. Используется максимальный показатель Ляпунова для выявления характеристик, с помощью которых оценивается эксцентриситет вращающихся механизмов на практике.

Приведенные выше и множество других работ обозначают научные подходы к изучению вибрационного состояния изделий на основе использования математических моделей.

Большинство работ по исследованию возникновения дисбаланса из-за влияния геометрических отклонений посвящено изучению нарушению соосности в роторе и статоре. Одной из причин возникновения дисбалансов является несоосность ротора. Исследователи в работе [151] продемонстрировали метод, основанный на использовании модели с системой обнаружения неисправностей в роторе. Данный метод позволяет диагностировать состояние и местонахождение неисправности системы ротора путём измерения радиальных колебаний.

Диагностика несоосностей проводится путем измерения уровня вибраций на опорах ротора машин. Однако существуют другие причины, связанные с ротором, которые приводят к значительным вибрациям. Различение причин возникновения вибраций посредством анализа вибрационных сигналов затруднено. В работе [131] показывается возможность диагностирования несоосностей в системе ротор–статор путём измерений крутящего момента.

Работа [183] посвящена исследованиям влияния несоосностей подшипников на нелинейную вибрацию узлов ротора – демпфера. Исследован ряд узлов с имеющимися смещениями деталей. Показано, что вибросигналы аналогичных роторно-демпферных узлов сильно контрастируют из-за различного скопления допусков. Экспериментальная зависимость скачкообразных явлений и субгармонических резонансов при несоосности была проиллюстрирована в теоретических результатах.

В работе [200] исследовались дисбаланс нагрузки и несоосность вала с использованием величин силы тока статора в инверторе асинхронных двигателей. Мартинес-Моралес и другие учёные [185] проанализировали дисбаланс и несоосность, используя слияние данных для множественных механических диагностик неисправностей в асинхронных двигателях. В вышеперечисленных работах исследования проводились эмпирически. Результаты и измерения получены экспериментальным путём.

Уделяется внимание не только обнаружению неуравновешенностей, но и методам их устранения. Авторами предлагается использование различных методов, в том числе, основанных на использовании быстрых преобразований Фурье. Статья [196] содержит изложение экспериментального метода измерения вибраций и обнаружения неисправностей при вращении ротора. Приводится экспериментальная установка, включающая программируемую логическую интегральную схему (FPGA), выполняющую обработку нескольких сигналов для объединения измеренных вибраций и их анализа с

использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье. Разработанный экспериментальный метод позволяет обнаруживать и корректировать статический дисбаланс. Эксперименты показали, что добавление корректирующей массы в указанное место системы эффективно уменьшает вибрацию, вызванную дисбалансом, до уровней, аналогичных уровням соответствующих сбалансированных вращающихся машин.

Несбалансированность ротора приводит к возникновению сил реакции в муфте, что часто является основной причиной вибрации в машинах. Сабо [184] оценил несбалансированные силы, возникающие на валу ротора, и показал наличие первых и вторых уровней гармонических колебательных реакций.

Различные методологии, основанные на спектральном анализе вибрации, были предложены с использованием быстрых преобразований Фурье [168, 171]. Авторы статьи [129] изучали угловое смещение и дисбаланс в асинхронных двигателях с гибкими муфтами. Qiuao и другие [172] сообщили, что нарушения дисбаланса составляют значительную часть всех неисправностей в генераторах ветряных турбин. Исторически сложилось, что методы контроля вибраций широко используются для диагностики нарушений дисбаланса в асинхронных двигателях, но, как сообщается Kucuker и другими исследователями [156, 176], электрические методы обнаружения были предпочтительнее в последние годы [145].

В статьях [158, 147] предлагается способ управления и контроля роторных машин. Он основан на идее представления роторной машины на эквивалентной уменьшенной модели, которая может быть идентифицирована экспериментально. Идентификация выполняется с использованием ограниченного количества возбуждающих сил и датчиков перемещения, расположенных вдоль оси вала. Результаты экспериментов показали эффективность метода.

Наиболее часто анализ динамики ротора и его вибрационного состояния производится в специализированных программных пакетах. В работах [178, 194] речь идёт о методе обнаружения дефектов с использованием модели для статических и динамических дисбалансов ротора. Модальный анализ гибкого ротора выполнен в программе, реализующей метод конечных элементов. Обработка результатов выполнялась в системе MATLAB по данным, получаемым из программы, реализующей метод конечных элементов.

Аналитический обзор упомянутых работ показывает возможности современных математических моделей, основанных на методе конечных элементов, для оценки уровня дисбалансов и вибраций роторов машин, в том числе гибких. Использование моделей, позволяющих оценивать уровни вибраций машин на рабочих диапазонах частот вращения,

создаёт возможности совершенствования технологии сборки и балансировки роторов. Известно, что множество роторов авиационных двигателей являются гибкими. Балансировка роторов авиационных двигателей в большинстве случаев выполняется на частотах вращения, которые ниже по отношению к рабочим. В ряде случаев это может приводить к повышенным вибрациям. Создание технологических возможностей для балансировки роторов на рабочих частотах вращения не всегда является оправданным по экономическим соображениям. Возможным вариантом решения приведенной проблемы является разработка и использование математических моделей, позволяющих оценивать уровни дисбалансов и вибраций роторов машин в ходе их балансировки. Оценки дисбалансов и уровня вибраций машин во всём диапазоне рабочих частот могут использоваться для определения вариантов их уравнивания. Исходными данными для построения таких моделей оценки дисбалансов и уровня вибраций авиационных двигателей могут являться погрешности геометрических параметров деталей и узлов, а также уровни их неуравновешенностей. Приведенные исходные данные могут быть получены в существующих производственных условиях за счёт использования современных координатно-измерительных машин и балансировочного оборудования.

Следует отметить открывающиеся возможности в использовании программных комплексов и множества измеряемых параметров, напрямую и косвенно связанных с уровнями вибраций авиационных двигателей для диагностирования причин, вызывающих вибрации в них.

Таким образом, повышается значимость производственного контроля геометрических отклонений и дисбалансов деталей и узлов для оценки уровня вибраций. Использование математических моделей для оценки уровня вибраций машин создаёт возможности перехода к современному цифровому производству.

Следующий подраздел содержит описание проблем сборки роторов и обеспечения их заданных эксплуатационных параметров.

1.6. Особенности сборки роторов авиационных ГТД с учётом условий цифрового производства

Сборка узлов и изделий является окончательным этапом производственного процесса, выполнение которого оказывает существенное влияние на себестоимость, рабочие и эксплуатационные параметры изделий. Обеспечение рабочих и эксплуатационных параметров изделий на этапе технологической подготовки процесса их

сборки реализуется комплексом мероприятий, который включает:

- 1) рациональный выбор параметров точности деталей, узлов и изделий;
- 2) обеспечение заданной точности сборочных параметров узлов и изделий;
- 3) испытания деталей, узлов и изделий на разных этапах их изготовления и сборки;
- 4) настройку и регулировку узлов, исходя из достижения заданных рабочих и эксплуатационных параметров изделий;
- 5) цифровые испытания узла для оценки соответствия, корректировки хода сборки и подтверждения заданных рабочих и эксплуатационных параметров изделий.

Рациональный выбор параметров точности деталей, узлов и изделий выполняется с учётом закладываемых условий взаимозаменяемости, существующих технологических и ресурсных возможностей. Немаловажным является аспект совокупных затрат, включающих затраты на обработку заготовок и сборку узла или изделия.

Расширение допусков на обработку заготовок приводит к уменьшению затрат на изготовление деталей, однако увеличиваются затраты, связанные со сборкой узлов. Задаваемые повышенные требования на сборочные параметры узла становятся сложно достижимыми, если допуски на детали расширены. При этом затраты на сборку узлов увеличиваются в силу следующих причин: повышается необходимость и значимость входного контроля деталей; вводится комплектация и доработка деталей на основе результатов измерений деталей; вводятся так называемые ложные сборки узла для проверки его сборочных параметров и определения величин корректировок на размерные параметры деталей; увеличивается количество переборок узлов из-за необходимости управления процессом суммирования геометрических и физических отклонений деталей исходя из достижения заданной точности сборочных параметров; повышается трудоёмкость измерения сборочных параметров узла.

Сужение допусков на обработку заготовок приводит к повышению затрат на изготовление деталей, при этом снижаются затраты, связанные со сборкой узлов. Повышение затрат на обработку заготовок определяется следующими причинами: выполнением более точного базирования заготовок относительно станка, что приводит к повышению операционной трудоёмкости; в ряде случаев требуется использование специализированной оснастки; увеличивается количество проходов режущего инструмента; могут снижаться параметры режимов резания и другие. Приведенное выше позволяет отметить, что наблюдаются две противоречивые тенденции. Таким образом, необходимо найти такое сочетание допусков на обработку заготовок и сборку узлов, при которых достигается снижение совокупных затрат. Определение оптимального или рационального сочетания параметров требует разработки двух классов моделей. Первый

класс моделей должен позволять оценивать точность сборочных параметров узлов при заданной геометрии деталей. Второй класс модели должен описывать взаимосвязь между параметрами точности деталей и узлов и затратами на их изготовление или сборку.

Следует отметить, что к деталям и сборочным единицам современных двигательных установок предъявляют жёсткие требования по точности формы и расположению поверхностей [233]. Требования к параметрам точности большинства деталей находятся на уровне IT6...IT8, в абсолютных величинах составляют от 0,003 мм до 0,05 мм.

Важной задачей является оценка точности сборочных параметров ротора. Анализируя конструкцию и технологию сборки роторов авиадвигателей можно отметить следующие значимые особенности:

- жёсткость деталей ротора является недостаточной, возникающие в ходе его сборки деформации значимы и сравнимы по величине с допусками на сборочные параметры;
- сопрягаемые поверхности деталей имеют сложную топологию отклонения формы, оказывающую значимое влияние на величины сборочных параметров ротора;
- конфигурация деталей ротора достаточно сложная, что определяет существенные различия в жёсткости по разным координатным осям и направлениям;
- в процессе сборки ротора действуют разные силовые факторы, включая растяжение, сжатие, кручение, взаимное трение деталей и другие;
- формируемое в ходе сборки ротора напряжённо-деформированное состояние приводит к существенному изменению формы сопрягаемых, контрольных и рабочих поверхностей деталей и их взаимным подвижкам;
- сложный характер геометрических отклонений деталей и их относительного расположения формирует сложную конфигурацию главной центральной оси инерции ротора;
- геометрические отклонения деталей в ходе сборки ротора складываются и приводят к формированию погрешностей сборочных параметров.

Основными моделями размерных связей в технологических процессах изготовления деталей и сборки узлов являются размерные цепи. Наибольшее распространение получили методы расчёта размерных цепей, не учитывающие жёсткости составляющих звеньев. Значительное количество деталей и узлов ГТД характеризуются относительно низкой или недостаточной жёсткостью. Сборка деталей с недостаточной жёсткостью приводит их существенным деформациям, что оказывает существенное влияние на величины сборочных параметров. Сказанное создаёт необходимость учёта жёсткости в ходе выполнения размерных расчётов. Расчёты нежёстких размерных цепей рассматривались в работах А.М. Дальского [239, 240], В.В. Непомилуева [77], М.Е. Ильиной [51].

Непомилуевым В.В. предлагаются последовательность и уравнения для выполнения расчётов нежёстких размерных цепей с учётом объёмных и контактных деформаций деталей, погрешностей их изготовления, технологических факторов процесса сборки узлов. Повышение производительности и качества сборки роторов и узлов ГТД возможно за счёт создания обобщённого технологического процесса сборки роторов ГТД. В основе предлагаемого технологического процесса заложена возможность управления качеством сборки путём использования достоверных аналитических методов расчёта реальных нежёстких размерных цепей, а также разработки новых методов обеспечения требуемого качества сборки [46, 51, 71, 77]. Повышение точности и производительности сборки достигается за счёт применения информационных моделей изделий, позволяющих выполнять индивидуальный подбор деталей ротора на ЭВМ с учетом реальных показателей их качества на основе использования информации о действительных размерах деталей сборочного комплекта. Предложенный подход позволяет [64]:

- подбирать (комплектовать) детали ротора таким образом, чтобы они компенсировали погрешности друг друга в максимально возможной степени, что дает возможность снизить требования к качеству деталей, не снижая качества изделия;

- осуществлять качественную сборку ротора по комплекту деталей с первого раза.

Недостатки предложенного подхода, по мнению авторов работы [64], состоят в следующем:

- увеличивается трудоёмкость контроля, измерений и комплектации;

- точность прогноза результатов сборки ротора ухудшается по мере проявления упругости звеньев ротора, неточности изготовления посадочных мест деталей, при их соединении по двум и более посадочным поверхностям и т.д.;

- поскольку реальные характеристики ротора могут отличаться от предполагаемых, то в процессе сборки ротора необходимо использовать ЭВМ для корректировки сборки по достигнутым результатам.

Следует отметить, что В.В. Непомилуев (с участием В.Ю. Ерошкова) разработал алгоритм виртуальной сборки ротора, учитывающий деформации ротора от осевой стяжки и образование контакта поверхностей. По замеренным биениям отдельных посадочных поверхностей рассчитывались взаимные положения деталей при их контакте. Предполагалось, что контакт двух деталей происходит в основном по трем точкам. Эти точки определялись по определенному алгоритму приближенно по биениям посадочных поверхностей. Затем эти точки использовались как характерные – для задания пространственного положения деталей. Такие расчеты проводятся не для всех вариантов, а

только для нескольких – лучших, полученных без учета деформаций. В работе авторов [64] приводятся следующие недостатки описанного подхода [77]:

1. Геометрия посадочных поверхностей измеряется на одной окружности, лежащей на торцевой или боковой посадочной поверхности. Поэтому точность определения геометрических характеристик стыков уменьшается для широких посадочных поверхностей и становится неопределенной для двух и более однотипных (например, двух торцевых или двух боковых) посадочных поверхностей.

2. Предположение о том, что звенья в основном контактируют по трем точкам, находится в противоречии с требованиями, что детали должны контактировать по секторам, угол которых составляет, не меньше 90 градусов от общей поверхности посадочных поверхностей [87, 100]. Задача контакта двух тел по трем точкам не всегда определена однозначно.

3. В подходе не определен в явном виде вид пары, образуемой соединением двух деталей ротора с условной возможностью поворота одной детали относительно другой. Такая задача совмещена с преобразованием систем координат, решается заново для каждого относительного положения двух деталей, что значительно увеличивает как громоздкость метода виртуальной сборки, так и время расчетов. Исследования, проведенные в докторской диссертации В.В. Непомилуева [77, 60, 76, 78], работах Б.Н. Леонова, В.Ю. Ерошкова [7], М.Е. Ильиной [9, 8, 79, 80, 81], А.Н. Семенова [5], Е.В. Кононовой [82], Е.А. Майоровой [83], В.П. Тимофеева [110], Е.В. Тимофеева [111].

По отношению к информационным моделям деталей, предназначенным для прогноза взаимных биений дисков в роторном пакете в работе [64] приводятся следующие трудности:

1. Значительно возрастает трудоёмкость создания информационных моделей деталей из-за большого числа измерений геометрических параметров посадочных поверхностей.

2. Значительно возрастает трудоёмкость и стоимость создания информационных моделей деталей.

3. Наиболее существенным недостатком информационной модели детали является ее изменчивость. Эта изменчивость вызвана изменениями посадочных поверхностей деталей от сборок и разборок ротора и от эксплуатации ротора.

4. Трудности использования информационной модели связаны с ее громоздкостью. При определенных условиях стоимость создания информационной модели деталей и стоимость последующей виртуальной сборки ротора могут превысить стоимость сборки ротора методом проб при минимальной информации о геометрических характеристиках

деталей.

Для решения приведенных недостатков в работе [64] предлагается разработка моделей, позволяющих определять сборочные параметры ротора и находить оптимальные положения его деталей на основе использования математического аппарата комплексной алгебры. Эксцентриситеты и перекосы звеньев ротора в моделях представляются элементарными векторами, перпендикулярными продольной оси ротора. Двухмерные векторы представляются комплексными числами, за счёт чего достигается уменьшение количества уравнений виртуальной сборки ротора в два раза.

Предложенный в работе [64] подход, основанный на использовании математического аппарата комплексной алгебры, является эффективным и перспективным, однако следует учесть следующие доводы:

1. Подход применим только к моделированию сборки роторов, но не для других узлов.

2. В подходе не используются возможности, открывающиеся при интеграции с создаваемыми цифровыми двойниками изделий.

3. Создаваемые на основе упоминаемого подхода модели имеют возможность прогнозирования только геометрических сборочных параметров и дисбалансов роторов.

4. На двигателестроительных предприятиях широкое распространение получили координатные средства измерений, позволяющие формировать результаты измерений в цифровом виде при высокой дискретности получаемых данных. Повысилась производительность измерения деталей и узлов за счёт использования математического базирования, не требующего выставления деталей относительно системы координат средства измерения.

5. На сегодняшний день стали доступными современные вычислительные технологии, включающие высокопроизводительные кластеры, новое программное обеспечение и математические методы, включающие модели обработки сигналов и технологии машинного анализа и прогнозирования различных параметров.

Учитывая приведенные доводы, идея создания и использования информационных моделей является перспективной. Повышение точности и возможностей разработанных информационных моделей, применимых для сборки роторов, требует устранения имеющихся недостатков, отмеченных в работе [64]. Создание и реализация информационных моделей, предназначенных для управления процессом сборки роторов, требует развития:

- моделей представления геометрии деталей и узлов;
- методов оценки геометрических параметров деталей и узлов, основанных на учёте

условий сопряжения их поверхностей;

– моделей и алгоритмов для определения рациональных условий сборки узлов, обеспечивающих снижение погрешностей геометрических сборочных параметров.

Отмеченные недостатки и возможные пути развития информационных моделей будут учитываться в ходе дальнейшей работы.

Следует отметить повышающуюся значимость сокращения затрат на выполнение сборки и достижение заданного качества изделий. В этом контексте актуальной является задача обоснованного назначения допусков на геометрические параметры деталей и узлов изделий с учётом стоимостного фактора. Совокупные затраты на выполнение сборки и обеспечение заданного качества изделий складываются укрупнённо из трёх групп затрат, первая и вторая из которых были освещены ранее. Первая группа затрат связана с достижением заданной точности деталей в ходе обработки заготовок. Вторая группа включает затраты, связанные с достижением точности сборочных параметров узлов при их сборке. К третьей группе можно отнести затраты, связанные с испытаниями узлов и изделий. Повышение качества сборки узлов и изделий приводит к снижению затрат, связанных с их испытаниями, поскольку уменьшается их количество, вызванное недостаточным качеством узлов. При этом наблюдаются противоречивые тенденции между формированием требований к допускам деталей, узлов и машин. Обобщая приведенные доводы можно отметить, что назначение технических требований на детали, узлы и машины является оптимизационной задачей. Названная задача в зарубежной литературе называется задачей Tolerance Analysis.

Наряду с моделями, позволяющими оценивать параметры точности изделий, особую важность принимают методы коррекции отклонений деталей и узлов. Условия неполной взаимозаменяемости при выполнении сборки авиационных двигателей создаёт необходимость выполнения комплектации, пригонки и приработки деталей. Эффективным методом, повышающим эффективность сборки изделий, является выполнение пригонки деталей и узлов. При этом сокращается объём деталей одного наименования для комплектования узлов. В ряде случаев при единичном производстве пригонка является единственно возможным методом достижения заданной точности сборочных параметров узлов и изделия. Пригонка деталей зачастую выполняется ручным методом, либо на обрабатывающем оборудовании. В случае использования обрабатывающего оборудования с числовым программным управлением может выполняться коррекция управляющих программ, позволяющая учесть различные погрешности, возникающие при формообразовании поверхностей заготовок. К числу таких погрешностей относятся первичные погрешности, связанные с их обработкой и установкой заготовок.

Возможным резервом повышения точности сборочных параметров узлов и изделий является использование цифровых моделей для определения параметров выполнения пригонки, выполняемой как вручную, так и на обрабатывающем оборудовании. Формируемые параметры коррекции геометрии деталей и узлов могут не ограничиваться требованиями к их линейно-угловым параметрам и отклонениям формы и расположения. Наряду с названными параметрами могут формироваться управляющие воздействия, направленные на исправление несовершенства профилей сопрягаемых поверхностей в отдельных точках. Возможно формирование профилей отклонения поверхностей, которые будут способствовать компенсации геометрических погрешностей в комплекте деталей узла. Формирование таких управляющих воздействий возможно за счёт моделирования сопряжений поверхностей деталей при учёте их отклонений формы и расположения. Реализация названного резерва возможна за счёт разработки моделей управления процессом пригонки, использующих результаты измерений деталей и узлов авиационных двигателей.

В контексте обеспечения заданных показателей качества изделий особую значимость приобретает создание цифровых двойников изделий [93, 94]. Известна технология создания цифровых испытательных полигонов (TestBed), позволяющая существенно снизить затраты ресурсов при проектировании и доводке изделий. Аналогичный подход может быть использован для улучшения технологии сборки авиационных двигателей. Актуальной задачей является создание цифровых двойников изделий, позволяющих на основе исходной актуализированной информации оценивать их показатели качества. Применение цифровых двойников авиационных двигателей в ходе их сборки для определения ключевых выходных параметров до выполнения испытаний изделий позволит выявлять ошибки на ранних этапах производства, что существенно снизит производственные затраты. К числу ключевых выходных параметров изделий относятся: уровень вибраций, расход топлива, ресурс и другие параметры.

1.7 Выводы по главе 1. Цель и задачи исследования

1. Ключевой задачей авиадвигателестроения является повышение технических показателей качества производства ГТД при снижении их стоимости. Обеспечение показателей качества неразрывно связано с обеспечением точности изделий. Ключевую роль в обеспечении показателей точности изделий играют производственные технологии. При этом качественное изменение в создании инновационных технологий производства и

ремонта в авиадвигателестроении может быть достигнуто за счёт разработки и использования цифровых технологий. Наблюдается тенденция создания и использования так называемых цифровых двойников процессов, изделий и других объектов.

2. В контексте критических технологий производства авиадвигателей, цифровые двойники технологических процессов должны позволять прогнозировать их основные параметры и позволять осуществлять оптимальное управление производственными процессами. Применительно к производству авиационных газотурбинных двигателей, цифровые двойники изделий должны позволять прогнозировать их технические показатели качества в зависимости от конструкции и индивидуальных особенностей. Индивидуальные особенности изделий могут характеризоваться рядом параметров, отражающих состояние деталей и узлов: конкретные размерные характеристики и распределение центров масс, существующее напряжённо-деформированное состояние, физико-химический состав материалов, микро– и макроструктура материала и прочее.

3. Значимой производственной проблемой, является обеспечение предельного уровня вибраций авиационных газотурбинных двигателей. Проведен анализ статистических данных по возникновению повышенных вибраций серийно производимого изделия «НК». Рассмотрены причины возникновения повышенных вибраций рассматриваемого изделия и сформированы возможные мероприятия, направленные на снижение уровня вибраций роторов, к числу которых относятся:

- повышение значимости контроля и использования его результатов при изготовлении деталей, выполнении сборочных работ, включая комплектование деталей и их доработку методами механической обработки;

- разработка цифровых моделей, позволяющих решать задачи оценки уровня геометрической точности сборочных параметров роторов, а также определять условия их сборки, способствующие обеспечению заданных требований конструкторской документации;

- разработка цифровых моделей, позволяющих решать задачи оценки уровня вибраций изделий при учёте их геометрической точности и уровня дисбалансов, а также определять параметры сборки, способствующих обеспечению установленных требований к ним.

4. Результаты геометрических измерений могут быть использованы при комплектовании деталей и их доработки методами механической обработки в ходе выполнения сборки узлов. Перспективным является использование координатных измерений геометрических параметров объектов, неопределённости которых зависят от множества факторов. Наиболее важными факторами, являются используемые методики

измерения, реальная геометрия деталей и узлов, алгоритмы обработки координат точек получаемых в процессе измерения.

5. Существенное влияние на неопределённости измерений геометрических параметров оказывают используемые алгоритмы обработки координат точек поверхностей. Большинство алгоритмов обработки измеренных координат точек в своей основе используют метод средних поверхностей (метод наименьших квадратов). Применение метода средних поверхностей при обеспечении взаимозаменяемости деталей и узлов в ряде случаев может приводить к неточным оценкам параметров формирующихся посадок, из-за следующих причин:

- недостаточная жёсткость деталей и узлов, приводящая к существенным деформациям в процессе их сборки;
- сопряжения деталей и узлов выполняются одновременно по ряду поверхностей, что приводит к их сложному пространственному расположению;
- отклонения формы поверхностей деталей и узлов являются существенными по отношению к заданным требованиям по точности собираемого узла.

В связи с этим важной задачей является разработка принципиально новых алгоритмов обработки результатов измерений, основанных на использовании новых подходов и методов, учитывающих особенности реальной геометрии деталей и узлов.

6. Проведённый анализ состояния вопроса прогнозирования и обеспечения точности геометрических параметров деталей узлов выявил комплекс моделей, решающих задачи оценки геометрических сборочных параметров изделий. Упомянутые модели не удовлетворяют всем требованиям, создающим возможности их использования для цифровизации процесса сборки изделий.

7. Множество роторов авиационных двигателей являются гибкими. Технология балансировки роторов оказывает существенное влияние на уровни вибраций авиадвигателей. Балансировка роторов авиационных двигателей в большинстве случаев выполняется на частотах вращения, которые ниже по отношению к рабочим. В ряде случаев это может приводить к повышенным вибрациям. Создание технологических возможностей для балансировки роторов на рабочих частотах вращения не всегда является оправданным по экономическим соображениям. Возможным вариантом решения приведенной проблемы является разработка и использование математических моделей, позволяющих оценивать уровни дисбалансов и вибраций роторов машин в ходе их балансировки. Оценки дисбалансов и уровня вибраций машин во всём диапазоне рабочих частот могут использоваться для определения вариантов их уравнивания. Аналитический обзор показал возможности современных математических моделей, основанных на методе

конечных элементов, для оценки уровня дисбалансов и вибраций роторов машин, в том числе гибких. Исходными данными для построения таких моделей оценки дисбалансов и уровня вибраций авиационных двигателей могут являться погрешности геометрических параметров деталей и узлов, а также уровни их неуравновешенностей. Приведенные исходные данные возможно получить в существующих производственных условиях за счёт использования современных координатно-измерительных машин и балансировочного оборудования.

8. Особенностью производства газотурбинных двигателей является реализация методов неполной взаимозаменяемости. Для ответственных сопрягаемых деталей характерны индивидуальные геометрические параметры, обеспечивающие работоспособность изделий. Обеспечение размерно-точных показателей изделий в производстве реализуется комплексом мероприятий, содержащим высокоточный, производительный контроль, оценку результатов и корректировку технологических процессов изготовления деталей и сборки изделий. Важным этапом является оценка достигаемой точности сборочных параметров изделий.

9. Идея создания и использования информационных моделей является перспективной. Создание и реализация информационных моделей, предназначенных для управления процессом сборки роторов, требует развития:

- моделей представления геометрии деталей и узлов;
- методов оценки геометрических параметров деталей и узлов, основанных на учёте условий сопряжения их поверхностей;
- моделей и алгоритмов для определения рациональных условий сборки узлов, обеспечивающих снижение погрешностей геометрических сборочных параметров.

Отмеченные недостатки и возможные пути развития информационных моделей должны быть учтены в ходе дальнейшей работы.

В связи с представленными выводами была поставлена **цель исследования**: Повышение точности и снижение трудоёмкости технологических процессов сборки роторов ГТД за счёт разработки методов для обеспечения требуемой точности сборки и снижения неуравновешенностей роторов, основанных на использовании в производственном процессе действительных моделей деталей, учитывающих результаты измерения их геометрии, рассчитанные контактные деформации при сборке, а также динамические параметры сборочных единиц в составе роторов. Термин «Действительная» модель введён впервые. Его содержание будет подробно рассмотрено во второй главе.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработка состава и основных принципов создания действительных моделей

деталей и узлов для совершенствования технологий производства ГТД по повышению управляемости выполнения сборочных операций, их точности и производительности.

2. Разработка обобщённой методики создания действительных моделей деталей и узлов ГТД с учётом специфики сборочных параметров.

3. Разработка метода определения действительных геометрических параметров деталей и сборочных параметров узлов с помощью виртуальных мер (ВМ) и комплектных виртуальных сборок (КВС), которые учитывают сопряжения поверхностей объектов, то есть их макрогеометрию.

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.

5. Автоматизация операции пригонки деталей при сборке узлов с использованием действительных моделей деталей, обеспечивающая повышение точности их взаимного расположения и увеличение площади контакта поверхностей.

6. Разработка метода снижения неуравновешенностей роторов ГТД с помощью балансировки на цифровой модели, применяемой 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 возмущающих воздействий, возникающих от их неуравновешенностей.

7. Разработка и верификация модели определения рациональных угловых положений деталей ротора ГТД для снижения трудоёмкости и повышения точности сборочных операций.

Приведенные задачи будут рассматриваться в последующих главах.

ГЛАВА 2 ФОРМИРОВАНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ

2.1 Принципы формирования и использования действительных моделей деталей и узлов ГТД в производстве авиадвигателей в условиях цифрового производства

Цифровизация производства подразумевает разработку и внедрение цифровых моделей в процессы проектирования изделий и управления производством ГТД. Комплекс цифровых моделей, предназначенный для повышения управляемости производством ГТД и их технических показателей, должен обладать следующими характеристиками:

- охватывать сопряженные с производством этапы жизненного цикла изделия, включая конструкторско-технологическую подготовку и эксплуатацию;
- обеспечивать интеграцию этапов конструкторской и технологической подготовки производства;
- обеспечивать интегрированный подход с возможностью комплексного применения в решениях сопряженных конструкторских и технологических задач.

Ниже описываются этапы создания и использования действительных моделей, позволяющих решать конструкторские и технологические задачи, направленные на повышение технических показателей производства ГТД.

Действительная модель – это цифровая модель сборочных единиц и/или производственных процессов технических объектов, содержащая совокупность действительных размеров, технических требований, физико-механических свойств, функциональных и иных условий работы, обладающая свойствами необходимости и достаточности её информационного содержания для решения конструкторских, технологических и иных задач.

В понятии «Действительная модель» используется термин «действительная», который тесно связан с метрологическими основами, поскольку для определения интересующих параметров объектов необходимо выполнять их измерения. Использование терминов «истинная» или «реальная» в контексте данного исследования требует уточнения, их можно использовать в теоретических исследованиях, что отражается в рекомендациях по межгосударственной стандартизации [73]. Действительные модели могут описывать геометрические, механические, физические, химические и другие параметры описываемого объекта. Важными рассматриваемыми геометрическими параметрами объектов в авиационных двигателях являются:

- форма поверхностей, которая в общем случае является поверхностью двойной кривизны, по результатам измерений представляется отдельными координатами точек;
- параметры расположения – линейные и угловые координаты характерных точек;
- отклонение формы и расположения поверхностей относительно номинально заданной конструктором формы объекта;
- вариация формы рассматриваемых поверхностей;
- случайные и систематические погрешности.

Важными рассматриваемыми физическими параметрами объектов в авиационных двигателях являются: центр масс, главная центральная ось инерции, распределение масс по объёму рассматриваемых объектов. В качестве рассматриваемых объектов могут выступать: заготовки, детали, узлы, сборочные единицы, изделия, технологические объекты и др. Действительная модель объекта, отражающая его геометрические параметры, может быть получена на основе измерений и обработки их результатов. Учитывая требования к цифровым моделям, предназначенным для решения конструкторских и технологических задач, сформировано пять принципов создания и использования действительных моделей: информационной достаточности, информационной необходимости, целеполагания, оперативности управления, необходимого и достаточного количества точек контроля и управления процессами производства ГТД. Раскроем содержание названных принципов.

1. Под принципом информационной достаточности понимается степень детализации или точность представления содержания действительных моделей, позволяющая описывать количественные характеристики исследуемых процессов обработки деталей и сборки узлов с требуемой точностью для решения задачи обеспечения заданных рабочих и эксплуатационных параметров изделий.

2. Под принципом информационной необходимости понимается содержание в действительной модели необходимого (и достаточного) для решения задачи обеспечения заданных рабочих и эксплуатационных параметров изделий, количественных характеристик деталей и сборок, обеспечивающих их получение в технологических операциях, размерных и функциональных связей между ними.

В частности должно обеспечиваться соответствие размерных и функциональных связей в изделиях. Формирование действительных моделей деталей и узлов ГТД должно выполняться по результатам анализа размерных и функциональных связей в изделиях. Формирование размерных параметров действительных моделей деталей и узлов ГТД должно производиться таким образом, чтобы можно было установить функциональную

либо количественную связь с рабочими и эксплуатационными характеристиками производимых изделий.

3. Под принципом целеполагания понимается соответствие содержания действительных моделей поставленным целям и решаемым задачам исследований. Создание и использование действительных моделей деталей и узлов ГТД должно производиться, исходя из решаемых технологических и конструкторских задач. К числу решаемых задач относятся размерный анализ и синтез в технологических процессах изготовления деталей и сборки узлов ГТД, корректировка размерных параметров обработки заготовки, определение оптимальных параметров сборки узлов ГТД и др.

4. Под принципом оперативности управления понимается обеспечение достаточной скорости реакции в системе управления процессами производства ГТД с применением действительной модели. Разрабатываемое программное обеспечение и алгоритмы, использующие действительные модели деталей и узлов ГТД, должны иметь требуемую производительность вычислений, позволяющую формировать актуальные информационные данные для управления производством ГТД.

5. Принцип необходимого и достаточного количества точек контроля и управления процессами производства ГТД. Количество точек контроля и управления процессами производства ГТД должно обеспечивать управляемость параметрами технологических процессов при приемлемых затратах, обеспечивающих достижение требуемых рабочих и эксплуатационных характеристик производимых изделий.

Предложенные принципы направлены на создание и использование действительных моделей деталей и узлов на разных этапах производства ГТД.

Для обоснования взаимосвязи конструкторских и технологических уровней при создании и производстве авиадвигателей с повышенными эксплуатационными характеристиками, при учёте особенностей цифровизации, рассмотрим структурно-функциональную диаграмму взаимосвязи конструкторских и технологических уровней подготовки производства (рисунок 2.1, на следующей странице).

Структурно-функциональная диаграмма, приведенная на рисунке 2.1, представлена матрицей. Строки матрицы соответствуют уровням функциональных связей. В столбцах структурно-функциональной схемы выделяются: взаимосвязанные параметры, основные этапы жизненного цикла авиадвигателей, возникающие и формируемые функциональные связи и соответствующие им конструкторские и технологические задачи, важные функции деятельности служб предприятий и комплекс различных цифровых моделей.

Уровни	Параметры	Этапы	Связи (задачи)	Функции	Применяемые модели
1 уровень Эксплуатационные связи	Показатели качества изделий (ПКИ), Сборочные параметры (СП)	Испытаний		– Прогнозирование ПКИ – Определение требований к сборочным параметрам	– Прогнозирования ПКИ – Определения требований к сборочным параметрам
2 уровень Сборочные связи	Геометрические параметры (ГП) деталей	Технологической подготовки Сборки	① ②	– Прогнозирование сборочных параметров – Синтез требований к сборочным параметрам	– Прогнозирования сборочных параметров – Действительные модели сборочных единиц
3 уровень Связи в деталях	Построение технологического процесса (ТП) и способы обеспечения требований	Технологической подготовки Обработки заготовок	③ ④	– Размерный анализ в ТП – Размерный синтез в ТП	– Размерных связей в ТП – Действительные модели деталей
4 уровень Связи в технологической системе (ТС)	Параметры, связанные с: – установкой – обработкой – базированием	Технологической подготовки Обработки заготовок Заготовительный (аддитивный)	⑤ ⑥	– 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 – Коррекции управляющих программ оборудования с ЧПУ – Процессов обработки – Аддитивных процессов – Действительные модели заготовок
5 уровень Структурные связи в ТС	Оснастка, оборудование, инструмент и др. элементы ТС		⑦ ⑧	– Анализ влияния первичных факторов – Выбор оптимальной конструкции	– Действительные модели поверхностей деталей – Действительные модели технологической оснастки – Оценки первичных погрешностей
6 уровень Элементы ТС	Установочные и зажимные элементы, обрабатываемый материал ...		⑦ ⑧	– Оптимальный выбор условий обработки или выращивания материалов	– Действительные модели элементов технологической оснастки и технологических систем
7 уровень Материалов	Свойства материала			– Уточнение параметров ТО – Уточнение свойств материалов	– Материала

Рисунок 2.1 – Структурно-функциональная диаграмма взаимосвязи конструкторской и технологической сфер при создании и производстве специальной техники в условиях цифрового производства

Рассмотрим содержание уровней функциональных связей.

Уровень 1 (эксплуатационные связи) характеризуют обеспечение основных параметров изделия. Рассматриваемые на данном уровне сборочные параметры изделий оказывают существенное влияние на основные эксплуатационные характеристики изделий. К геометрическим сборочным параметрам изделия относятся осевые и радиальные зазоры в соединениях и передачах (K_{Σ} , \bar{K}_{Σ}), отклонение формы (K_{Φ}) поверхностей проходных сечений в изделии, шероховатости ($K_{\text{ш}}$) рабочих и конструкторских поверхностей и т.д., угловое расположение главной оси инерции ротора относительно его оси вращения. Уровень вибраций, изгибные формы и амплитудно-частотная характеристика ротора зависят от углового расположения главной оси инерции ротора относительно его оси вращения, локальных и суммарных технологических дисбалансов.

Уровень 2 (сборочные связи) характеризуют обеспечение выходных параметров изделия в процессе сборки. В структурно-функциональной схеме, приведенной на рисунке 2.1, рассмотрена одна из веток обеспечения основных геометрических размеров (K_{Σ}), сборочных связей, которая зависит от геометрических параметров деталей, входящих в сборочную единицу ($K_1, K_2, K_3, \dots, K_n$), а также от других факторов, воздействующих на детали в процессе сборки. Эти воздействия проявляются как силовые P_c (усилие, последовательность и неравномерность затяжки соединений, усилие запрессовки и время выдерживания соединяемых деталей под нагрузкой и т.п.) и температурные T_c (нагрев или охлаждение деталей в процессе сборки). Существенное влияние на результирующую точность сборки оказывают реальные (действительные) отклонения формы и расположения сопрягаемых поверхностей деталей, а также их взаимное положение друг относительно друга. Для прогнозирования геометрических сборочных параметров с целью снижения трудоёмкости сборочных работ посредством определения оптимального взаимного расположения деталей на данном этапе перспективным является использование технологии виртуальной сборки [77].

На уровне 3 (связи в пределах детали) рассматриваются связи между конструкторскими и технологическими операционными размерами. Связи должны отражать особенности построения технологических процессов изготовления деталей и способы обеспечения требований, заданных в чертеже. Современные технологические возможности оборудования и вычислительных систем, использование цифровых измерительных средств и оборудования с ЧПУ позволяют установить необходимые связи между конструкторскими и операционными размерами. Полученные цифровые связи уменьшают влияние технологической оснастки на точность обработки заготовки,

уменьшают количество переустановок между переходами в операции, что в итоге позволяет существенно повысить точность и снизить трудоёмкость технологических процессов. Цифровые связи могут быть образованы посредством выполнения измерений на координатно-измерительных машинах либо станках с ЧПУ с целью формирования актуальной базы данных действительной геометрии, включающей результаты измерений заготовок и деталей, определения размерно-точностных параметров обработки заготовок, скорректированных под действительную геометрию управляющих программ оборудования с ЧПУ.

Уровень 4 (связи в технологической системе). На этом уровне выделяются основные параметры и первичные погрешности, связанные с базированием, установкой и обработкой заготовки (a_{ny} , a_{no} , a_{δ}), а также контролем (a_k), которые формируют заданные операционные размеры деталей (A_n).

Уровень 5 (структурные связи технологических систем) включает в себя структурированную совокупность групп параметров, детализирующих параметры четвёртого уровня. Рассматривая на примере размеров, определяющих установку заготовки (a_{ny}), можно отметить, что они находятся во взаимосвязи с используемой оснасткой ($A_{пр}$) и оборудованием ($A_{ст}$), которые определяют точность и жёсткость. Погрешность обработки (a_{no}), зависит от кинематической точности применяемого оборудования ($A_{кин}$), величины отжатия ($A_{отж}$), возникающих в процессе обработки заготовки, износом режущего инструмента и оборудования, вибрациями и т.д. Величина параметра отжатия ($A_{отж}$) заготовок в процессе обработки, взаимосвязана с величиной удаляемого припуска металла, режимов обработки (A_z , A_v , A_s) (уровень 6) в данной операции и других факторов.

Уровень 7 представлен совокупностью параметров, характеризующих конструкционный материал заготовок и элементов технологических систем. Параметры твёрдость, предел текучести, предел прочности оказывают значительное влияние на выбор режимов обработки (A_z , A_v , A_s).

Рассматриваются этапы жизненного цикла: технологической подготовки, заготовительный, включая аддитивное выращивание заготовок, обработки заготовок, сборки и испытаний. Между названными этапами возникают функциональные связи и соответствующие им конструкторские и технологические задачи:

1) анализ характера и степени влияния геометрических и физических сборочных параметров на эксплуатационные показатели изделия;

2) синтез технических требований к геометрическим и физическим сборочным параметрам, исходя из условий обеспечения заданных эксплуатационных показателей изделия с учётом минимизации его стоимости. Задача известна как робастный дизайн;

3) анализ характера и степени влияния размерно-точных параметров деталей на сборочные параметры изделия;

4) синтез размерно-точных параметров деталей, обеспечивающих заданные требования к сборочным параметрам изделия с учётом минимизации его стоимости;

5) анализ влияния параметров технологических систем, в том числе установки и обработки, конфигурации конструкции заготовок и оснастки на обеспечиваемые в процессе обработки размерно-точные параметры изготовления деталей в технологическом процессе;

6) синтез требований к параметрам технологических систем, в том числе к параметрам установки и обработки, конфигурации конструкции заготовок и оснастки, исходя из требований обеспечения заданных требований к размерно-точным параметрам изготовления деталей в технологическом процессе;

7) анализ влияния конфигурации установочных и зажимных элементов, свойства материала и других параметров элементов технологических систем на параметры установки и обработки технологических систем;

8) синтез конфигурации установочных и зажимных элементов, определение требований к свойствам материала и других параметров элементов технологических систем, обеспечивающих заданные требования к параметрам установки и обработки технологических систем.

Анализируя приведенные выше технологические задачи можно выделить функции, которые должны быть реализованы посредством цифровых моделей. Приведём краткое описание предназначения цифровых моделей и выполняемых ими функций.

1. Модели прогнозирования показателей качества изделий (ПКИ) по значениям величин сборочных параметров узлов или геометрических параметров деталей.

2. Модели определения требований к точности сборочных параметров в зависимости от показателей качества изделий. Указанные модели позволяют определять уровень требований к точности сборочных параметров узлов, обеспечение которых в производстве позволит достигать заданный уровень ПКИ изделий.

3. Модели прогнозирования величины сборочных параметров, исходя из размерных параметров деталей, входящих в сборочную единицу. Указанные модели должны учитывать отклонение формы и расположения поверхностей, их контактные и объёмные деформации, свойства конструкционных материалов, последовательность, схему и параметры выполнения сборки, конструктивные особенности деталей, входящих в сборочную единицу и множество других факторов, оказывающих влияние на сборочные параметры авиадвигателей. Модели прогнозирования величины сборочных параметров в

большой степени относятся к технологической сфере деятельности в силу специфики и требований производственных работ по сборке новых и ремонтных изделий. Вместе с тем эти модели могут использоваться на этапе проектирования авиадвигателей для решения проверочных задач при назначении допусков в изделиях, в ходе которых должны учитываться эксплуатационные факторы, действующие в изделии. Таким образом, модели прогнозирования величины сборочных параметров также применяются в конструкторской сфере деятельности.

4. Действительные модели сборочных единиц. Определение термина «действительная модель» приведено ранее. Действительные модели сборочных единиц могут быть базовыми для моделей прогнозирования ПКИ и определения оптимальных требований к точности сборочных параметров в зависимости от величин заданных ПКИ. В состав действительных моделей сборочных единиц должны входить действительные модели деталей. В технологической сфере деятельности действительные модели сборочных единиц могут использоваться при выполнении сборочных работ узлов авиадвигателей, что позволит в совокупности с другими моделями, которые будут описаны ниже, решать задачи анализа влияния геометрических погрешностей на результирующую точность сборочных параметров, а также определять пути достижения заданной точности. В конструкторской сфере деятельности действительные модели сборочных единиц позволят решать задачи достижения заданных требований к ПКИ.

5. Действительные модели деталей. Как было отмечено, действительные модели деталей входят в состав действительных 3D моделей сборочных единиц и должны учитывать отклонение формы и расположения поверхностей, конструктивные особенности, физические и другие необходимые параметры. Создание действительных моделей производится с использованием высокоточных измерительных средств, позволяющих получать массивы измеренных точек поверхностей и физические параметры деталей, описываемых и представленных далее в модели в математической форме.

6. Модели размерных связей предназначены для решения технологических задач размерного анализа и синтеза при проектировании и улучшении технологических процессов.

7. Модели размерных связей в технологических системах, позволяющие оценивать операционные погрешности.

8. Модели (алгоритмы) обработки и анализа измеренных данных. Технологический контроль осуществляется на разных этапах технологического процесса. Формируемая по результатам контроля база данных действительной геометрии позволит повысить эффективность производственного процесса за счет установления функциональных связей

между этапами технологического процесса и параметрами действительной геометрии. Информация, полученная в результате измерений, должна учитывать специфику образования функциональных связей на разных уровнях для решения технологических задач. Эта информация является базой для создания действительных 3D моделей поверхностей, деталей и сборочных единиц. Особую роль в подготовке и получении информации измерений играют модели обработки и анализа данных измерений. При использовании известных моделей обработки данных измерений, реализованных в программном обеспечении координатно-измерительных машин, в ряде случаев возникают проблемы с точностью и достоверностью получаемых результатов. Наиболее распространённые модели, основанные на методе средних, зачастую не учитывают особенностей отклонений геометрии сопрягаемых поверхностей деталей в сборке, что приводит к недостоверной оценке сопряжений деталей и сборочных единиц. Для повышения точности получаемых результатов, с учётом технологических особенностей изготовления и сборки ДСЕ, необходимы специализированные модели обработки и анализа данных измерений, которые должны учитывать особенности и специфику формирования функциональных связей.

9. Модели коррекции 3D геометрии деталей и сборочных единиц. Данные модели предназначены для компенсации геометрических отклонений при размерной обработке деталей и сборочных единиц.

10. Модели процессов обработки заготовок. Названные модели предназначены для определения параметров точности обработки заготовок при учёте условий выполнения технологических операций.

11. Модели аддитивных процессов, позволяющие определять параметры точности формообразования заготовок при учёте условий выполнения операции.

12. Действительные модели поверхностей деталей. Эти модели являются базовыми для создания действительных моделей ДСЕ и должны учитывать отклонение формы и расположения поверхностей, конструктивные особенности и некоторые другие параметры при необходимости. Создание действительных 3D моделей производится на основе данных, получаемых с использованием высокоточных измерительных средств.

13. Действительные модели технологической оснастки, используемые для определения геометрических параметров, характеризующих их точность.

14. Действительные модели элементов технологической оснастки и технологических систем (систем СПИД), используемые при формировании действительных моделей оснастки.

15. Модели первичных погрешностей обработки заготовок.

16. Модели свойств материала деталей, позволяющие выполнять выбор и оптимизацию режимов с учётом прочностных и физико-химических свойств материалов.

В приложении Б приведена IDEF0 диаграмма, показывающая использование действительных моделей деталей и узлов при решении задач прогнозирования и обеспечения показателей качества ГТД.

Рассмотрим в следующем подразделе вопросы создания действительных моделей деталей и сборочных единиц для решения технологических задач при обеспечении качества в производстве ГТД.

2.2 Методика создания действительных геометрических моделей деталей и узлов

Поскольку геометрия изделия оказывает значительное влияние на его показатели качества, то ей уделяется особое внимание в технологии производства авиадвигателей. Действительная модель объекта, отражающая его геометрические параметры, может быть создана на основе измерений и обработки их результатов. Значимую роль в создании действительных моделей объектов занимают алгоритмы и процедуры обработки измеренных данных. При выполнении измерений параметров объекта неизбежно возникают погрешности, которые имеют место при создании действительных моделей объектов. Важной задачей является рассмотрение процесса измерения интересующих параметров, присущих им погрешностей и путей их снижения. Рассмотрим методику создания геометрических действительных моделей на основе информации, получаемой с использованием координатных средств измерений. Методика создания действительных моделей включает в себя шесть этапов и представлена в виде блок-схемы (рисунок 2.2).

В ходе изложения методики уделим внимание присущим для каждого этапа погрешностям, их оценке и путям снижения. На первом этапе создания действительных моделей объектов выполняется подготовка измеренного массива координат точек поверхностей в следующей последовательности: 1) предварительная обработка измеренных данных; 2) фильтрация; 3) создание полигональной модели. Содержание предварительной обработки зависит от используемого средства измерения.

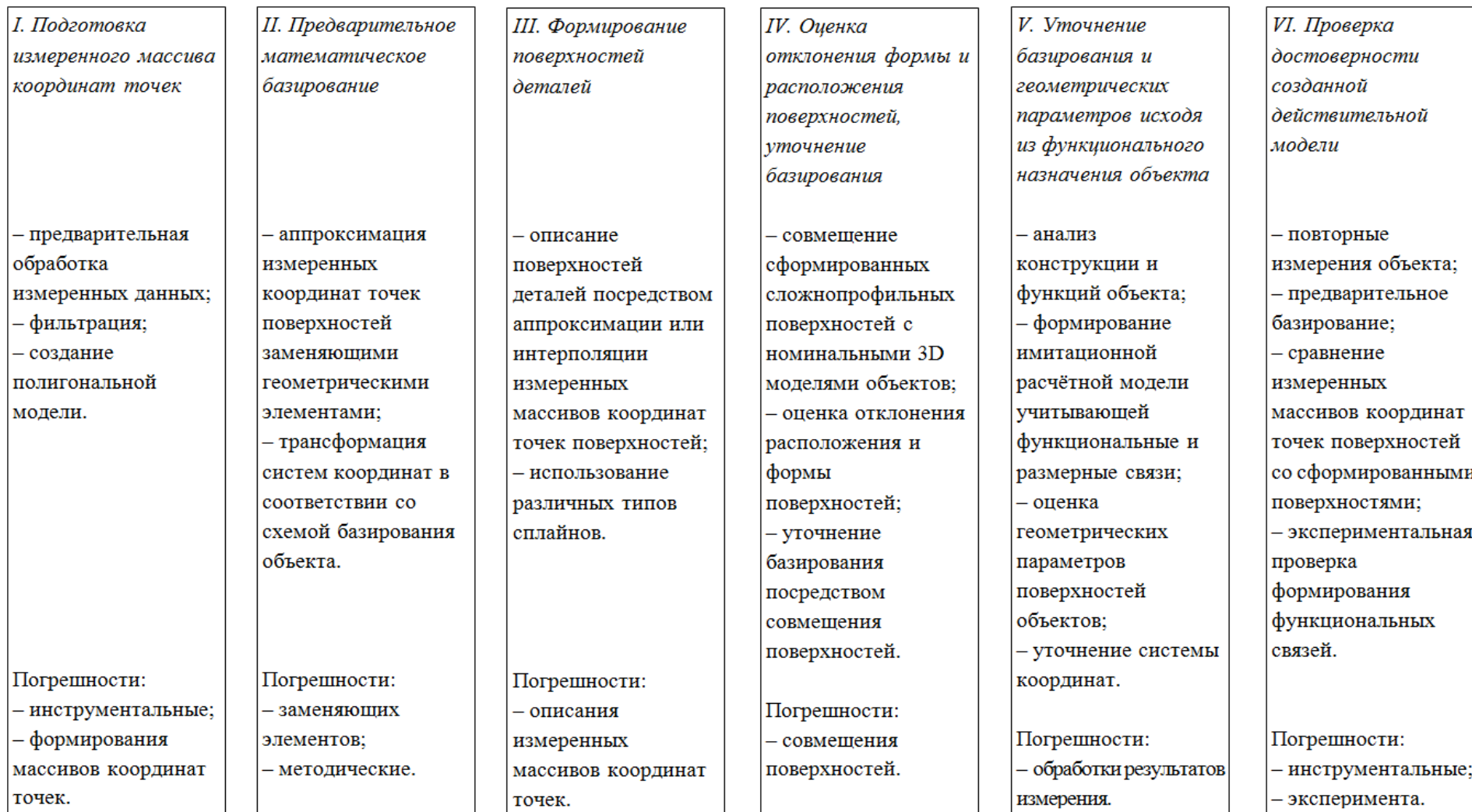


Рисунок 2.2 – Блок-схема методики создания действительных моделей деталей и узлов ГТД

В случае выполнения измерений на контактных координатно-измерительных машинах наконечником сферической формы может возникнуть необходимость расчёта точки касания посредством процедуры компенсации радиуса измерительного наконечника. Возникают погрешности определения центра измерительного наконечника и компенсации его радиуса. Погрешности определения центра измерительного наконечника указываются в паспорте средства измерения [74, 148, 149, 150,] двумя способами. Первый способ отражает погрешность измерения расстояния между двумя точками, включает систематическую и линейно возрастающую составляющие в зависимости от измеряемого расстояния. Погрешности компенсации радиуса измерительного наконечника имеют сложный характер и зависят от множества факторов. В общем случае основной причиной возникновения погрешности компенсации радиуса измерительного наконечника является неточная оценка вектора нормали в точке контакта измерительного наконечника и измеряемой поверхности. Ошибки в оценке вектора нормали могут возникать из-за отличия формы и расположения измеряемой и номинальной поверхностей, неточного подвода измерительного наконечника вдоль вектора нормали и других причин.

При использовании бесконтактных средств измерений, в том числе лазерных или оптических, возникают погрешности измерений координат точек поверхностей объектов, которые зависят от качества поверхности и температуры внешней среды. Измерение объектов на бесконтактных средствах измерений выполняется с нескольких ракурсов или для разных взаимных положений объекта и средства измерения. Полученные массивы координат точек поверхностей в разных измерениях одного и того же объекта необходимо совмещать для получения единого массива измеренных точек. Совмещение координат измеренных точек выполняется несколькими способами. Первый способ заключается в совмещении массивов координат точек по перекрывающимся областям. Второй способ заключается в использовании реперных точек, наносимых на измеряемые поверхности в виде контрастных либо специализированных кодированных меток. При совмещении массивов координат точек поверхностей, полученных в разных измерениях одного и того же объекта, возникают погрешности, зависящие от погрешности измерения координат точек и отклонения формы поверхностей.

Фильтрация результатов измерений может выполняться с целью исключения выбросов и случайных погрешностей, вносимых средствами измерений. Фильтрация может выполняться с использованием различных фильтров, например, фильтра Гаусса, цифровых и др. Создание полигональной модели измеренных поверхностей объектов необходимо выполнять в случае значительного количества измеренных координат точек, что

достигается при использовании бесконтактных средств измерений. Контактные координатно-измерительные машины для получения значительных объёмов измеренных данных оснащаются сканирующими датчиками. Предварительная обработка результатов измерений зачастую реализована в программном обеспечении, которым комплектуются измерительные средства. Однако с целью автоматизации создания действительных моделей, а также уточнения процесса их создания, названные действия могут выполняться в специально создаваемом программном обеспечении.

В ходе второго этапа выполняется предварительное математическое базирование с целью определения собственной системы координат измеряемого объекта, включающее:

– аппроксимацию измеренных координат точек поверхностей заменяющими геометрическими элементами;

– формирование последовательности трансформации систем координат в соответствии со схемой базирования объекта и трансформации системы координат.

Аппроксимация измеренных точек поверхностей выполняется соответствующими типовыми геометрическими элементами, к которым относятся: «прямая», «окружность», «плоскость», «цилиндр», «сфера», «конус». Широко известны и наиболее часто используются три метода аппроксимации:

1) определение среднего элемента по методу наименьших квадратов (по Гауссу);

2) по условию минимальной зоны, в котором заменяющий элемент является средним между максимальным и минимальным элементом номинальной формы, между которыми расположены все измеренные точки;

3) исходя из условий прилегания или собираемости изделия (аппроксимация по прилеганию).

При использовании методов аппроксимации возникают погрешности определения геометрических параметров элементов. Возникающие погрешности можно условно разделить на две составляющие группы. В первую группу можно отнести методические погрешности используемого метода аппроксимации. Сущность методических погрешностей заключается в несоответствии оцененных геометрических параметров действующим функциональным связям на всех уровнях. Например, оцененные геометрические параметры заменяющих элементов могут недостоверно характеризовать достигаемые сопряжения деталей в сборочных единицах. Использование недостоверных геометрических параметров приведёт к ошибкам в расчётах сборочных параметров сборочных единиц и изделий. Во вторую группу можно отнести погрешности, связанные с выборочным характером процесса координатных измерений и зависящие от количества и расположения измеряемых точек на контрольных поверхностях.

Формирование последовательности трансформации систем координат выполняется в соответствии со схемой базирования объекта, которая приводится в конструкторских чертежах деталей и сборочных единиц. Последовательность трансформации систем координат должна ограничивать шесть степеней свободы в трехмерном пространстве, три из которых поступательные, соответственно по осям X , Y , Z , три другие – вращательные вокруг данных осей. Наиболее часто используемым правилом трансформации систем координат является правило 3–2–1, которое предусматривает задание ограничивающих степеней свобод в следующей последовательности:

- а) двух вращательных степеней и одной поступательной;
- б) одной вращательной и поступательной;
- в) одной поступательной.

Один из распространённых способов базирования роторных деталей авиационных двигателей включает следующую последовательность:

а) использование заменяющего элемента «плоскость» для задания двух вращательных степеней свободы по её вектору нормали и одной поступательной по её центральной координате;

б) использование двух заменяющих элементов «окружность» или «цилиндр» для построения прямой между двумя точками центров и задания по ней одной вращательной степени свободы, находящейся в плоскости вращения заменяющего элемента «плоскость» (определённого на предшествующем этапе), а также задание одной поступательной степени свободы по координате центра заменяющего элемента «окружность»;

в) использование координаты центра одного из двух заменяющих элементов «окружность» или «цилиндр» для задания оставшейся поступательной степени свободы.

В программном обеспечении координатно-измерительных машин предусматривается шесть способов математического базирования детали по следующим заменяющим элементам:

- «плоскость» и два элемента «прямая»;
- «плоскость», «прямая» и «окружность»;
- «плоскость», два элемента «окружность»;
- «плоскость», «точка» и «прямая»;
- «цилиндр», «прямая» и «точка»;
- свободное базирование, предполагающее произвольный выбор заменяющих элементов измеряемого объекта.

В ходе формирования последовательности трансформации систем координат могут возникать методические погрешности, которые недостоверно отражают сопряжения деталей и сборочных единиц.

На третьем этапе создания действительных моделей объектов выполняется формирование поверхностей деталей посредством аппроксимации или интерполяции измеренных массивов координат точек поверхностей посредством сплайнов в виде профилей или поверхностей. В распространённых коммерческих CAD, CAM, CAE системах используются NURBS сплайны. Для представления геометрии объектов может использоваться полигональный метод описания поверхностей, например в виде набора триангуляционных фасетов. При описании поверхностей деталей посредством аппроксимации или интерполяции измеренных массивов координат точек могут возникать погрешности, связанные с недостаточным количеством измеренных точек, используемым методом описания и выбором параметров. Появление таких погрешностей наиболее вероятно на крайних границах описываемой области, а также между измеренными опорными точками. В случае использования аппроксимации измеренных данных, погрешности описания поверхностей деталей могут появляться и в опорных точках.

Четвёртый этап создания действительных моделей включает оценку отклонения формы и расположения поверхностей, в том числе сложнопрофильных, а также уточнение базирования, включающее:

- анализ конструкции, выбор способа и последовательности совмещения сложнопрофильных поверхностей;
- совмещение сложнопрофильных поверхностей с номинальными 3D моделями объектов;
- оценка отклонения расположения поверхностей;
- оценка отклонения формы поверхностей;
- уточнение базирования посредством совмещения поверхностей.

Четвёртый этап выполняется главным образом для объектов, имеющих сложнопрофильные поверхности, которые задаются конструктором относительно систем координат, включающих в себя совокупность осей и начальных точек. Наилучшее совмещение измеренных массивов координат точек сложнопрофильных поверхностей с номинально заданными поверхностями в 3D моделях позволяет определить системы координат, связанные с рассматриваемыми поверхностями. Выполнение наилучшего совмещения поверхностей должно учитывать логику задания системы координат конструктором, которая связана со сложнопрофильными поверхностями. По этой причине необходимо выполнить анализ конструкции, выбор способа и последовательности

совмещения сложнопрофильных поверхностей. Оценка отклонения формы выполняется посредством определения отклонения измеренных координат точек и номинальных поверхностей 3D моделей. Оценка отклонения расположения измеренных координат точек осуществляется посредством определения величин сдвигов и поворотов систем двух систем координат. Первой сравниваемой системой координат является система координат, определённая на третьем этапе создания действительных моделей объектов. Второй системой координат является система координат, полученная после выполнения операции наилучшего совмещения координат измеренных точек и номинальной 3D модели объекта. Анализ геометрических параметров, характеризующих отклонение расположения, позволит определить необходимость уточнения базирования посредством совмещения поверхностей. Уточнение базирования может выполняться для разных степеней свободы объекта.

При выполнении совмещения поверхностей могут возникать погрешности оценки их взаимного расположения. Названные погрешности зависят от используемого количества и расположения измеренных координат точек, а также кривизны поверхностей. Малая кривизна измеряемых поверхностей приводит к погрешностям совмещения соответственно для тех направлений координатных осей, для которых она имеет малое значение. Объясняется это тем, что сравнительно малое значение кривизны поверхностей приводит к малым градиентам целевых функций вдоль соответствующих направлений координатных осей при использовании алгоритмов наилучшего совмещения. Примером служит оценка погрешности расположения профилей лопаток. Погрешность совмещения профилей лопаток компрессора будет наибольшей в направлении хорды, если не учитывать измеренные координаты точек входных и выходных кромок, поскольку профили спинки и корыта имеют малую кривизну вдоль хорды.

В процессе выполнения пятого этапа производится уточнение базирования и рассчитанных геометрических параметров, исходя из функционального назначения объекта в следующей последовательности:

- анализ конструкции и выполняемых функций объекта;
- формирование имитационной расчётной модели, учитывающей функциональные и размерные связи;
- выполнение моделирования с целью оценки геометрических параметров отдельных поверхностей деталей или сборочных единиц;
- преобразование массивов координат точек поверхностей в соответствии с уточнённой системой координат.

Выполнение пятого этапа позволяет учесть функциональные и конструкторские особенности измеряемых изделий, возникающие в процессе сборки и эксплуатации изделий, которые выявляются в ходе анализа конструкции и выполняемых функций объекта. Рассматриваются размерные связи, возникающие между сопрягаемыми деталями либо между сборочными единицами. В ходе анализа уделяется внимание факторам, влияющим на точность формирования размерных связей. К числу данных факторов относятся протяжённость сопрягаемых базовых поверхностей деталей и сборочных единиц, возможные геометрические отклонения сопрягаемых поверхностей, взаимное влияние сопрягаемых поверхностей на прогнозируемое расположение объектов и силовое воздействие на детали с учётом их жёсткости. Для учёта названных факторов может быть сформирована имитационная расчётная модель, учитывающая функциональные и размерные связи. Особенности разработки имитационных расчётных моделей будут излагаться в последующих подразделах и главах. Моделирование с использованием разработанных имитационных моделей может позволить получить оценки геометрических параметров отдельных поверхностей деталей или сборочных единиц. К таким геометрическим параметрам могут относиться: линейно-угловые, характеризующие собственные размеры и расположение в пространстве объектов, отклонение формы и расположения сопрягаемых и рабочих поверхностей объектов. В ходе моделирования могут быть получены параметры, характеризующие уточнённые собственные системы координат деталей и сборочных единиц, использование которых позволит скорректировать массивы координат точек измеренных поверхностей. Для выполнения пятого этапа в работе разработан метод определения действительных размеров ДСЕ и узлов, который будет изложен в последующем подразделе.

Заключительный шестой этап предназначен для проверки достоверности созданной действительной модели посредством выполнения следующих шагов:

- выполнение повторных измерений объекта;
- предварительное базирование;
- сравнение измеренных массивов координат точек поверхностей со сформированными поверхностями, в том числе с использованием метода совмещения поверхностей;
- экспериментальная проверка формирования функциональных связей.

Повторные измерения и сравнение их результатов с созданной действительной моделью объекта позволяют оценить погрешности формирования поверхностей объектов. В ходе анализа результатов измерений необходимо учитывать то, что погрешности измерения присутствуют два раза. Первый раз на этапе измерений для создания

поверхностей действительных моделей объектов. Второй раз на этапе повторных измерений поверхностей объектов. Полученные результаты сравнения могут использоваться для уточнения созданных поверхностей действительных моделей объектов. Для исключения случайной составляющей погрешности измерения можно выполнять многократные измерения одних и тех же координат точек поверхностей объектов, а затем – осреднение полученных результатов. Для проверки достоверности описания параметров функциональных связей действительными моделями необходимо провести экспериментальные исследования. В ходе экспериментальных исследований необходимо создавать условия, в которых будут имитироваться формируемые функциональные и размерные связи. Для подтверждения реализации размерных связей могут имитироваться сопряжения деталей, имеющих известные отклонения формы поверхностей. В ходе выполнения экспериментов по сопряжению деталей могут быть получены или подтверждены гипотезы о форме и параметрах законов распределения погрешностей различных геометрических параметров. Экспериментальный способ оценки является дорогостоящим и трудоёмким.

Приведенные этапы создания действительных моделей объектов характеризуются повышением важности измерений отдельных координат точек поверхностей, а также обработки результатов измерений при создании действительных моделей объектов. Особую роль занимает оценка погрешностей (неопределённостей) и обработка данных измерений, в которой содержится значительный резерв повышения точности рассчитываемых геометрических параметров на основе измеренных координат точек поверхностей. В последующих подразделах будут рассмотрены проблемы оценки погрешностей (неопределённостей) измерений и оптимизации параметров выполнения измерений. Для оценки погрешностей (неопределённостей) измерений геометрических параметров координатно-измерительных машин необходимо использовать:

- модели имитационного моделирования процесса координатных измерений на основе имитирования выборок измеряемых точек поверхностей;
- модели и методики для моделирования процесса измерения геометрических параметров деталей, в том числе со сложными поверхностями;
- программные библиотеки и специализированное программное обеспечение для моделирования процесса координатных измерений.

Затем производится разработка и аттестация методик измерений деталей и сборочных единиц.

Важной составляющей погрешности, связанной с обработкой измеренных данных, является методическая погрешность, которая возникает из-за несоответствия

моделей обработки измеренных данных оцениваемым размерным и функциональным связям. Снижение методических погрешностей может быть достигнуто за счёт разработки новых методов и реализующих их моделей для обработки измеренных данных. Новые методы и модели обработки измеренных данных должны учитывать размерные и функциональные связи, проявляющиеся на рассматриваемых уровнях структурно-функциональной схемы, рассмотренной в разделе 2.1. В следующем разделе будет приведено описание метода получения действительных размеров ДСЕ и их сборочных параметров.

2.3 Разработка метода получения действительных размеров ДСЕ и их сборочных параметров, учитывающего сопряжения деталей с помощью использования виртуальных мер (ВМ) и комплектных виртуальных сборок (КВС)

Особую значимость в создании действительных моделей объектов имеет обработка данных измерений, представленных массивами координат измеренных точек поверхностей. Обработка результатов измерений поверхностей деталей включает расчёт геометрических параметров, которые должны однозначно характеризовать их пространственное расположение, размеры и форму. Предлагаемый метод получения действительных размеров ДСЕ и их сборочных параметров учитывает функциональные и конструкторские особенности измеряемых изделий. Обработка измеренных данных предполагает воспроизведение функциональных и/или размерных связей, возникающих в изделиях при сборке деталей или соединении заготовок и технологических объектов в технологических системах. Воспроизведение размерных связей изделий позволит учитывать влияние действительной геометрии измеряемых поверхностей на формируемые размерные связи, а также избавиться от недостатков, присущих существующим методам обработки.

Известные методы обработки результатов измерений не учитывают особенностей размерных связей в сборочных единицах и технологических системах. Расчёт сборочных параметров выполняется по результатам измерений деталей. Нередко возникают случаи несоответствия фактических и рассчитанных величин сборочных параметров узлов. Например, рассчитанная величина натяга в сопряжении нескольких деталей отличается от фактического значения.

Для реализации метода получения действительных размеров ДСЕ разработана новая технология виртуальных мер (ВМ) и виртуальных комплектных сборок (ВКС). Введены

понятия «Виртуальная мера» и «Виртуальная комплектная сборка», приведём их содержание.

Виртуальная мера – это цифровая модель объекта для определения с необходимой и достаточной точностью действительных размеров ДСЕ и их сборочных параметров, содержащая номинальные поверхности для имитации (моделирования) контактного взаимодействия с измеряемым объектом. Для проведения измерений ВМ имеет возможность перемещения в пространстве и изменения своих размеров.

Виртуальная комплектная сборка – это совокупность виртуальных мер и действительных моделей объектов для определения действительных размеров ДСЕ и их сборочных параметров с помощью моделирования контактного взаимодействия, назначения размерных и функциональных связей и обеспечения возможности перемещения и изменения размеров сопрягаемых объектов.

На рисунке 2.3 приведена блок-схема, поясняющая идею метода.



Рисунок 2.3 – Метод получения действительных размеров ДСЕ и сборочных параметров узлов

Использование технологии виртуальных мер предусматривает моделирование соединений ВМ с измеряемой деталью по нескольким поверхностям. Виртуальные меры играют роль ответных деталей, с которыми соединяется измеряемая деталь. Номинальные поверхности виртуальных мер позволят обеспечить однозначность оценки измеряемых

геометрических параметров при обработке измеренных данных и обеспечить соответствие ГОСТ Р 53442-2015 [31]. В зависимости от конструктивных особенностей и нормируемых технических требований деталей и сборочных единиц предусматривается два варианта оценки измеряемых геометрических параметров. Первый вариант оценки является статическим и предполагает расчёт геометрических параметров исходя из того, что виртуальные меры не изменяют свои размеры и имеют возможность имитирования движения по одной или нескольким степеням свободы. Возможные степени свободы виртуальных мер необходимы для реализации схем базирования измеряемых деталей. Процесс расчёта измеряемых геометрических параметров включает в себя моделирование сопряжений виртуальных мер с измеренными массивами точек поверхностей детали, что позволит воспроизводить размерные связи изделий. Второй вариант оценки является динамическим и предполагает расчёт геометрических параметров исходя из того, что виртуальные меры могут изменять свой размер и имеют возможность имитирования движения по одной или нескольким степеням свободы. В таком варианте виртуальные меры могут устанавливаться, размещаться или охватывать пределы измеряемых поверхностей деталей. Выполнение таких условий позволит использовать измеряемый размер, сформированный между одной или между несколькими поверхностями виртуальных мер. Реализация таких условий позволит обеспечить выполнение принципа подобия (принцип Тейлора), который является основным принципом взаимозаменяемости, именуемым принципом «предельных размеров». В соответствии с принципом Тейлора для контроля отклонений формы и размеров поверхностей необходимо иметь следующий набор калибров: 1) проходной калибр для контроля отклонений размера и формы проверяемой детали; 2) непроходной калибр, с помощью которого контролируется только отклонение размера. Использование инструментальных возможностей существующего программного обеспечения, включающего метод наилучшего совмещения (припасовки) не позволит реализовать предложенный метод виртуальных мер. Использование метода наилучшего совмещения может позволить получить оценки геометрических параметров при условии осреднения отклонений, что не позволит реализовать условия прилегающих поверхностей. Под условием прилегания поверхностей объектов понимается их касание по ряду выступающих точек и непроникновение друг в друга.

Технология определения действительных размеров ДСЕ и сборочных параметров узлов на основе формирования виртуальных комплектных сборок предусматривает моделирование соединений двух или нескольких измеряемых деталей по множеству взаимных поверхностей. Моделирование соединений деталей комплектных сборок с измеренными поверхностями позволит получить достоверную оценку измеряемых геометрических параметров деталей и сборочных единиц, величина которых будет

определяться в ходе сборки. Аналогично технологии виртуальных мер предусматривается два варианта оценки измеряемых геометрических параметров. Первый вариант оценки является статическим и предполагает расчёт геометрических параметров исходя из того, что сопрягаемые детали комплектных сборок не изменяют свой размер и имеют возможность имитирования движения по одной или нескольким степеням свободы. Вторым вариантом оценки является динамическим и предполагает расчёт геометрических параметров исходя из того, что сопрягаемые детали комплектных сборок могут иметь возможность изменения своего размера эквидистантно существующему отклонению формы поверхности и имеют возможность имитирования движения по одной или нескольким степеням свободы.

Реализация предложенных методов позволит учитывать взаимодействие между поверхностями деталей и узлов, проявляющееся во влиянии формы поверхностей на результаты расчётов геометрических параметров. В качестве примеров задач измерений геометрических параметров, в которых возникают значительные погрешности измерений при их решении с использованием традиционных методов, можно привести две задачи.

Первая задача заключается в измерении геометрических параметров маложёстких деталей, имеющих в свободном состоянии отклонение формы, превышающее допуск в несколько раз. К маложёстким деталям относятся: секции, корпусные детали, проставки и маложёсткие кольца газотурбинных двигателей, корпусные детали малых и больших ракет, а также планеров самолётов, кольца трубопроводов. В качестве первого примера маложёсткой детали можно привести тракторное кольцо, устанавливаемое в компрессорах авиационных двигателей, которое приведено на рисунке 2.4.

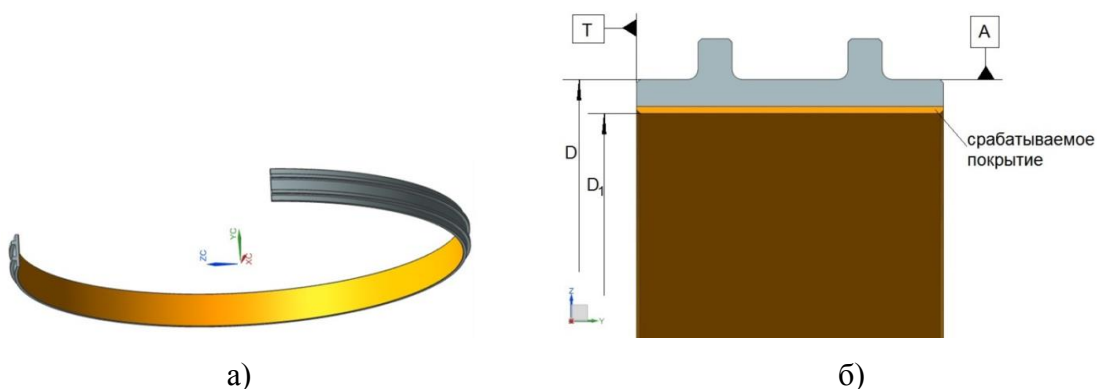


Рисунок 2.4 – Кольцо корпуса компрессора ГТД:

а) общий вид; б) основные требования

Конструкция тракторного кольца предусматривает высокие требования по точности (учитывая значительный размер и малую жёсткость) к диаметральной поверхностям D и

D_1 , конструкторской поверхности торца T . К названным поверхностям предъявляются высокие требования по диаметру (D и D_1) и взаимному расположению к T . Базирование кольца осуществляется по поверхностям D и T . Поверхность D_1 является рабочей и предназначена для формирования необходимого рабочего зазора по торцам лопаток компрессора. На поверхность D_1 наносят срабатываемое покрытие. Контроль геометрических параметров детали осуществляется перед термообработкой и после нанесения покрытий. Наиболее строгие требования по точности предъявляются к:

- диаметру цилиндрических поверхностей, допуск составляет не более 0,05 мм;
- точности формы плоских поверхностей, допустимое отклонение от плоскости составляет 0,02...0,05 мм.

При сборке маложёстких колец происходит их прилегание к более жёстким деталям, например, корпусным деталям. К рассматриваемым соединениям предъявляются требования по величине зазоров, обеспечивающие работоспособность изделий. Такие требования определяют необходимость точного измерения диаметров маложёстких колец в свободном состоянии. Точное измерение диаметров маложёстких колец в свободном состоянии, при использовании стандартного метода для обработки результатов измерений – метода наименьших квадратов, не представляется возможным. Оценки диаметров, полученные по методу наименьших квадратов при значительном отклонении формы от номинальной геометрии, часто не совпадают с диаметрами, которые имеют маложёсткие кольца в собранном состоянии. Несовершенство алгоритмов обработки информации существующего программного обеспечения, основанных на осреднении и минимизации отклонений не позволяет достоверно выполнять измерения маложёстких колец на современных средствах измерений. Погрешности измерения диаметров могут превосходить допуск в несколько раз.

В качестве второго примера маложёсткой детали можно привести проставки, которые устанавливаются в роторе и обеспечивают центрирование соединяемых деталей. В конструкции проставок предусмотрены присоединительные фланцы, в которых предъявляются жёсткие требования к радиально-угловому расположению периферийных центрирующих и крепёжных отверстий. Координаты данных отверстий определяются неверно при их измерениях в свободном состоянии при базировании по внутренней или внешней цилиндрической поверхности из-за существенной деформации в поперечном сечении. В состоянии, когда фланец проставки имеет существенную деформацию, положение измеряемого отверстия O'_1 не соответствует положению в расправленном (собранном) состоянии O_1 . Координаты отверстия x_i , y_i определяются с существенной погрешностью. Для достоверного измерения геометрических параметров названных деталей необходимо учитывать их особенности, проявляющиеся вследствие малой

жёсткости, что учитывается предлагаемыми методами. Рисунок 2.5 содержит внешний вид маложёсткой детали.

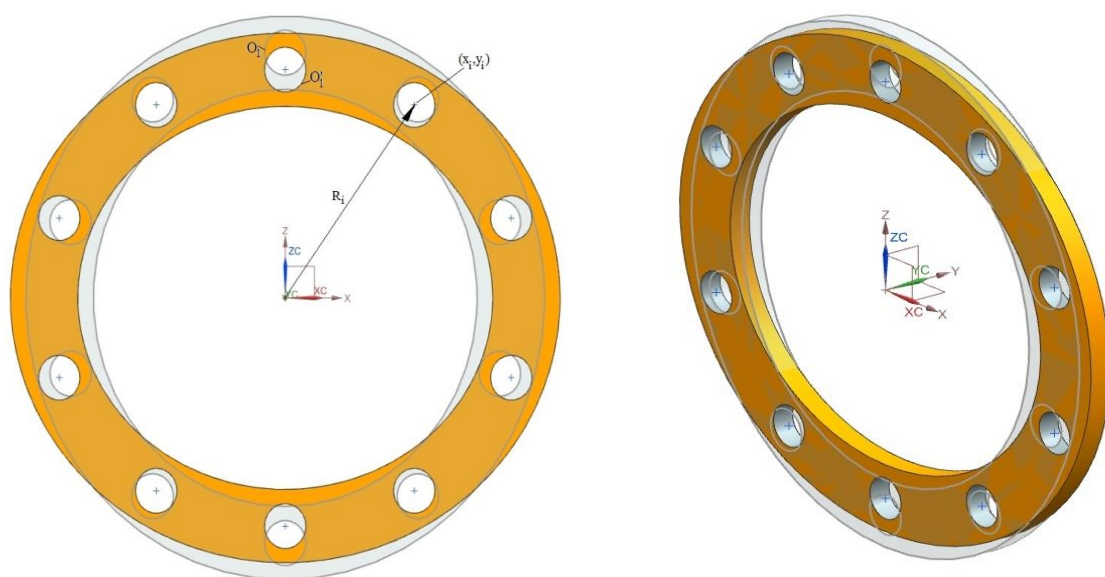


Рисунок 2.5 – Периферийные центрирующие отверстия в деталях типа проставка

Вторая задача состоит в оценке геометрических параметров деталей и узлов, в которых имеются поверхности малой протяжённости по сравнению с габаритами детали. Рассмотрим три примера, поясняющих вторую задачу.

Первый пример состоит в измерении концентричности, торцевых и радиальных биений установочных поверхностей средних и длинных валов турбомашин. Рассматриваемые валы турбомашин характеризуется тем, что их длина больше протяжённости базовых поверхностей под подшипники в 10 и более раз. Относительно малая протяжённость базовых поверхностей валов турбомашин может приводить к значительным погрешностям определения расположения осей базовых поверхностей. Расположение осей базовых поверхностей используется для оценки геометрических параметров концентричности, торцевых и радиальных биений установочных поверхностей валов турбомашин. Значительные погрешности определения расположения осей базовых поверхностей (5...30 мкм) приводят к большим, превышающим допуск, погрешностям определения геометрических параметров концентричности, торцевых и радиальных биений установочных поверхностей валов турбомашин. На рисунке 2.6 (на следующей странице) приведен пример определения радиального биения поверхности цапфы вала *Б* относительно базы *А*.

соединениях деталей машиностроения, формообразующей и штамповой оснастке. Величина погрешности измерения радиуса может составлять не менее 50 мкм при контроле по угловому сектору 9 градусов и погрешности координатно-измерительного устройства не более 2 мкм. Малая величина углового сектора приводит к погрешности измерения координат центра окружности. На рисунке 2.7 приведен пример сопряжения базовой детали, имеющей малый угловой сектор цилиндрической поверхности, по которой сопрягается цилиндрическая деталь.

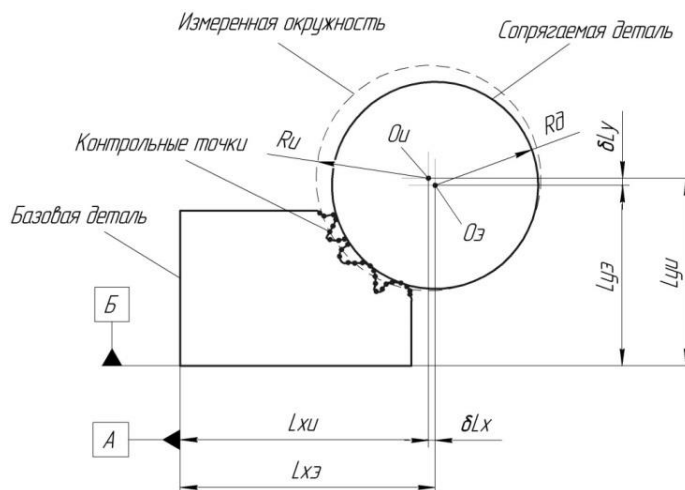


Рисунок 2.7 – Сопряжение деталей по цилиндрическим поверхностям с малым угловым сектором

Рассмотрим влияние погрешностей измерения цилиндрической поверхности по малому угловому сектору на прогнозируемое положение координат центра сопрягаемой детали. Цилиндрическая поверхность базовой детали с двумя базовыми поверхностями *A* и *B* измеряется конечным числом контрольных точек. В результате аппроксимации контрольных точек заменяющим элементом «окружность» с использованием метода МНК формируется измеренная окружность с центром *Oи*. На неопределённость положения координат центра измеренной окружности *Oи* оказывает влияние отклонение формы цилиндрической поверхности, а также инструментальные погрешности средства измерения. Сложный характер отклонения формы цилиндрической поверхности приводит к тому, что сопрягаемая деталь устанавливается с центром *Oэ*. Руководствуясь данными измерений можно отметить, что прогнозируемое положение центра сопрягаемой детали находится в координатах *Lхи* и *Lуи* с учётом радиуса сопрягаемой детали. В ходе сопряжений проявится положение центра сопрягаемой детали в координатах *Lхэ* и *Lуэ*. Погрешности прогнозирования положения координат центра сопрягаемой детали составляют

δLx и δLy . Для достоверной оценки параметров $Lxэ$ и $Lyэ$ возможно использование имитационной модели, в которой имитируется сопряжение поверхностей действительных моделей базовой и сопрягаемой детали. Имитационная модель позволит достоверно оценить ось $Oэ$, которая проявляется в процессе эксплуатации, учитывая влияние отклонения формы поверхностей на процесс сопряжения. Оценка положения оси $Oэ$ будет производиться, исходя из условий сборки и функционального назначения сопрягаемых поверхностей деталей.

Третий пример измерительной задачи заключается в измерении геометрических параметров расположения оси лопаток авиадвигателей, имеющих хвостовик трапецевидной формы. Геометрическая ось лопатки задаётся относительно её хвостовика и имеет особую значимость. По отношению к геометрической оси лопатки задаются координаты точек аэродинамических профилей, а также множество различных линейно угловых параметров. Одним из важных линейно-угловых параметров, задаваемых по отношению к оси лопатки, является расположение торцевых поверхностей антивибрационных полок, которое определяет посадку с натягом в соединении между соседними лопатками. В случае, если заданная посадка с натягом по антивибрационным полкам не обеспечивается в производстве и сборке, то это может привести к появлению значительных вибраций в процессе работы авиадвигателя. На рисунке 2.8 приведен фрагмент рабочего колеса, включающего в себя две лопатки компрессора с хвостовиком трапецевидной формы, установленных в диск.

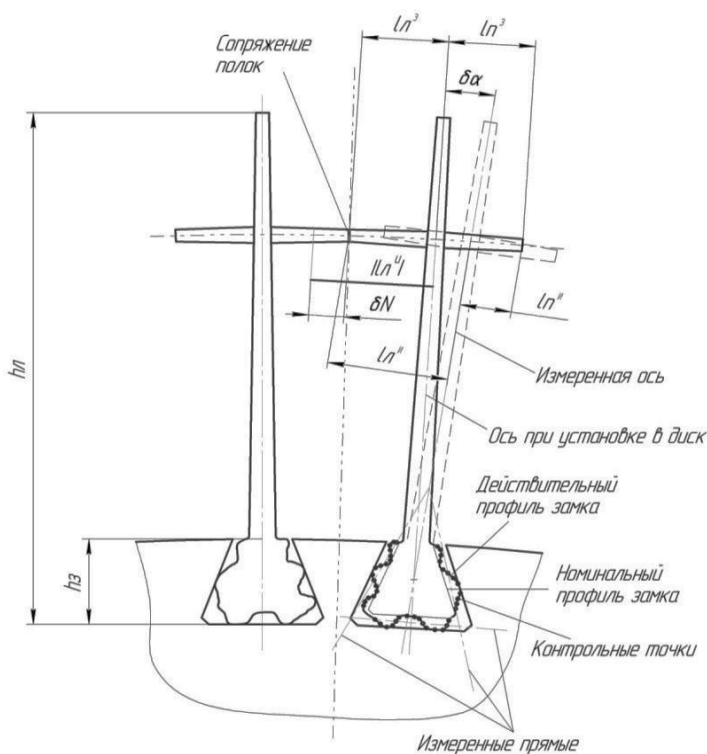


Рисунок 2.8 – Сопряжение лопаток с хвостовиком трапецевидной формы в диске

Значительное количество лопаток авиадвигателей характеризуются тем, что отношение их общей высоты $h_{л}$ к высоте замка $h_{з}$ находится в диапазоне 7...30 и более раз. В приведенных на рисунке 2.8 лопатках условно показан номинальный и действительный профиль хвостовика трапециевидной формы. Действительный профиль хвостовика лопатки характеризуется отклонением формы относительно номинального профиля, которое возникает при обработке хвостовика различными методами, в том числе протягиванием, фрезерованием или шлифованием. Контактное взаимодействие действительного профиля замка лопатки с профилем хвостовика, который для упрощения показан прямыми линиями, приводит к формированию оси лопатки, фиксируемой в диске. После установки лопаток в диск происходит формирование посадки по торцевым поверхностям антивибрационных полок, точка сопряжения которых показана на рисунке 2.8. Расстояния $l_{л}^э$ и $l_{п}^э$ подлежат производственному контролю, поскольку показывают положение торцевых поверхностей антивибрационных полок и используются в размерных расчётах с целью прогнозирования величины натяга в рабочем колесе. Измерение лопатки компрессора на координатно-измерительной машине включает определение геометрической оси посредством базирования по хвостовику. После выполнения измерения номинально плоских поверхностей хвостовика множеством контрольных точек выполняется их аппроксимация заменяющими элементами «прямая» или «плоскость». Для упрощения изложения на рисунке 2.8 вместо плоскостей показаны прямые. Измеренные прямые или плоскости используются для определения по ним геометрической оси лопатки, которая формируется в ходе измерений. Отклонение формы плоских поверхностей хвостовика и инструментальные погрешности средства измерения приводят к неопределённости оценки положения измеренных прямых и, соответственно, геометрической оси лопатки. Малая протяжённость поверхностей хвостовика относительно высоты лопатки приводит к возникновению погрешности углового $\delta\alpha$ расположения между двумя осями. Первая ось выявляется в ходе измерений. Второй осью является ось замка рабочего колеса. Относительно измеренной оси лопатки выполняется измерение торцевых поверхностей антивибрационных полок, в результате формируются расстояния $l_{л}^н$ и $l_{п}^н$. Из рисунка 2.8 видно, что измеренное расстояние левой антивибрационной полки $l_{л}^н$ больше расстояния $l_{л}^э$ относительно оси замка рабочего колеса. Использование расстояния $l_{л}^н$ в размерных расчётах приводит к возникновению погрешности δN , величина которой представлена на рисунке 2.8 посредством переноса абсолютного значения расстояния $|l_{л}^н|$ от оси, проявляющейся в ходе сборки на направление сопряжения поверхностей антивибрационных полок лопаток. Расстояние $|l_{л}^н|$ показано на рисунке 2.8 жирной линией.

Для достоверной оценки расстояний $l_n^э$ и $l_n^э$ возможно использование имитационной модели, в которой имитируется сопряжение поверхностей действительной модели лопатки с пазом диска. Использование имитационной модели позволит достоверно оценить ось лопатки, которая формируется в процессе сборки при учёте влияния отклонения формы поверхностей на процесс сопряжения. Оценка положения оси лопатки будет производиться, исходя из условий сборки и функционального назначения сопрягаемых поверхностей.

Предлагаемые в работе методы определения действительных размеров ДСЕ и сборочных параметров узлов на основе использования технологий виртуальных измерительных мер и виртуальных комплектных сборок позволят обеспечить заданный уровень точности измерений геометрических параметров рассмотренных измерительных задач. Для реализации предложенного метода необходимо разработать модели и методики, позволяющие моделировать размерные и функциональные связи в технологических процессах, сборочных единицах и изделиях. Для моделирования размерных связей необходимо выполнить разработку моделей и алгоритмов сопряжений поверхностей объектов, представленных действительными геометрическими моделями. Использование разработанных моделей и алгоритмов позволит создать новые методы и модели обработки измеренных данных. Разработанные модели и алгоритмы сопряжения объектов, представленные действительными моделями, позволят создать промышленно применимые программные модули для дополнения существующего метрологического программного обеспечения или самостоятельного программного обеспечения для оснащения координатно-измерительных устройств. В программных модулях или программном обеспечении будут предусмотрены уникальные функции, позволяющие выполнять не только измерения, но и размерный анализ точности изделий, ориентированные на достижение показателей качества изделий.

В следующих разделах рассмотрены вопросы, касающиеся создания действительных моделей. Приведены математическое представление и анализ действительных поверхностей объектов. Предложена методика оценки погрешностей (неопределённостей) измерений геометрических параметров координатно-измерительных машин. Указанная методика может быть использована при выполнении первого, второго, третьего и четвёртого этапов методики создания действительных моделей объектов и ориентирована на использование в серийном производстве в центральных измерительных лабораториях, контрольных бюро и службах предприятий. Решены вопросы, связанные с определением необходимого и достаточного объёма координат измеряемых точек для построения поверхностей действительных моделей объектов.

2.4 Математическое представление и анализ действительных поверхностей объектов

Действительные поверхности деталей, узлов авиадвигателей и технологических объектов имеют геометрические отклонения сложного генезиса, которые образуются процессе изготовления, сборки, а также эксплуатации. Измерение координат точек поверхностей деталей сопровождается возникновением измерительных погрешностей. Сложный характер геометрических отклонений поверхностей диктует необходимость их представления как поверхностей двойной кривизны. Координаты поверхностей объектов в параметрической форме можно представить следующим образом [123]:

$$p(u, v) = p_0(u, v) + \Delta p_L(u, v) + \Delta p_F(u, v) + \Delta p_M, \quad (2.1)$$

где $p(u, v)$ – координаты действительной поверхности;

u, v – локальные параметрические координаты поверхности;

$p_0(u, v)$ – координаты номинальной геометрии поверхности, задаваемой конструктором;

$\Delta p_L(u, v)$ – погрешность расположения действительной поверхности относительно номинально заданной геометрии;

$\Delta p_F(u, v)$ – погрешность формы действительной поверхности;

Δp_M – погрешность измерения средства координатных измерений.

Величины $\Delta p_F(u, v)$ и $\Delta p_L(u, v)$ формируются на различных уровнях функциональных связей структурно-функциональной диаграммы взаимосвязи конструкторских и технологических уровней подготовки производства, представленной на рисунке 2.1. Величина Δp_M определяется используемым средством измерения. Оценка составляющих отклонений формы и расположения поверхностей выполняется с использованием разработанной методики, блок-схема которой приведена на рисунке 2.9.

Рассмотрим содержание этапов предложенной методики на примере анализа данных измерений плоских поверхностей.

На первом этапе осуществляется экспорт координат измеренного массива точек поверхности полученным программным обеспечением средства измерения.

В ходе второго этапа выполняется совмещение массива измеренных точек с соответствующей номинальной поверхностью для определения отклонения расположения поверхности, компонента Δp_L в формуле (2.1). В результате выполнения операции

совмещения определяются параметры, характеризующие расположение измеренной поверхности, которая в нашем случае представлена множеством точек.



Рисунок 2.9 – Блок-схема методики анализа геометрических отклонений поверхностей деталей

Погрешность расположения точек поверхности Δp_L включает три компоненты перемещения вдоль координатных осей ΔX , ΔY , ΔZ и три компоненты вращения вокруг координатных осей $\Delta \Phi$, $\Delta \Theta$, $\Delta \Psi$. Стандартным алгоритмом, решающим проблему наилучшего совмещения, является итеративный алгоритм ближайших точек (ICP), в котором на каждой итерации методами нелинейного оптимизационного поиска рассчитываются углы поворота и перемещения вдоль координатных осей. Целевая функция алгоритма выглядит следующим образом:

$$f(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta \Phi, \Delta \Theta, \Delta \Psi) = \frac{1}{N} \sum_1^N d_i^2 \rightarrow \min, \quad (2.2)$$

где d_i – расстояние между измеренной точкой i -й и номинальной точками поверхности;
 N – количество пар точек совмещения.

Наиболее применяемым методом решения задачи, представленной функцией (2.2) является метод наименьших квадратов (МНК). С помощью метода МНК массив координат

измеренных точек аппроксимируется заменяющим элементом типа «плоскость».

Номинальная плоская поверхность задается уравнением вида:

$$Ax + By + Cz + D = 0, \quad (2.3)$$

где A, B, C, D – коэффициенты;

x, y, z – координаты точек на плоскости.

На рисунке 2.10 изображены измеренный массив точек – 2 и заменяющий элемент типа «плоскость» – 1, вписанный по методу МНК.

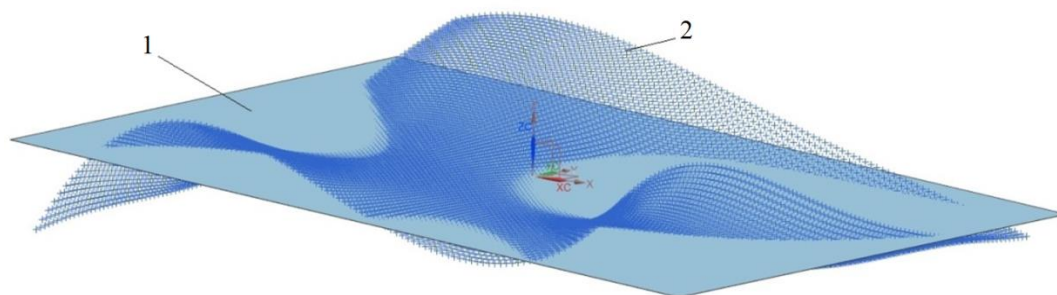


Рисунок 2.10 – Аппроксимированное по методу МНК множество измеренных точек поверхности с использованием элемента «плоскость»

Третий этап предназначен для статистической оценки и обобщения параметров, составляющих отклонения формы поверхностей. Оцененные в ходе аппроксимации параметры расположения поверхности используются для расчёта параметров отклонения её формы в два шага. На первом шаге исключаются отклонения расположения массива точек путём его последовательного разворота и смещения с использованием параметров, определённых в ходе второго этапа методики. На втором шаге определяются отклонения от номинальной поверхности точек действительной поверхности по нормали с исключением отклонения расположения. Отклонение формы поверхности вычисляется как разность между наименьшим и наибольшим отклонениями между номинальными и измеренными координатами точек. В зависимости от возможности прогнозирования отклонение формы поверхностей условно можно разделить на систематическую и случайную составляющие. Систематические отклонения можно представить в виде гармонической составляющей отклонения и макроотклонения формы [173]. Таким образом, величину отклонения формы поверхности в рассматриваемой точке можно представить в виде суммы составляющих:

$$dF = \delta_s + \delta_m + \delta_r, \quad (2.4)$$

где δ_s – гармоническая составляющая отклонения формы поверхности;

δ_m – макроотклонение формы поверхности;

δ_r – случайная составляющая.

Рассмотрим последовательность вычисления каждой из этих составляющих. Рассматриваемое гармоническое отклонение можно представить сочетанием базовых гармонических функций. Составляющие гармонические функции можно оценить, применяя аппарат Фурье-анализа. Поверхность $f(u, v)$, заданную параметрическим способом и включающую $U \times V$ точек можно аппроксимировать с использованием двумерного дискретного преобразования Фурье посредством выражения [165]:

$$zf(\omega_1, \omega_2) = \sum_{u=0}^{U-1} \sum_{v=0}^{V-1} f(u, v) e^{-2\pi i(\omega_1 u/U + \omega_2 v/V)}, \quad (2.5)$$

где $i = \sqrt{-1}$;

ω_1 и ω_2 – параметры, характеризующие угловые частоты гармонических составляющих поверхности по осям u и v .

Функция $zf(\omega_1, \omega_2)$ позволяет аппроксимировать функцию $f(u, v)$ в пространстве угловых частот, соответствующих гармоническим составляющим посредством ряда Фурье. Полученный ряд Фурье позволяет определить амплитуды и длины составляющих волн, соответствующих различным видам погрешностей, имеющих периодический характер. С целью уменьшения размерности в частотной области полученного ряда Фурье необходимо определить значимые гармоники. Для выделения значимых составляющих ряда Фурье традиционно можно использовать поверхностную спектральную плотность мощности (ПСПМ), называемую в англоязычной литературе Area power spectral density (APSD):

$$APSD(\omega_1, \omega_2) = \frac{\Delta u \cdot \Delta v}{U \cdot V} \cdot |zf|^2, \quad (2.6)$$

где $\Delta u \cdot \Delta v$ – соответственно расстояние между точками по параметрическим осям U и V .

Полученные значимые гармоники могут использоваться для воспроизведения гармонического отклонения формы посредством использования обратного двумерного преобразования Фурье, формула которого имеет следующий вид:

$$f(u, v) = \sum_{\omega_1=0}^{U-1} \sum_{\omega_2=0}^{V-1} zf(\omega_1, \omega_2) e^{2\pi j(\omega_1 u/U + \omega_2 v/V)}. \quad (2.7)$$

Проведенные исследования показывают, что для восстановления отклонения формы поверхности с достаточной точностью необходимо использовать не менее четырёх значимых гармоник, имеющих наибольшие значения ПСПМ.

Рассмотрим последовательность и особенности определения случайной составляющей отклонения формы в измеренных поверхностях объектов. Случайные погрешности формируются на всех уровнях функциональных связей и вызываются

многочисленными факторами, которые имеют малое влияние на результат. Выявление и анализ случайной составляющей отклонения формы поверхности объекта позволит уменьшить влияние погрешностей, вносимых средством измерения. Сопоставление выявленной величины случайной составляющей погрешностей формы с паспортными погрешностями средства измерения позволит выдвинуть предположения о необходимости выполнения фильтрации погрешностей измерения. В случае, если выявленная величина случайной составляющей погрешности формы превосходит величину паспортных погрешностей средства измерения, то это может быть объяснено наличием других влияющих факторов на рассматриваемых уровнях функциональных связей.

Для выявления и фильтрации случайной составляющей отклонения возможным способом является использование вейвлет-разложения. Особенно эффективно использование вейвлет-разложение для анализа и обработки данных, полученных в ходе измерения с использованием бесконтактных средств измерений и контактным сканированием, поскольку они характеризуются значительным объёмом получаемых данных. Аппарат вейвлетов нашёл широкое применение в таких областях, как обработка сигналов, распознавание образов, а также при восстановлении содержания изображений [193]. Вейвлет-разложение сигнала, представленного в нашем случае профилем поверхности, формирует взаимосвязанное множество аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов (величин). Аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты могут быть вычислены с использованием масштабирующей функции и вейвлет-функции в следующем виде:

$$\varphi(x) = 2 \sum_{n \in Z} h_n \varphi(2x - n), \quad (2.8)$$

$$\psi(x) = 2 \sum_{n \in Z} g_n \varphi(2x - n), \quad (2.9)$$

где h_n – массив вейвлет-коэффициентов;

Z – множество целых чисел;

g_n – величина, равная значению $(-1)^n h_{1-n}$.

Рассматриваемый сигнал, представленный измеренным профилем поверхности, можно описать в следующем виде:

$$f_m(x) = \sum_{n \in Z} C_{m-1,n} \varphi_{k,n} + \sum_{n \in Z} D_{m-1,n} \psi_{k,n}, \quad (2.10)$$

где $\varphi_{k,n} = 2^{k/2} \varphi(2^k x - n)$;

$\psi_{k,n} = 2^{k/2} \psi(2^k x - n)$;

$C_{m-1,n}$ и $D_{m-1,n}$ – аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты на $m-1$ уровне разложения и смещения центра вдоль координатной оси на величину n .

При использовании приведенных формул (2.8), (2.9) и (2.10) вместо направлений x и y декартового пространства используются направления u и v параметрического пространства. Для работы с пространственными 3D сигналами, в качестве которых выступают отклонения формы рассматриваемых поверхностей, можно использовать двумерное вейвлет-преобразование. Посредством вейвлет разложения информация о координатах точек поверхности разбивается на четыре составляющие: аппроксимирующая часть и три детализирующие части, называемые горизонтальным, вертикальным и диагональными разложениями. Математически, масштабирующая функция для поверхности может быть получена в виде тензорного произведения [167] из соответствующих масштабирующих функций (2.8):

$$\varphi_{k,n_x,l,n_y} = \varphi_{k,n_x} \otimes \varphi_{l,n_y}, \quad (2.11)$$

где φ_{k,n_x} – масштабирующая функция при смещении n_x в направлении x ;

φ_{l,n_y} – масштабирующая функция при смещении n_y в направлении y .

Диагональное вейвлет-разложение позволяет производить фильтрацию случайной составляющей для отклонения формы поверхности. Проводились исследования с целью определения подходящих типов вейвлетов и требуемой глубины разложения сигналов. Результаты исследований показывают, что в качестве фильтра случайных отклонений формы можно использовать вейвлет-разложение 1, 2 и 3-го уровней с материнскими вейвлетами Хаара [125] и вейвлетами Добеши 3-го порядка (db3) [138].

Особую значимость при создании действительных моделей поверхностей имеет выявление и анализ макроотклонения формы поверхности. Под макроотклонением формы поверхности понимается систематическая часть отклонения формы, проявляющаяся для различных реализаций измеряемых поверхностей, амплитуда которой превышает амплитуду выявляемой случайной составляющей. Необходимость описания пространственных поверхностей требует выявления эффективного способа их математического представления. В ходе анализа выявлено, что макроотклонение формы с достаточной точностью может быть представлено посредством полинома n -й степени (степени полинома λ_x, λ_y соответствуют координатным осям), который наилучшим образом аппроксимирует массив точек, характеризующий макроотклонение. Описание большинства характерных отклонений деталей авиадвигателей с требуемой точностью

может выполняться с использованием полинома четвертой степени по каждой из осей X – Y в следующем виде:

$$\begin{aligned} \delta_m = & P_{00} + P_{10} \cdot x_n + P_{01} \cdot y_n + P_{20} \cdot x_n^2 + P_{11} \cdot x_n y_n + P_{02} \cdot y_n^2 + P_{30} \cdot x_n^3 + P_{21} \cdot x_n^2 y_n \\ & + P_{12} \cdot x_n y_n^2 + P_{03} \cdot y_n^3 + P_{40} \cdot x_n^4 + P_{31} \cdot x_n^3 y_n + P_{22} \cdot x_n^2 y_n^2 + P_{13} \cdot x_n y_n^3 + P_{04} \cdot y_n^4, \end{aligned} \quad (2.12)$$

где $P_{0...4}, P_{0...4}$ – коэффициенты полинома;

x_n, y_n – нормированные в диапазон $[-1; 1]$ координаты точек по осям x и y .

Нормирование координат точек необходимо выполнять с целью подбора характера и амплитуды изменения отклонения формы на любую рассматриваемую опорную длину профиля. Пересчет координат применительно к оси x производится по следующей формуле:

$$x_{ni} = 2 \cdot (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) - 1, \quad (2.13)$$

где x_{\max}, x_{\min} – максимальное и минимальное значения координат x точек.

Для других координатных осей перерасчет выполняется аналогично.

Рассмотрим особенности моделирования и обработки данных измерений геометрии торцевых плоских поверхностей деталей. Торцевые поверхности имеют особую значимость и присутствуют в большинстве деталей авиадвигателей, в том числе валов, дисков, проставок, корпусов и др. Номинальная геометрия торцевых поверхностей фланцев валов, трактовых и корпусных колец, присоединительных поверхностей дисков представляет собой плоскость, ограниченную двумя окружностями. Действительная поверхность торца имеет все характерные отклонения для плоскостей, перечисленные ранее. На рисунке 2.11 представлена плоскость 1, аппроксимированная по методу МНК в множество измеренных координат точек 2 торцевой поверхности трактового кольца.

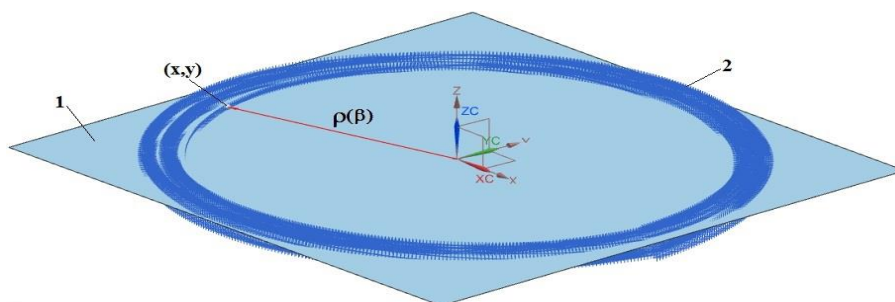


Рисунок 2.11 – Множество измеренных точек торцевой поверхности трактового кольца аппроксимированное по методу МНК заменяющим элементом «плоскость»

Для многих деталей роторов ГТД характерно наличие большого радиуса (более 300 мм) и малой толщины торца (4 мм и более). Координаты точек (x, y) трактовых колец удобно представить в полярных координатах (ρ, β) . Полярный радиус ρ ограничен

радиусом отверстия ρ_{\min} и радиусом наружного кольца ρ_{\max} , а полярный угол β находится в промежутке $[0; 2\pi]$:

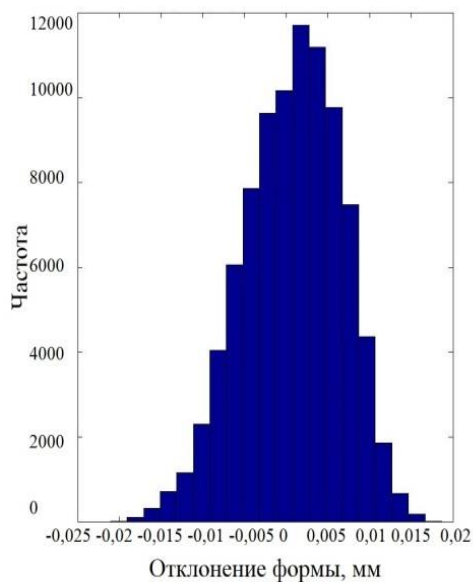
$$\begin{cases} x = \rho \cos(\beta), \\ y = \rho \sin(\beta), \\ \rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max}; 0 \leq \beta \leq 2\pi \end{cases} \quad (2.14)$$

Для моделирования производственных погрешностей и вычисления их величин в точках используется сетка координат (ρ, β) . После вычисления погрешностей dF производится преобразование из полярной в декартову (x, y) систему координат с помощью системы уравнений (2.14).

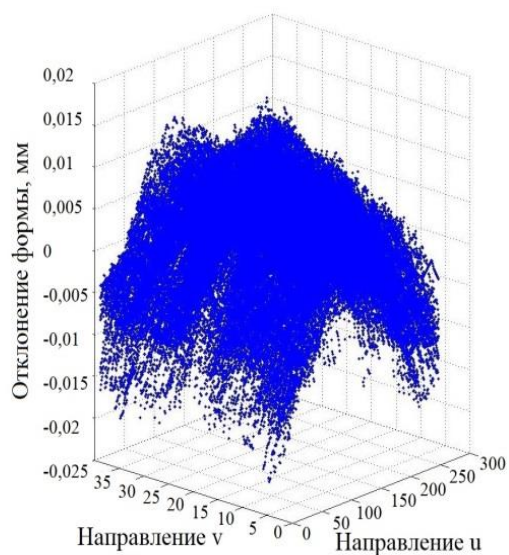
Заключительным этапом методики анализа отклонений геометрии поверхностей является выполнение статистического анализа геометрических параметров отклонений формы и расположения, вычисленных при выполнении предшествующих этапов. Параметры законов распределения и их формы позволяют произвести статистическое обобщение и выдвинуть гипотезы их зависимости от влияющих факторов. Статистическая обработка последовательно выполняется в три шага. На первом шаге вычисляются моментные характеристики отклонений (математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение). На втором шаге строятся гистограммы распределения отклонений и выдвигаются гипотезы о законе их распределения. На третьем шаге на основе выдвинутых гипотез, определяется закон распределения оцененных составляющих отклонений формы поверхностей с использованием критериев согласия.

Апробация методики анализа отклонений формы производилась на девяти плоских поверхностях образцов, измеренных с помощью КИМ DEA Global Performance 07.10.07. На рисунке 2.12 (на следующей странице) представлены результаты обработки измерений поверхностей образцов.

По изложенным теоретическим положениям для декомпозиции отклонения формы с помощью вейвлет-фильтра и двумерного дискретного преобразования Фурье были получены составляющие параметры отклонения формы поверхности. Макроотклонение формы для девяти поверхностей имеют схожий характер, разновидности этих отклонений представлены на рисунках 2.13 и 2.14.



а)



б)

Рисунок 2.12 – Гистограмма распределения отклонений формы на опорных поверхностях (а) и внешний вид отклонений формы поверхности (б)

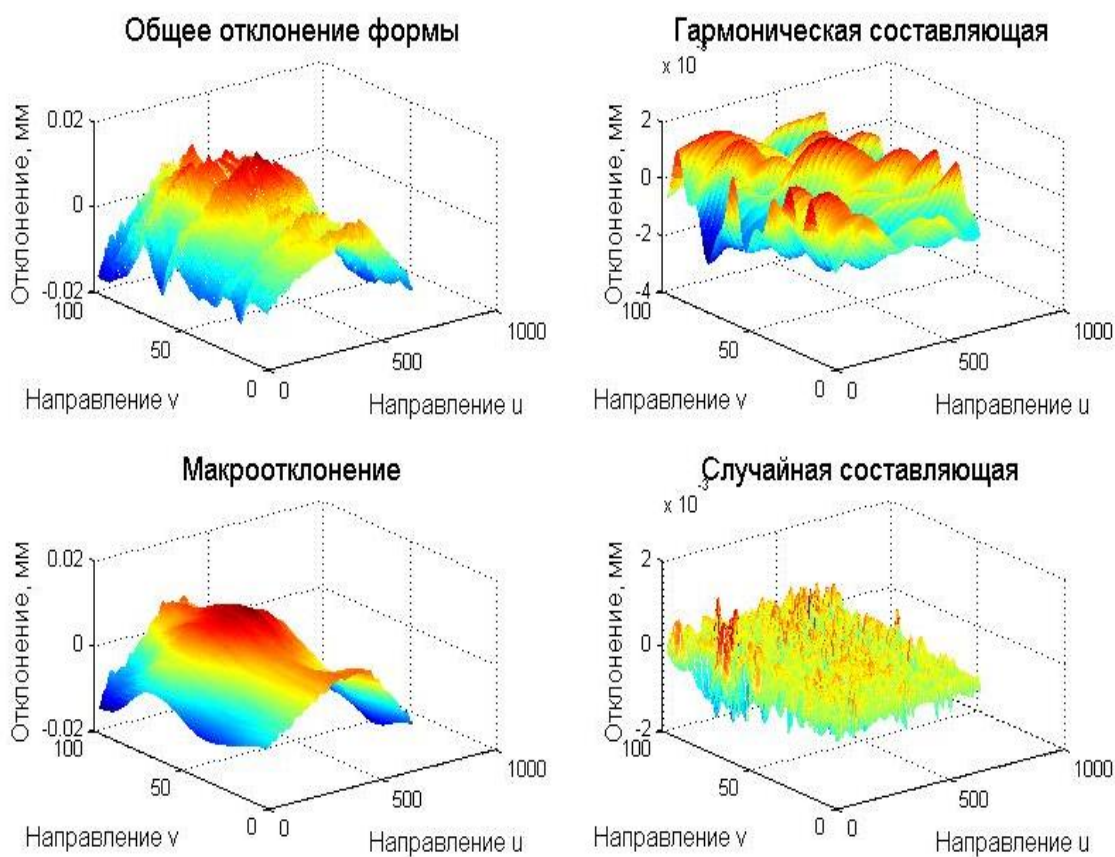


Рисунок 2.13 – Общий вид и компоненты отклонения формы для первой опорной поверхности, полученные с помощью вейвлет-фильтра Добеши и 2D DFT

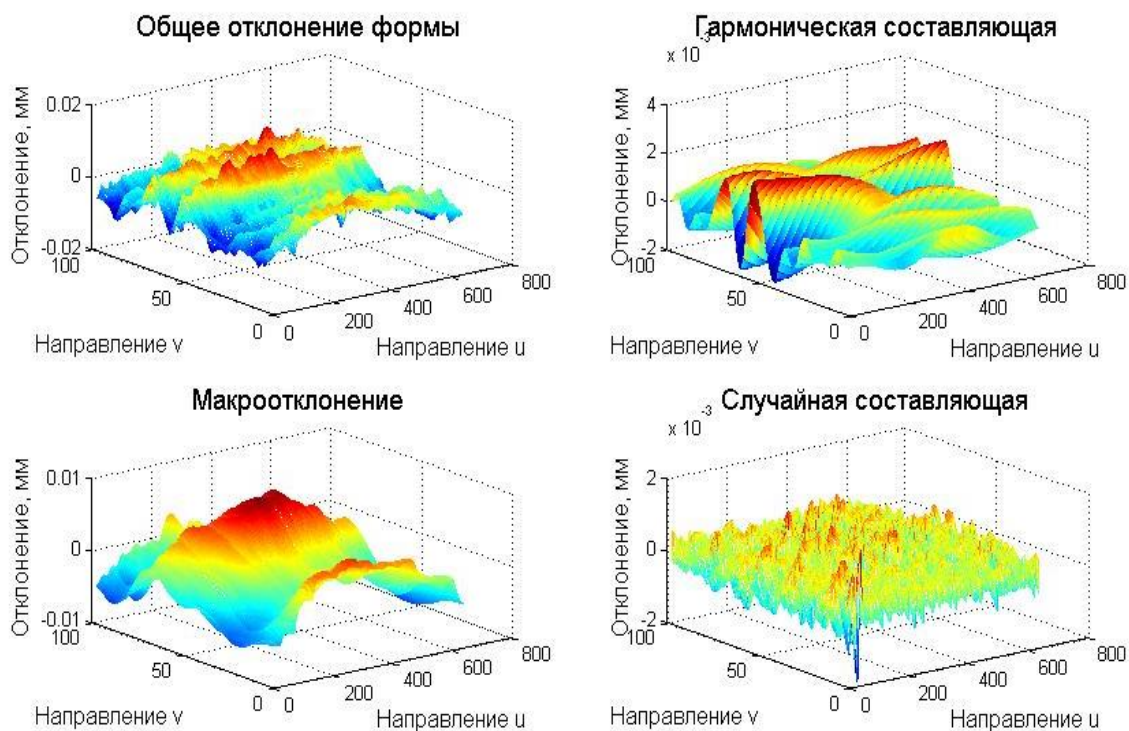


Рисунок 2.14 – Общий вид и компоненты отклонения формы для шестой опорной поверхности, полученные с помощью вейвлет-фильтра Добеши и 2D DFT

Величина случайной составляющей изменяется по нормальному закону распределения и с вероятностью 99,97% не превышает 1 мкм (гистограмма представлена на рисунке 2.15).

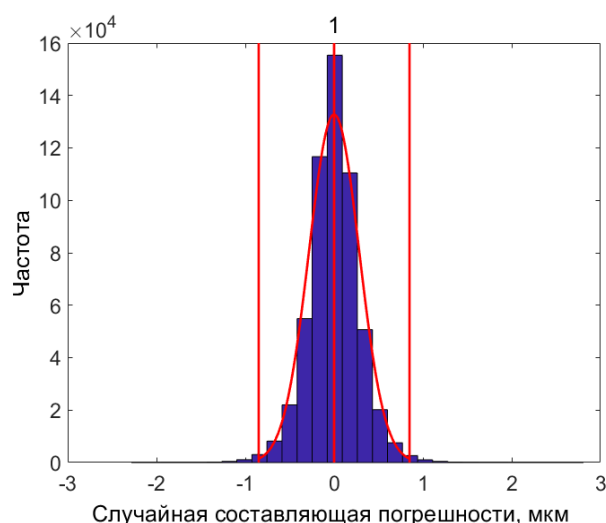


Рисунок 2.15 – Гистограмма распределения случайной составляющей погрешности измерения

На рисунке 2.16 представлен набор макроотклонений формы для 9 поверхностей.

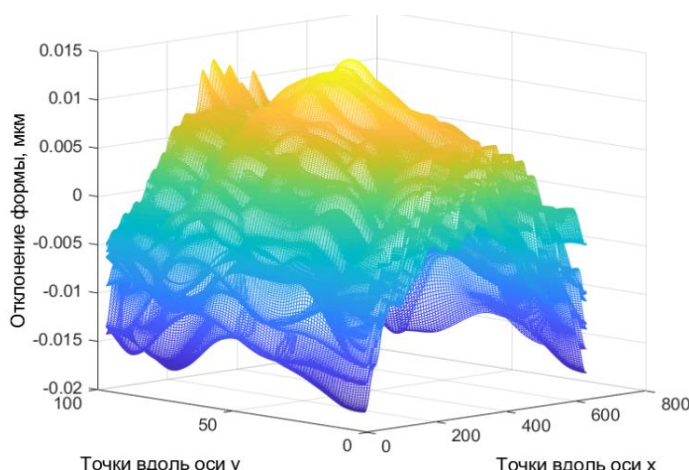


Рисунок 2.16 – Совокупность макроотклонений формы измеренных плоскостей

С целью обобщения были выдвинуты гипотезы о соответствии распределения погрешностей в измеряемых точках поверхностей предварительно определённым законам распределения: нормальному и бетта-распределению. Проверка соответствия законам распределения выполнялось с использованием критерия Лиллиефорса [133, 157]. Определялись числовые значения средних, нижних и верхних границ отклонений в точках. Для каждого отклонения в точках рассматриваемых поверхностей рассчитывалось математическое ожидание, характеризующее среднюю границу, а также верхняя и нижняя оценка отклонений в точках с учетом доверительной вероятности 99,73%. По полученным значениям средних, нижних и верхних границ отклонений в задающих точках полиномиальных уравнений (2.12) определялись поверхности параметрических порционных NURBS сплайнов [170], задаваемых уравнением вида:

$$P(u, v) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m h_{ij} \cdot P_{ij} \cdot N_{ik}(u) \cdot N_{jl}(v)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m h_{ij} \cdot N_{ik}(u) \cdot N_{jl}(v)}, \quad (2.15)$$

где P_{ij} – координаты (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) задающей точки в трехмерном пространстве;

u, v – параметры для вычисления координат точек сплайновой поверхности, изменяющиеся в диапазонах $[t_{k-1}, t_{n+1}]$ и $[s_{l-1}; s_{m+1}]$ соответственно;

$h_{i,j}$ – однородные координаты задающих точек;

$N_{ik}(u), N_{jl}(v)$ – базисные функции (или сопряжения) сплайна в параметрических направлениях u и v соответственно;

t, s – узловые значения параметра, у которых функции $N_{ik}(u)$ и $N_{jl}(v)$ не равны нулю;

k, l – степень кусочного сплайна в направлении параметров u и v соответственно;

n, m – количество точек вдоль направлений u и v .

Однородные координаты $h_{i,j}$ были равны 1. Количество узлов сетки определялось количеством измеренных точек. Порционная поверхность NURBS определена в параметрическом пространстве параметрами u и v . Макроотклонение формы таких поверхностей со степенью четыре сплайна по направлению u и второй степенью сплайна по направлению v представлено на рисунке 2.17.

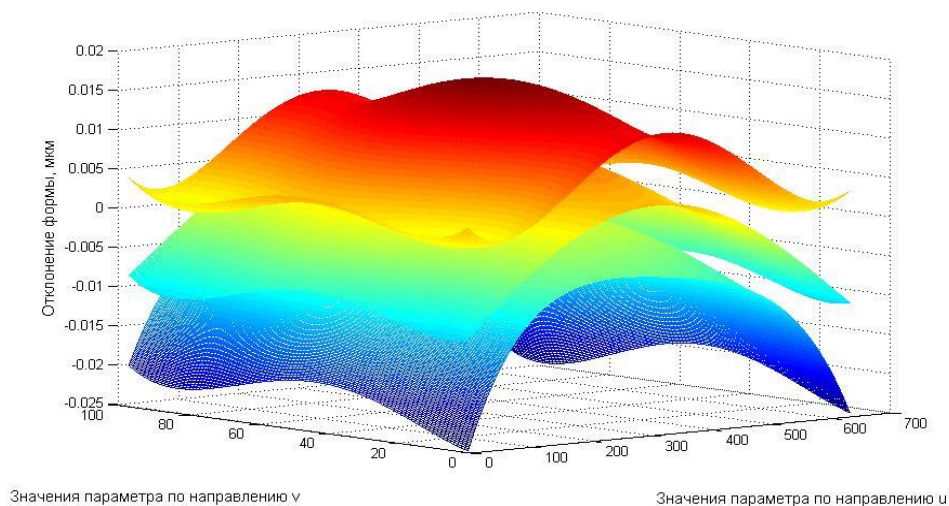


Рисунок 2.17 – Макроотклонение формы серии плоских поверхностей

Таким образом, в ходе моделирования были получены зависимости, позволяющие определить средние, нижние и верхние границы распространения отклонения формы для любой измеряемой точки поверхности. В таблице 2.1 представлены обобщающие данные по компонентам отклонения формы измеренных поверхностей (среднеквадратическое отклонение СКО, математическое ожидание E , предельные значения min и max).

Таблица 2.1 – Статистические значения параметров отклонения формы

Параметр		min	E	max	СКО
δ_m , мкм		-24,79–0,25	-10,98–8,65	0,05–17,19	4,80–5,45
λ_x, λ_y		2	–	4	–
δ_s , мкм	1 гармоника	0,36	0,59	0,82	0,08
	2 гармоника	0,23	0,49	0,75	0,09
	3 гармоника	0,17	0,43	0,70	0,09
	4 гармоника	0,20	0,41	0,62	0,07
ω_1, ω_2	1 гармоника	1	3	6	–
	2 гармоника	1	5	9	–
	3 гармоника	1	4	9	–
	4 гармоника	2	4	9	–
δ_r , мкм		-0,85	0,00	0,85	0,28

Составляющие макроотклонения формы поверхности представлены посредством минимальной, средней и максимальной поверхностей на рисунке 2.17.

2.5 Формирование действительных поверхностей объектов на основе заданных параметров

Выполнение различных исследовательских задач, включая отработку технологии создания и использования действительных моделей объектов, анализ и синтез технологических и сборочных размерных связей требует формирования действительных поверхностей объектов на основе задаваемых параметров. Последовательность формирования действительных поверхностей объектов представлена в виде блок-схемы, приведенной на рисунке 2.18.

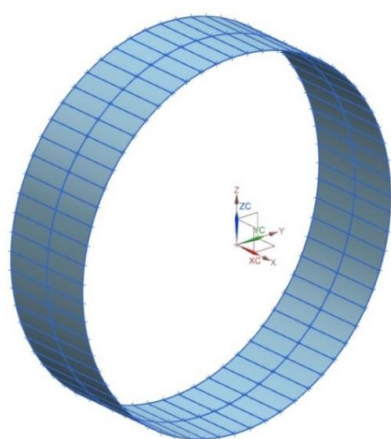
Формирование поверхностей с заданными геометрическими отклонениями выполняется с использованием ранее рассмотренных зависимостей (2.1) и (2.4). Могут учитываться геометрические погрешности, характерные для различных деталей ротора, а также неопределённости, вносимые средством измерения.



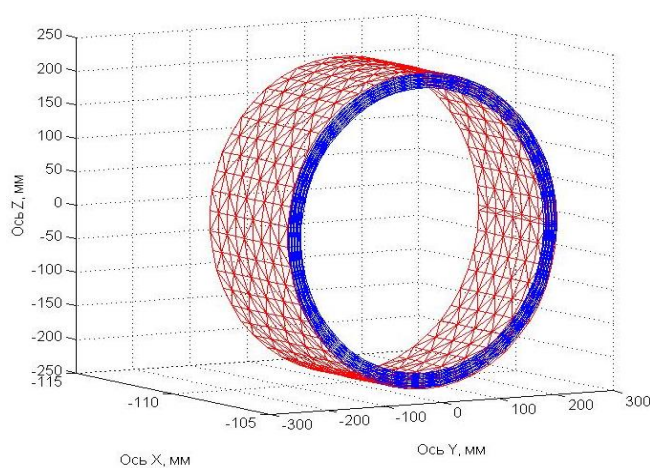
Рисунок 2.18 – Блок-схема создания моделей поверхностей деталей с заданными геометрическими отклонениями

2.6 Определение необходимого и достаточного объёма измеренных данных для построения действительных моделей деталей и узлов

В соответствии с принципом информационной достаточности, действительные модели объектов должны соответствовать необходимым требованиям по точности представления количественных характеристик исследуемых процессов обработки деталей и сборки узлов. Детали роторов сопрягаются по торцевым и цилиндрическим поверхностям, имеющим отклонения формы. Как было отмечено ранее, для описания поверхностей деталей, имеющих геометрические отклонения формы и расположения, могут использоваться сплайновые или триангуляционные поверхности. Триангуляционные поверхности более универсальны, используются для выполнения расчетов физических параметров в САЕ-пакетах, однако для их хранения требуется сравнительно большой объём оперативной памяти. Сплайновые поверхности по сравнению с триангуляционными имеют возможность более плавной экстраполяции измеренных данных. Величина погрешностей представления поверхностей зависит от количества задающих точек, кривизны поверхности и габаритов объекта (размерные параметры можно заменить плотностью точек на единицу площади). На рисунках 2.19, а,б соответственно представлено описание цилиндрической поверхности сплайновым или триангуляционным способами.



а)



б)

Рисунок 2.19 – Сплайновый (а) и триангуляционный (б) способы описания поверхностей деталей

Определение достаточности количества точек с учётом необходимой точности описания триангуляционных и сплайновых поверхностей выполнялось на примере цилиндрической поверхности. Макроотклонения формы и волнистость сопрягаемых

поверхностей деталей, рассматриваемые в работе, описываются в виде гладких функций, имеющих ограниченный диапазон изменения кривизны в её точках. Рассмотрение на примере цилиндров с разными размерами и, соответственно, с разной кривизной, позволяет характеризовать множество встречающихся в практике деталей. Рассматриваемые в диссертационном исследовании детали роторов компрессора и турбины сопрягаются по цилиндрическим и плоским поверхностям, отклонения формы которых имеют сходные диапазоны кривизны в точках. План исследований содержит рассматриваемые диаметры окружности сечения (от 10 до 810 мм с шагом 20 мм) и количество задающих точек интерполяционных поверхностей (от 30 до 400 с шагом 10). В качестве результирующей погрешности описания использовалось максимальное отклонение полярного радиуса точек интерполяционных моделей от радиуса цилиндра. Моделирование выполнялись в системе MATLAB.

Увеличение диаметра влечет за собой как изменение кривизны, так и увеличение габаритов объекта. На рисунке 2.20 приведены результаты исследований погрешностей описания поверхностей с использованием сплайновой или линейной интерполяции.

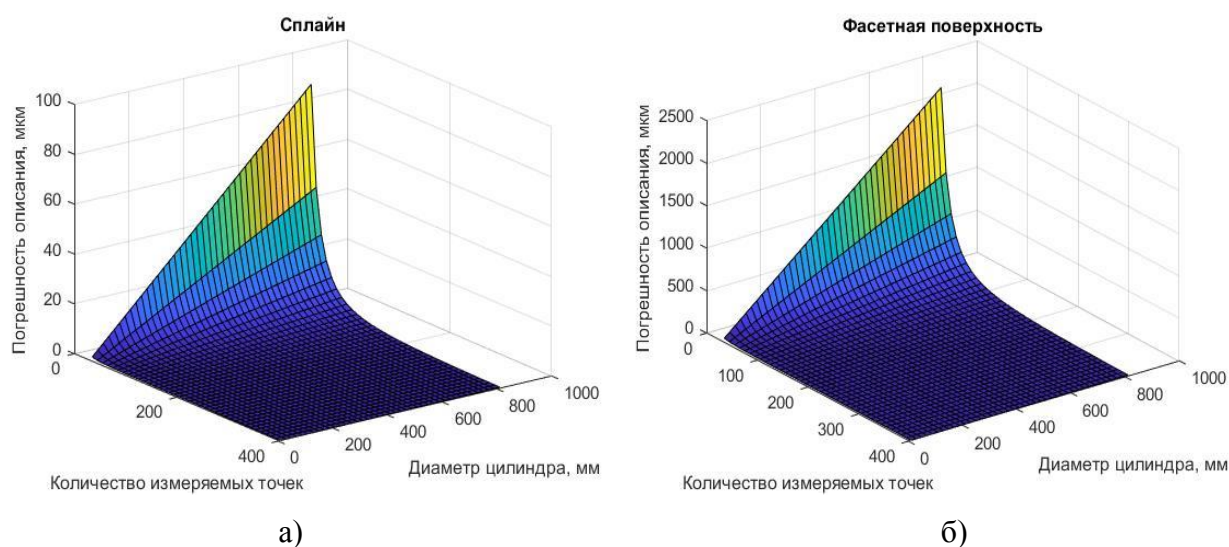


Рисунок 2.20 – Погрешности сплайнового (а) и триангуляционного (б) методов описания поверхностей деталей

На рисунке 2.21 приведены зависимости погрешности описания сплайновой поверхности при фиксированном диаметре и используемом количестве точек.

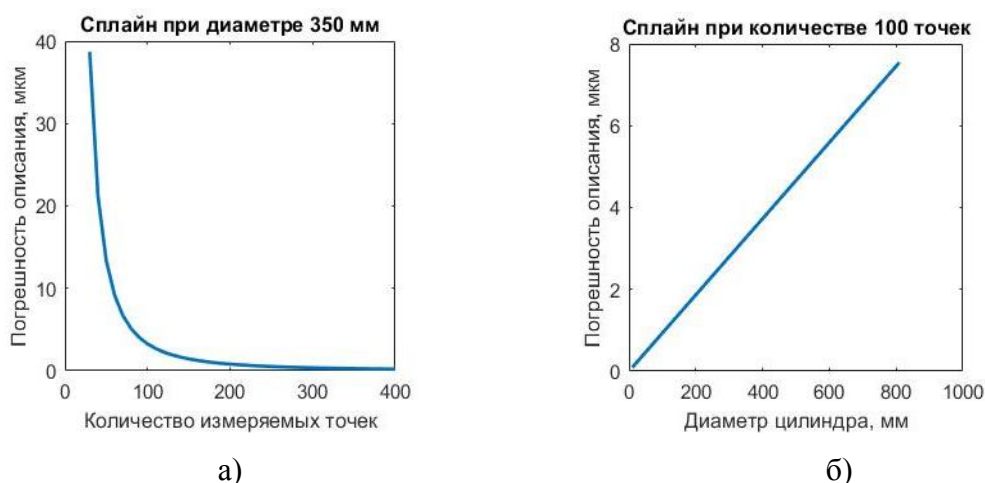


Рисунок 2.21 – Погрешности описания сплайновой поверхности при фиксированном диаметре (а) и количестве точек (б)

Для большинства рассматриваемых деталей и узлов ГТД допустимой является погрешность описания, составляющая не более 1 мкм. Для рассматриваемой цилиндрической поверхности с диаметром 350 мм описание с допустимой погрешностью достигается при использовании 200 задающих точек.

Исследования, выполненные в [13], включали моделирование серии поверхностей с известными значениями отклонения формы с использованием ряда Фурье, расчет максимальных отклонений при различном количестве задающих точек для описания поверхностей с помощью сплайновых уравнений третьей степени и с использованием триангуляционных сеток. Было получено сходное количество необходимых задающих точек, как и в рассмотренных экспериментах с цилиндрической поверхностью.

Таким образом, можно сделать вывод: при описании действительных поверхностей нужно исходить из габаритов объекта, кривизны и использовать подходящий инструмент описания. Чрезмерная дискретизация поверхностей нецелесообразна, поскольку ведет к нелинейному увеличению трудоёмкости расчетов (экспоненциальному или показательному).

2.7 Методика прогнозирования неопределенностей координатных измерений

Результаты измерений объектов должны удовлетворять требуемой точности, что приводит к необходимости оценки их погрешностей. Оценка неопределённостей измерений геометрических параметров деталей является необходимым условием для обеспечения требуемой точности построения действительных моделей объектов. Результаты

экспериментальных исследований показывают, что неопределённости (погрешности) измерений геометрии объектов могут существенно превышать паспортные характеристики средств измерений. Превышение суммарных неопределённостей над паспортными данными погрешностей средств измерений объясняется влиянием используемых методик измерений, геометрических отклонений измеряемых деталей и узлов на параметры процесса измерений. Необходимо отметить взаимосвязь условий выполнения измерений и экономической эффективности метрологического процесса. Важным параметром методик измерений является количество измерений (измеряемых точек) на поверхностях деталей. Полученные оценки неопределённостей измерений позволяют: определить применимость конкретных средств измерений для измерений определенных геометрических параметров; выбирать рациональные параметры измерений, обеспечивающие экономическую эффективность и наименьшую трудоёмкость измерений.

Неопределённость (погрешность) измерения геометрического параметра зависит от ряда факторов. Погрешность измерения заменяющего элемента может быть представлена в виде некоторой функции:

$$\bar{\Delta}_E = E(\bar{M}, \bar{P}, \bar{S}), \quad (2.16)$$

где $\bar{\Delta}_E$ – вектор параметров, возникающих при контроле заменяющего элемента, к ним относятся координаты центральной точки, направляющий вектор, радиус и т.д. в зависимости от типа заменяющего элемента;

\bar{M} – вектор параметров, характеризующих инструментальную погрешность координатно-измерительной машины (КИМ);

\bar{P} – вектор параметров плана контроля (количество контрольных сечений, число контролируемых точек в них, правило их расположения по измеряемой поверхности);

\bar{S} – параметры, обеспечивающие формальное описание поверхности.

Погрешности, вносимые КИМ при измерениях, нормируются спецификациями стандарта ISO 10360 «Геометрические спецификации изделий (GPS). Приемочные и повторные проверочные испытания координатно-измерительных машин (СММ)» [74, 148, 149, 150]. В соответствии со стандартом, погрешность измерения представляется интервальной оценкой, зависящей от длины измеряемой поверхности:

$$\Delta_L = A + L / B, \quad (2.17)$$

где A, B – некоторые коэффициенты;

L – измеряемое расстояние в пределах габаритов рабочей области КИМ.

Таким образом, вектор \bar{M} содержит коэффициенты A и B , отражающие величину инструментальной погрешности КИМ. Моделирование коэффициента A измерительной погрешности КИМ может быть выполнено в предположении нормального или равномерного распределения с использованием датчиков случайных чисел. Датчики случайных чисел реализованы в системах программирования ЭВМ.

В работе предлагается объединить основные параметры, влияющие на величину неопределенностей, в единую группу, характеризуемую понятием «параметры подобия». Параметры подобия включают:

- 1) плотность точек измерения (линейную, поверхностную, объёмную);
- 2) амплитуду отклонений, приведенную к соответствующим величинам допусков этих параметров;
- 3) относительную частоту $p = f_i / f_H$, где f_i – частота i -й доминантной гармоники, составляющей геометрического отклонения и f_H – частота Найквиста;
- 4) среднюю и максимальную скорости изменения геометрии поверхности.

Используемые в ходе изготовления деталей методы обработки характеризуются определёнными погрешностями формы поверхностей и их абсолютными значениями. Исследование статистических данных, получаемых после изготовления поверхностей деталей, позволит сформировать базу данных используемых методов обработки и соответствующих им погрешностей, включающих рассматриваемые в разделе 2.4 составляющие. На основе полученной информации о погрешностях методом имитационного моделирования можно оценить неопределённости, которые далее могут быть сохранены в базе данных. Блок-схема методики оценки неопределённости измерений приведена на рисунке 2.22 (на следующей странице).

Рассмотрим содержание этапов предложенной методики.

На первом этапе выполняется анализ условий выполнения измерений и технологии изготовления измеряемого объекта, при необходимости сбор статистических данных. Анализ технологии изготовления измеряемого объекта позволяет выдвинуть гипотезу о погрешностях формы поверхностей и их величинах. Погрешность формы измеряемых поверхностей и условия измерений, определяемые количеством и расположением измеренных точек, оказывает существенное влияние на неопределённость измерения. В базе данных «методов обработки поверхностей и параметров подобия, характерных геометрических погрешностей» ищутся соответствующие данные по измеряемой детали и необходимому геометрическому параметру. Оценка производится с использованием зависимостей из базы данных. Если необходимые данные (запись) отсутствуют, то следует выполнить действия, предусмотренные вторым этапом.

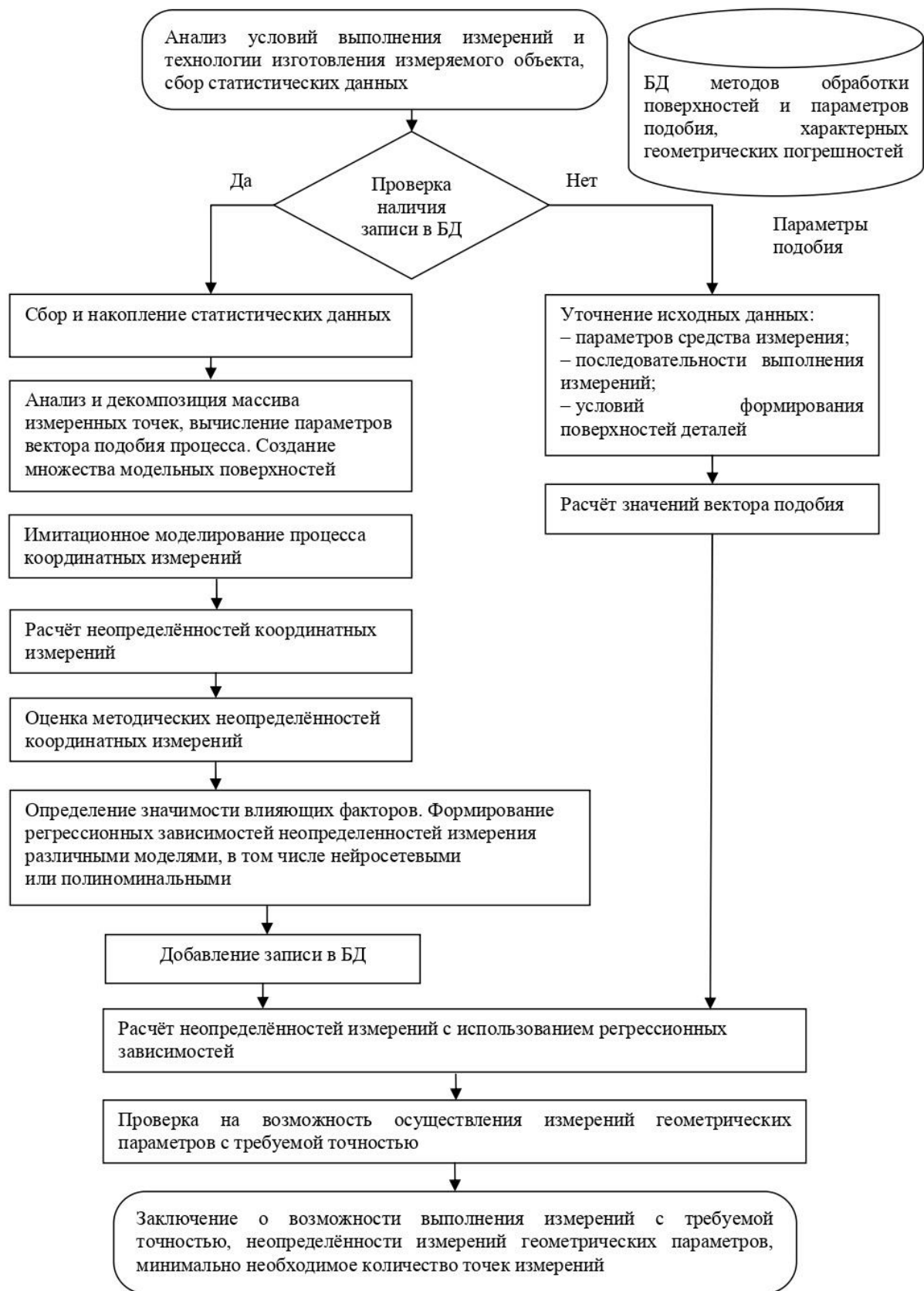


Рисунок 2.22 – Методика оценки неопределенностей координатных измерений

В ходе второго этапа выполняется сбор статистики, включающей избыточные измерения поверхностей в пределах свыше 1000 до 15000 измеренных координат точек. Для достижения высокой производительности и эффективности выполнения этих измерений рекомендуется реализовывать метод сканирования с помощью сканирующих измерительных средств и датчиков. В результате выполнения этапа формируется множество массивов измеренных точек поверхностей, имеющих характерные для данного вида поверхности геометрические отклонения. Объекты с требованиями по точности на уровне IT5...IT9 (величины допусков 0,01...0,1 мм) рекомендуется измерять с использованием контактного метода. Для измерения объектов с требованиями по точности на уровне IT10...IT14 и выше (величины допусков свыше 0,1 мм), могут быть использованы бесконтактные методы измерений, в том числе лазерный и оптический.

Третий этап предусматривает анализ статистических данных, в ходе которого оцениваются отклонение формы поверхностей и её составляющие, которые рассматривались в подразделе 2.4. Затем производится обработка статистических данных, заключающаяся в вычислении вероятностных характеристик и коэффициентов уравнений, описывающих рассматриваемые составляющие отклонения формы. На основе результатов, полученных в ходе анализа статистических данных, выполняется создание множества модельных поверхностей, которые характеризуют точность изготовления деталей. При создании множества модельных поверхностей учитываются номинальные параметры поверхностей, заданные чертежом или конструкторской 3D моделью. В результате выполнения этапа сохраняется множество реализаций действительных поверхностей детали.

Четвёртый этап содержит имитационное моделирование процесса координатных измерений с использованием разработанных алгоритмов статистического моделирования, основанных на методе Монте-Карло. В результате формируются выборочные массивы измеряемых точек из массивов точек модельных поверхностей.

В ходе пятого этапа выполняется расчёт неопределённостей координатных измерений геометрических параметров, вычисленных по массивам измеренных точек, полученных в четвёртом этапе. Расчёт неопределённостей измерений объектов выполняется с использованием имитационных моделей процесса координатных измерений, в том числе рассмотренных в источниках [13, 88, 101]. В результате выполнения пятого этапа формируются вероятностные характеристики величин неопределённостей координатных измерений: математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение и различные другие параметры.

На шестом этапе производится оценка неопределённостей методики координатных измерений с использованием технологий виртуальных измерительных мер и виртуальных комплектных сборок, описанных в подразделе 2.3. Для оценки неопределённостей методики измерений необходимо выполнить анализ условий сопряжений измеряемого объекта и ответных деталей. На основе результатов анализа формируются имитационные модели, позволяющие учесть особенности образования размерных и функциональных связей. Методические неопределённости можно оценить как разность между прогнозными значениями геометрических параметров, полученными с использованием технологий виртуальных измерительных мер, виртуальных комплектных сборок и такими традиционно используемыми методами, как МНК. Оценки методических погрешностей используются для выбора подходящего метода обработки результатов измерений для конкретной измерительной задачи. Подходящий метод обработки результатов измерений подразумевает минимальную методическую неопределённость с учётом допустимой погрешности измерений. Если методические неопределённости известных методов превышают допустимую погрешность измерений, то возникает необходимость разработки имитационной расчётной модели для выполнения обработки результатов измерений. В результате выполнения шестого этапа формируются оценки методических погрешностей измерения и рекомендации о выборе подходящего метода обработки результатов измерений.

Целью седьмого этапа является получение регрессионных зависимости величины неопределённости при измерении геометрических параметров от влияющих факторов, в том числе параметров подобию процесса координатных измерений. Предварительно определяется значимость влияющих факторов с помощью корреляционного анализа или методов снижения размерности. Рассматриваемые факторы, оказывающие малое влияние на неопределённости измерения геометрических параметров, могут быть исключены. Выбранные факторы используются для формирования регрессионных зависимостей с использованием различных методов, в том числе нейросетевых или полиномиальных. В результате выполнения седьмого этапа получают регрессионные зависимости, позволяющие по набору входных параметров подобию процесса измерения прогнозировать неопределённости координатных измерений геометрических параметров рассматриваемой поверхности. Многократное выполнение всех рассмотренных этапов для разных типов поверхностей и методов их обработки формируют пулы данных, которые будучи сохранёнными в упорядоченном виде, образует базу данных для дальнейшего использоваться на последующих этапах.

В ходе восьмого этапа выполняется расчёт неопределённостей измерений с использованием полученных регрессионных зависимостей. Используемые в процессе расчёта неопределённостей измерения регрессионные зависимости выбираются из базы данных на основании следующих параметров: 1) типа измеряемой поверхности и технологического метода её обработки, который определяет характер отклонения формы; 2) величины допуска на отклонение формы измеряемой поверхности; 3) габаритов измеряемой поверхности; 4) количества измеряемых точек.

Девятый этап содержит проверку возможности выполнения измерений геометрических параметров с требуемой точностью. Проверка осуществляется путем сопоставления допустимых и оцененных по регрессионным зависимостям неопределённостей измерений геометрических параметров. При проверке учитываются рациональное или технически достижимое количество измеряемых точек поверхностей деталей. Технически достижимое количество измеряемых точек определяется применяемыми средствами измерения и разрешающей способностью датчиков. Определяется минимально необходимое количество точек измерений, при котором обеспечивается требуемая точность измерений. В результате выполнения девятого этапа формируется заключение о возможности измерения рассматриваемых геометрических параметров с требуемой точностью имеющимися средствами измерения и/или минимально необходимое количество точек измерений на поверхностях объектов.

Модели и алгоритмы моделирования процесса координатных измерений, используемые в рассмотренной методике прогнозирования неопределенностей координатных измерений, приведены в работах [13, 88, 101, 105].

2.8 Исследование неопределённостей измерений при контроле геометрии деталей с учётом формирования размерных связей в составе сборочных единиц

Расчёт сборочных размерных связей выполняется на основе результатов измерений комплекта деталей. Достоверность измерения геометрических параметров деталей оказывает влияние на оцениваемые сборочные параметры узлов. В разделе 2.3 было отмечено, что существующие методы обработки результатов измерений не учитывают в полной мере особенностей формирования размерных связей в узлах и изделиях. Этот раздел посвящён оценке неопределённостей измерения геометрических параметров деталей, которые появляются вследствие использования методов обработки результатов измерений,

не учитывающих размерные связи в узлах. Рассмотрим последовательность выполнения оценки неопределённостей измерения деталей и узлов ГТД с использованием технологий ВМ и ВКС, на примере детали «проставка» (рисунок 2.23).

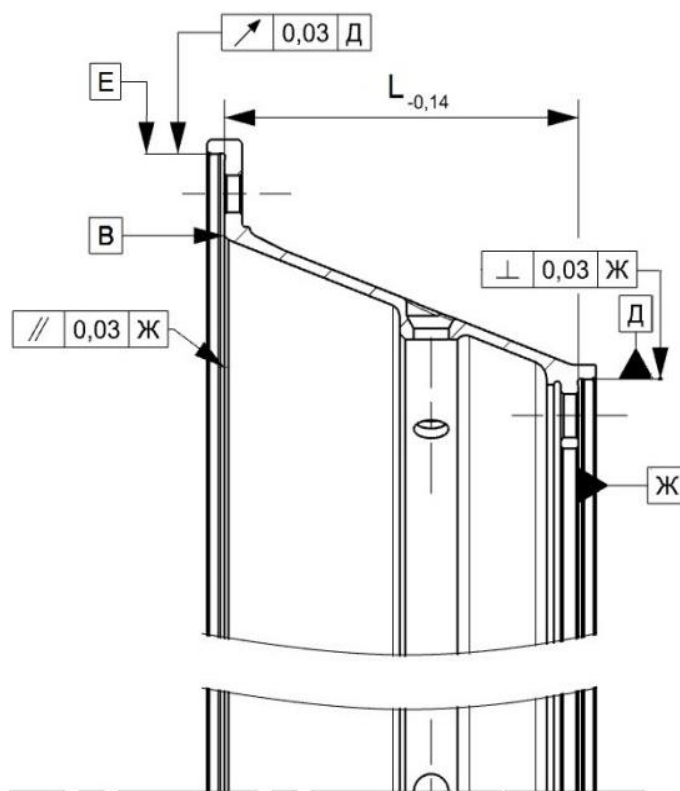


Рисунок 2.23 – Эскиз детали «проставка»

Контролируемыми геометрическими параметрами являются: линейный размер L с допуском $-0,14$ мм, перпендикулярность $0,03$ мм поверхности $Д$ относительно $Ж$, параллельность $0,03$ мм торцевой сопрягаемой с диском поверхности относительно поверхности $Ж$ и радиальное биение $0,03$ мм сопрягаемого с диском цилиндрического пояска относительно поверхности $Д$. Торец $Ж$ и отверстие $Д$ являются базовыми поверхностями детали.

Оценка неопределённостей измерений выполнялась в следующей укрупнённой последовательности: 1) виртуальное формирование множества из 1200 деталей с различными геометрическими отклонениями формы и расположения базовых и контрольных поверхностей; 2) оценка геометрических параметров деталей с использованием метода наименьших квадратов и технологии виртуальных измерительных мер; 3) сравнительный анализ и обобщение полученных результатов. Подробно рассмотрим выполнение приведенных этапов.

2.8.1 Формирование множества деталей с различными геометрическими отклонениями поверхностей для исследования неопределенности измерений.

Сформировано множество геометрических отклонений формы и расположения базовых и контрольных поверхностей по 1200 деталям. Приведём процедуру формирования такого множества на примере описания геометрии цилиндрических, торцевых и конических поверхностей детали типа «проставка». Указанная деталь не содержит конических поверхностей, однако последние целесообразно рассмотреть т.к. они часто встречаются в подобных и других деталях. Для описания отклонения формы в каждой точке поверхности использовался гармонический ряд:

$$\delta_{\phi}(x) = \sum_{k=1}^{+\infty} A_k \sin(k \cdot (2 \cdot \pi \cdot x / \tau + \theta_k) + (1 + (-1)^k) \cdot \pi / 2), \quad (2.18)$$

где A_k – набор амплитуд членов гармонического ряда;

θ_k – фазы членов гармонического ряда;

k – частоты членов гармонического ряда;

τ – период функции (длина кривой);

x – текущая длина кривой ограниченной начальной и текущей точками (угол).

На основе данных производственной статистики по геометрическим отклонениям цилиндрических и плоских поверхностей подобных деталей было выполнено моделирование координат точек поверхностей по формуле:

$$\vec{p}_p = (\vec{p}_n + \vec{n} \cdot \delta_{\phi}) \cdot \mathbf{R} + \vec{t}, \quad (2.19)$$

где \vec{p}_p, \vec{p}_n – вектор координат точек (x, y, z) соответственно измеряемой (моделируемой) и номинальной (CAD) поверхностей;

\vec{n} – вектор нормали в точке \vec{p}_n ;

δ_{ϕ} – величина отклонения формы в точке \vec{p}_n ;

\mathbf{R}, \vec{t} – матрица поворота и вектор транспонирования координат точки \vec{p}_n , характеризующие отклонение расположения.

Большинство деталей ротора и статора ГТД представляют собой тела вращения. Поверхность типа «конус» можно определять как «цилиндр» с погрешностью «конусность» вдоль направляющей. Торцевые и плоские поверхности являются кинематическими, т.е. и их можно получить путём перемещения геометрического объекта, например отрезка, ломаной или кривой вдоль некоторой направляющей кривой, в пространстве. Вектор

координат каждой точки направляющей кривой для плоскости $\vec{p}_{пл}$, параллельной XOY можно представить в виде матрицы:

$$\vec{p}_{пл} = \begin{vmatrix} r_T \cdot \cos(\chi) & r_T \cdot \sin(\chi) & h + \delta_\phi(\chi) \end{vmatrix} \cdot \mathbf{M}_x \cdot \mathbf{M}_y + \vec{t}, \quad (2.20)$$

где r_T – средний радиус точек торца;

χ – полярный угол точки $p_{пл}$;

δ_ϕ – моделируемое отклонение формы при помощи ряда (2.18) в точке $p_{пл}$;

h – высота сечения.

\mathbf{M}_x – матрица вращения вокруг оси x на угол α_x :

$$\mathbf{M}_x = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_x & -\sin \alpha_x \\ 0 & \sin \alpha_x & \cos \alpha_x \end{vmatrix}. \quad (2.21)$$

Матрица вращения \mathbf{M}_y вокруг оси y на угол α_y выглядит следующим образом:

$$\mathbf{M}_y = \begin{vmatrix} \cos \alpha_y & 0 & \sin \alpha_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha_y & 0 & \cos \alpha_y \end{vmatrix}. \quad (2.22)$$

Конические и цилиндрические поверхности рассматриваемых в исследовании деталей так же можно задать аналогично распространённому инструменту САД систем «заметающие поверхности». Построение поверхностей выполняется с использованием направляющих, представляющих собой сечения грани в плоскости, перпендикулярной оси вращения. Направляющие, называемые «кривыми заметания» вращаются вдоль оси вращения, формируя образующие конуса или цилиндра. Вектор координат каждой точки направляющей кривой сечения для цилиндрической грани, ось которой перпендикулярна XOY можно представить в виде матрицы:

$$\vec{p}_{ц} = \begin{vmatrix} (r_{ц} + \delta r_{ц} + \delta_\phi(\chi)) \cdot \cos(\chi) & (r_{ц} + \delta r_{ц} + \delta_\phi(\chi)) \cdot \sin(\chi) & h \end{vmatrix} \cdot \mathbf{M}_x \cdot \mathbf{M}_y + \vec{t}, \quad (2.23)$$

где $r_{ц}$ – номинальный радиус точек сечения;

$\delta r_{ц}$ – постоянная величина отклонения радиуса от номинального значения;

χ – полярный угол точки $p_{ц}$;

δ_ϕ – моделируемое отклонение формы при помощи ряда (2.18) в точке $p_{ц}$;

h – высота сечения.

Вектор координат каждой точки кривой сечения для конусной грани, ось которой перпендикулярна XOY , можно представить в виде матрицы:

$$\vec{p}_k = \left| (r_k - \delta r_h + \delta r_{\text{ц}} + \delta_n(\chi)) \cdot \cos(\chi) \quad (r_k - \delta r_h + \delta r_{\text{ц}} + \delta_n(\chi)) \cdot \sin(\chi) \quad h \right| \cdot \mathbf{M}_x \cdot \mathbf{M}_y + \vec{t}, \quad (2.24)$$

где r_k – номинальный радиус точек сечения;

δr_h – изменение радиуса конуса по высоте. Вычисляется по формуле:

$$\delta r_h = h \cdot \operatorname{tg}(90 - \gamma / 2), \quad (2.25)$$

где γ – угол при вершине конуса.

Было произведено моделирование 1200 наборов точек поверхностей соответствующих деталям. Поверхности B и $Ж$ содержат по 300 точек (3 сечения по 100 точек), поверхности E и $Д$ включают по 200 точек (2 сечения по 100 точек). Номинально точки направляющих лежат в плоскостях, параллельных XOY . Таблица 2.2 содержит статистические характеристики геометрических параметров, характеризующих отклонения формы поверхностей «проставка», включающие математические ожидания \bar{X} и среднеквадратические отклонения σ .

Таблица 2.2 – Значения параметров отклонений амплитуд δ_{ϕ} цилиндрических и плоских поверхностей

Параметр / Группа	Цилиндрический поясок E		Цилиндрический поясок $Д$		Торец B			
	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ	Сечение 1		Сечение 2	
					\bar{X}	σ	\bar{X}	σ
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2,80	0,94	1,40	0,47	2,28	0,76	2,37	0,78
2	8,47	0,94	4,24	0,46	6,60	0,74	7,26	0,74
3	13,98	0,91	7,01	0,47	11,15	0,72	12,15	0,80
4	19,71	0,91	9,80	0,50	15,59	0,77	16,93	0,82
Параметр / Группа	Торец B		Торец $Ж$					
	Сечение 3		Сечение 1		Сечение 2		Сечение 3	
	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ
1	2,46	0,83	3,30	1,06	3,42	1,17	3,94	1,26
2	7,51	0,82	9,55	1,10	10,20	1,07	11,88	1,44
3	12,44	0,80	15,91	1,06	16,94	1,10	19,75	1,27
4	17,49	0,85	22,16	1,13	23,53	1,18	27,67	1,32

Рассматривались четыре группы с различными центрами группирования и рассеиванием параметров. Распределение амплитуд в каждой группе подчиняется нормальному закону, фазы отклонения формы соответствует бета-распределению, отклонения

радиусов цилиндрических поверхностей – нормальному закону. В таблице 2.3 приведены статистические характеристики углов вращения α_x и α_y в матрицах \mathbf{M}_x и \mathbf{M}_y , а так же параметры вектора транспонирования \vec{t} для цилиндрических поверхностей.

Таблица 2.3 – Параметры отклонения расположения точек цилиндрических поверхностей

Параметр	Цилиндрический поясok E				Цилиндрический поясok D			
	α_x , град	α_y , град	t_x , мкм	t_y , мкм	α_x , град	α_y , град	t_x , мкм	t_y , мкм
\bar{X}	-180,00	-180,00	-0,18	-0,33	0,18	0,03	32,15	-29,80
σ	0,00	0,00	0,15	0,14	0,08	0,08	14,26	14,32

Параметры отклонения расположения моделировались по равновероятностному закону распределения. Номинальные размеры цилиндрических поверхностей приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Значение номинальных параметров цилиндрических поверхностей и торца

Параметр	Цилиндрический поясok E		Цилиндрический поясok D	
	Сечение 1	Сечение 2	Сечение 1	Сечение 2
$r_{ц}$, мм	235,0		235,0	
h , мм	-2,0	-4,0	-1,3	-3,8

Таблица 2.5 содержит статистические параметры углов вращения α_x и α_y матриц \mathbf{M}_x и \mathbf{M}_y для торцевой поверхности B и колебания расстояния между торцами B и $Ж$.

Таблица 2.5 – Значение параметров отклонения расположения точек торцов B и $Ж$

Параметр	Торец B		δ_L , мм
	α_x , град	α_y , град	
\bar{X}	-180,00	0,00	0,07
σ	0,00	0,00	0,01

Номинальные размеры торцевых поверхностей B и $Ж$ приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Значения номинальных параметров торцевых поверхностей

Параметр	Торец B			Торец $Ж$		
	Сечение 1	Сечение 2	Сечение 3	Сечение 1	Сечение 2	Сечение 3
r_t , мм	214,1	223,4	232,4	215,0	224,5	232,0
h , мм	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Гистограммы отклонений формы δ_ϕ моделируемых поверхностей приведены на рисунке 2.24.

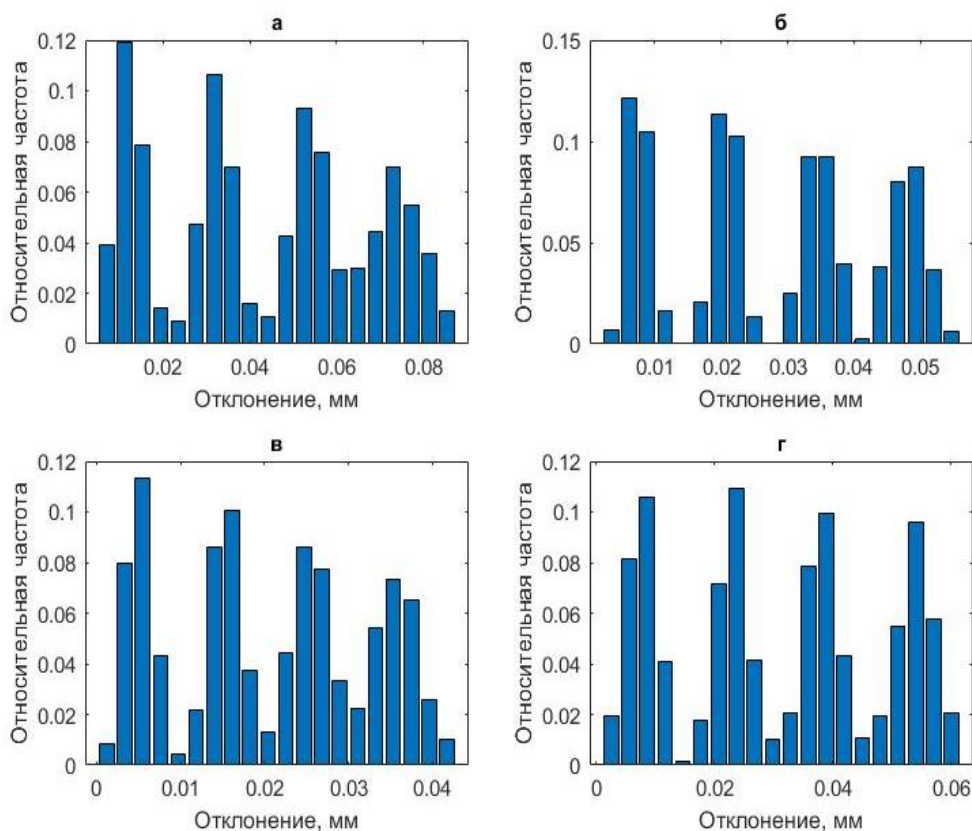


Рисунок 2.24 – Гистограмма распределения δ_ϕ в экспериментах:

а) торец *B*; б) торец *Ж*; в) отверстие *E*; г) отверстие *Д*

Все эксперименты были разбиты на четыре группы, в каждой из которых сочетание отклонений форм поверхностей находится в определенном интервале. Таким образом, при моделировании были сформированы четыре группы экспериментов по 300 случаев в каждом с различными величинами отклонений форм поверхностей. Первая группа имеет меньшие отклонения формы, четвертая – максимальные.

2.8.2 Оценка геометрических параметров деталей с использованием метода наименьших квадратов и технологии виртуальных мер

Оценка геометрических параметров деталей с использованием МНК выполнялась в следующем порядке. Измеренные точки поверхностей *Ж* и *Д* аппроксимировались соответственно примитивами плоскость и цилиндр. Направление оси вращения детали «проставка» определялось нормалью аппроксимирующей плоскости, положение по

координате центра аппроксимирующего цилиндра. Измеряемые геометрические параметры детали рассчитывались по отношению к оцененной оси вращения детали.

Ось вращения детали «проставка» по технологии виртуальных мер определялась с использованием виртуальной меры в форме диска с плоскими и цилиндрическими поверхностями номинальных размеров. Направление оси вращения ВМ совпадает с нормалью к плоской поверхности, а сама ось проходит через центр цилиндрической поверхности. Виртуальная мера совмещалась по условию прилегания с базовыми поверхностями $Ж$ и $Д$ измеряемой детали. Диаметр цилиндрической поверхности ВМ выбирался как вписанный максимального размера. Измеряемые геометрические параметры детали рассчитывались относительно оси вращения виртуальной меры. Модели сопряжений и обработки данных приводятся в главе 3.

2.8.3 Сравнительный анализ и обобщение полученных результатов

Рассматриваются параметры: радиальное биение $\delta_{\Delta b}$ отверстия E относительно нормального вектора торца $Ж$, проходящего через точку пересечения оси отверстия $Д$ и плоскости $Ж$; параллельность $\delta_{\Delta n}$ и торцевое биение $\delta_{\Delta b-t}$ поверхности B относительно $Ж$; отклонение расстояния δ_L между торцами $Ж$ и B . На рисунках 2.25 и 2.26 (на следующей странице) приведены гистограммы распределения параметров, полученных с использованием метода МНК и технологии ВМ.

Рассчитывались расхождения между полученными параметрами отклонений расположений, оцененные с помощью метода МНК и технологии виртуальных измерительных мер по формуле:

$$\Delta_m = \Pi_{\text{ВИМ}} - \Pi_{\text{МНК}}, \quad (2.26)$$

где $\Pi_{\text{ВИМ}}$ – параметр, оцененный с использованием технологии ВМ;

$\Pi_{\text{МНК}}$ – параметр, оцененный с использованием метода МНК.

В таблице 2.7 приведены математическое ожидание μ_{Δ} и среднеквадратическое отклонения σ_{Δ} величин Δ_m для рассматриваемых геометрических параметров, относящихся к поверхностям B и E (см. рисунок 2.23), полученные при использовании метода МНК и технологии ВМ.

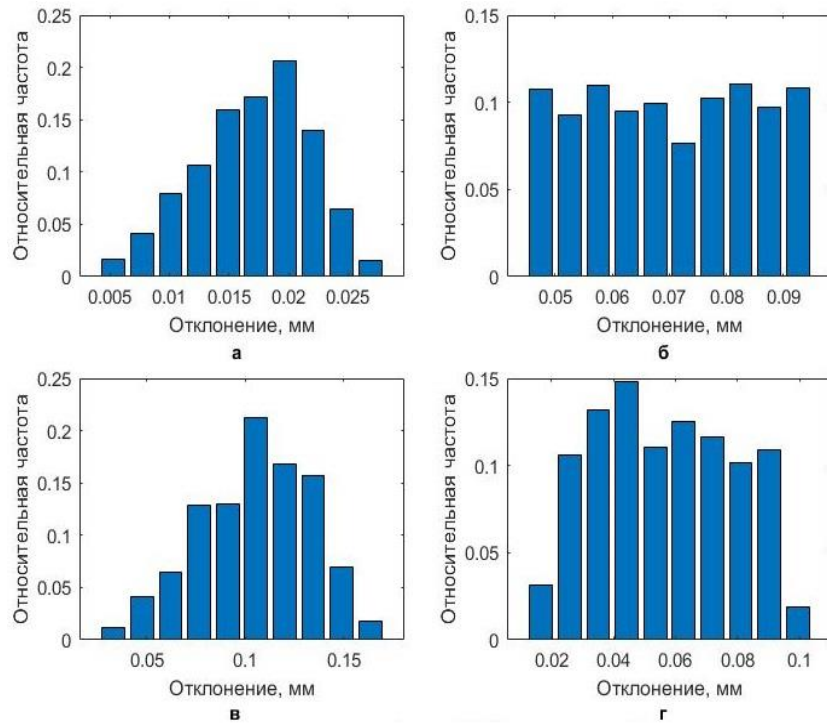


Рисунок 2.25 – Гистограмма распределения параметров, полученных с использованием метода МНК: а) $\delta_{\Delta n}$; б) δ_L ; в) $\delta_{\Delta \delta}$; г) $\delta_{\Delta \delta-T}$

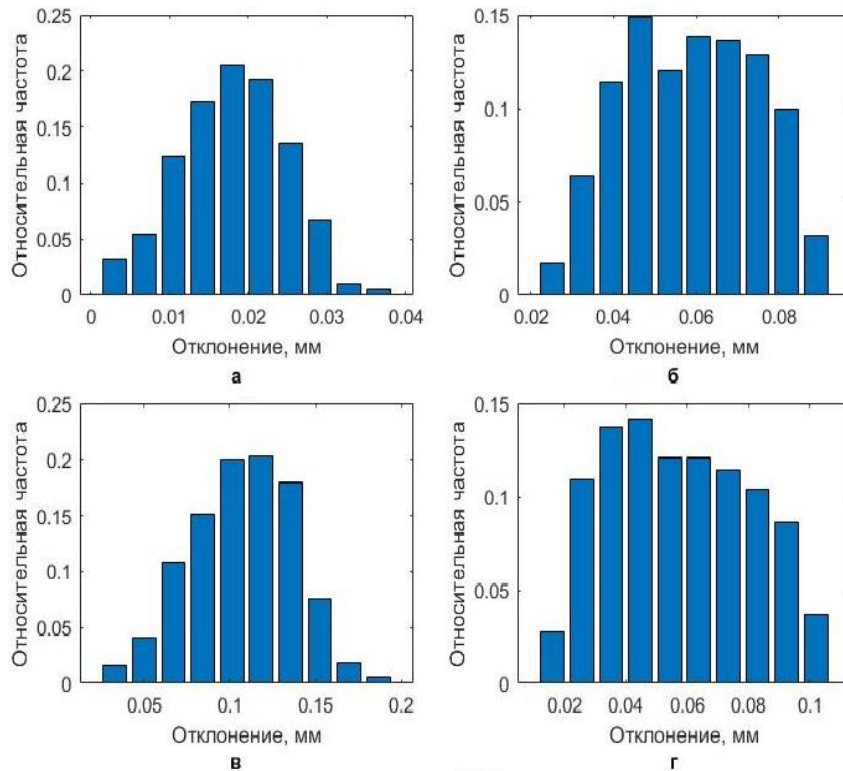


Рисунок 2.26 – Гистограмма распределения параметров, оцененных с использованием технологии VM:

а) $\delta_{\Delta n}$; б) δ_L ; в) $\delta_{\Delta \delta}$; г) $\delta_{\Delta \delta-T}$

Таблица 2.7 – Результаты сравнения рассматриваемых геометрических параметров полученных с использованием технологии ВМ и метода МНК

№ группы	$\delta_{\Delta_{\text{п}}}$, параллельность поверхности B		δ_L , отклонение расстояния между поверхностями $Ж$ и B		$\delta_{\Delta_{\text{б}}}$, радиальное биение поверхности E		$\delta_{\Delta_{\text{б-т}}}$, торцевое биение поверхности E	
	μ_{Δ}	σ_{Δ}	μ_{Δ}	σ_{Δ}	μ_{Δ}	σ_{Δ}	μ_{Δ}	σ_{Δ}
1	0,0002	0,0013	-0,0029	0,0008	0,0002	0,0019	0,0002	0,0015
	0,7%	9,2%	-4,4%	1,5%	0,2%	2,2%	0,8%	5,7%
2	0,0004	0,0035	-0,0085	0,0009	0,0011	0,0060	0,0005	0,0036
	3,3%	25,1%	-12,8%	3,1%	1,3%	6,7%	1,1%	7,8%
3	0,0010	0,0055	-0,0143	0,0012	0,0029	0,0094	0,0010	0,0055
	7,6%	39,1%	-21,1%	5,0%	2,9%	9,6%	1,7%	8,5%
4	0,0023	0,0074	-0,0199	0,0015	0,0053	0,0136	0,0021	0,0071
	17,8%	53,9%	-29,7%	6,9%	5,2%	13,6%	2,6%	8,4%

В качестве базы сравнения выступали параметры, полученные с использованием метода МНК. Оценка геометрических параметров выполнялась по отношению к базовым поверхностям D и $Ж$, приведенным на рисунке 2.23 (см. выше). Можно отметить, что с увеличением величины отклонения формы базовых и контрольных поверхностей увеличиваются расхождение результатов метода МНК и технологии ВМ. Для наглядного представления содержания таблицы 2.7 построены зависимости для математического ожидания смещения центра группирования и его среднеквадратического отклонения (рисунок 2.27).

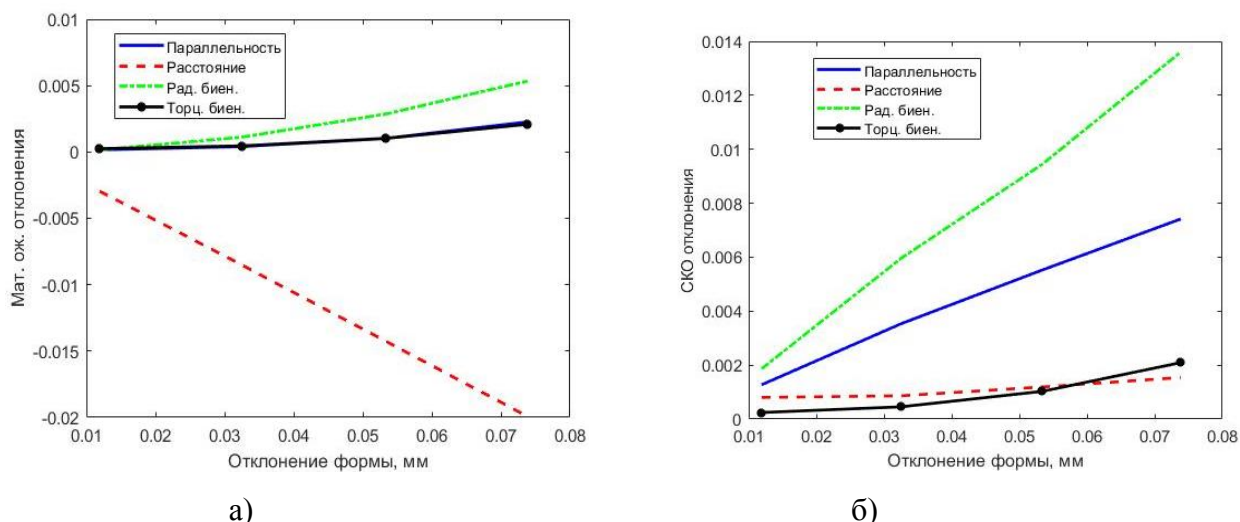


Рисунок 2.27 – Расхождение результатов оценки Δ_m геометрических параметров детали «проставка» в зависимости от величины отклонения формы поверхностей:

а) математическое ожидание; б) среднеквадратическое отклонение

Учитываемые размерные связи узла оказывают значительное влияние на следующие измеряемые геометрические параметры детали: параллельность $\delta_{\Delta n}$ торцевой поверхности относительно поверхности $Ж$, линейный размер $L_{-0,14}$ между поверхностями $В$ и $Ж$ и радиальное биение поверхности $Е$. Расхождение в расчетах, полученных с использованием метода МНК и по технологии ВМ может составлять существенную величину до 50%, а в среднем 20%. Величины параллельности торцев и радиального биения поверхностей, полученные с использованием ВМ, точнее на 20% по сравнению с методом МНК, поскольку последний даёт только усредненные характеристики без учёта особенностей макрогеометрии деталей. Таким образом, использование технологий ВМ и ВКС позволит повысить точность оценки геометрических параметров деталей, при их комплектации в составе узла за счёт учёта особенностей сопряжений.

Выводы по главе 2

1. Предложена научная идея, сформулированы основные принципы, предусматривающие 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.

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 определения действительных геометрических параметров деталей и сборочных параметров узлов с помощью ВМ и ВКС, учитывающий сопряжения контактирующих поверхностей объектов. Метод позволяет повысить точность оценки действительных размеров деталей и сборочных параметров узлов на 20% по сравнению с существующими технологиями. Использование метода при создании действительных моделей деталей и узлов позволит учитывать особенности формируемых размерных связей, определяемых возможными сопряжениями контактирующих поверхностей измеряемых объектов.

ГЛАВА 3 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ СБОРОЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ГТД

В третьей главе рассматриваются вопросы прогнозирования и обеспечения геометрической точности сборочных параметров технологических систем и узлов изделий. Приводятся методика и комплекс специальных моделей для оценки параметров сопряжений деталей и узлов, в частности, прогнозирования параметров контактного взаимодействия для расчёта размерных связей. Исследования базируются на использовании действительных моделей деталей, учитывающих фактическую геометрию их поверхностей. Оценка сборочных параметров узлов выполняется на основе статистического анализа отклонений формы и расположения поверхностей деталей и выполняется в двух постановках. В первой постановке сборочные единицы предполагаются абсолютно жёсткими. Во второй – учитываются их жёсткости. Для оперативной оценки сборочных параметров по результатам измерений в цеховых условиях предложено использование нейронных сетей, обучаемых на выборках статистических данных с применением разработанных моделей. С целью повышения точности деталей разработана обобщённая методика цифровой коррекции формообразования заготовок с применением их действительных моделей.

3.1.Методика оценки геометрической точности сборочных параметров на основе моделей сопряжений поверхностей деталей и их действительных моделей

В процессе сборки и ремонта изделий необходимо располагать информацией о действительных геометрических параметрах, характеризующих собранное состояние изделия. Актуальными являются задачи оценки текущего состояния изделий по имеющейся геометрической информации о деталях, которая может быть получена с помощью измерений. Сложная топология геометрических отклонений, включающая отклонения формы и расположения поверхностей, требует разработки эффективного метода и комплекса специальных моделей, предназначенных для оценки точности сборочных параметров изделий. Влияние геометрических отклонений поверхностей учитывается с использованием моделей сопряжения деталей. Ниже приведены этапы метода оценки точности сборочных параметров изделия. Представленный метод базируется на моделях сопряжения деталей.

Этап 1. Анализ конструкции сборочной единицы, выявление размерных связей и сопряжений деталей.

Этап 2. Формирование схемы расчета и исходные данные для расчета, в том числе:

- схемы размерных связей;
- схемы сопряжений контактирующих пар деталей;
- параметры, характеризующие точность формы и расположения поверхностей.

Этап 3. Создание моделей сопряжений сборочной единицы или пар деталей, учитывающих влияние жёсткости деталей на их геометрическую точность.

Этап 4. Моделирование групп сопряжений пар деталей или узлов для анализа зависимости вектора поля рассеивания от величины погрешностей формы и расположения поверхностей деталей группы.

Этап 5. Моделирование полей рассеивания замыкающего звена (сборочного параметра) путем суммирования составляющих расчетных погрешностей.

Этап 6. Определение доверительных интервалов и наиболее вероятных значений размеров замыкающих звеньев (сборочных параметров).

Этап 7. Анализ влияния составляющих погрешностей на суммарное поле рассеивания.

Этап 8. Проверка возможности достижения заданной точности узлов сравнением вероятных значений размерных параметров замыкающих звеньев (сборочных параметров) с назначенными допусками и техническими требованиями к последним.

Этап 9. Разработка рекомендаций.

Опишем содержание приведенных этапов.

На первом этапе производится анализ конструкции сборочной единицы или узла с целью определения размерных связей и сопряжений на основе сборочного чертежа или 3D модели изделия и составляющих деталей. Определяются целевые показатели анализа – сборочные параметры, точность которых должна быть обеспечена в процессе сборки. Далее анализируются детали, формирующие размерные цепи и определяющие величину сборочных параметров изделий. Определяются условия контакта деталей в сборке как сопряжение соответствующих поверхностей этих деталей, выявляются допуски и посадки на сопрягаемые поверхности. Проводится предварительный анализ выявленных размерных связей с целью определения условий взаимозаменяемости: полной, ограниченной или с применением пригонки.

В ходе второго этапа составляется схема размерных связей на основе результатов анализа первого этапа. Представление размерных связей может выполняться различными методами, в том числе векторных размерных цепей или графов. Рассмотрим использование

векторного метода [38, 116]. Размерная цепь представляется в виде последовательности векторов, каждый из которых описывает отдельное соединение деталей:

$$\vec{K}_\Sigma = \sum_{i=1}^n \vec{K}_i, \quad (3.1)$$

где \vec{K}_Σ – замыкающий вектор цепи;

\vec{K}_i – i -й вектор размерной цепи;

n – количество векторов в размерной цепи.

На основе определенных векторов размерных связей строятся схемы сопряжений контактирующих пар деталей. Схемы сопряжений должны включать все контактирующие поверхности. Схемы сопряжений могут быть простыми и сложными. Выявляются технические требования к точности формы и расположению поверхностей.

На третьем этапе создаются модели сопряжений сборочных единиц с учетом результатов предварительного анализа влияния их жёсткости на геометрическую точность. Если сопрягаемые детали принимаются абсолютно жёсткими, то при оценке сборочных параметров не учитывают возможные деформации сборочных единиц при сборке. Следовательно, применим принцип аддитивности при оценке сборочных параметров, т.е. узел рассматривается как совокупность отдельных моделей пар сопряжений без учета их взаимного влияния. Каждая модель определяет вектор в пространстве, описывающий положение пары сопрягаемых деталей. Суммирование всех векторов определяет результирующее положение соединяемых деталей, что позволяет рассчитывать сборочные геометрические параметры. Если сопрягаемые детали нельзя считать абсолютно жёсткими, то необходимо использовать модели оценки сборочных параметров, учитывающие их жёсткость. Принцип аддитивности при оценке сборочных параметров в силу взаимного влияния пар сопрягаемых деталей на результирующую деформацию здесь неприменим. В этом случае выделяются цепочки собираемых деталей, для которых влияние геометрических отклонений и жёсткости на сборочные параметры велико. Анализ влияния жёсткости деталей на сборочные параметры может быть сделан на основе статистики по сборке и ремонту изделий, либо на основе предварительного моделирования сборочных процессов. В ходе предварительного моделирования необходимо создавать модели, учитывающие характер посадок в соединениях, возможные геометрические отклонения формы и расположения поверхностей. Особое внимание следует уделять соединениям, в которых присутствуют посадки с натягом, используются болтовые соединения при малой жёсткости деталей. Отклонения формы сопрягаемых поверхностей деталей приводят к формированию неравномерного поля усилий в соединениях, что может являться причиной

отличных по величине и направлению деформаций узлов. Возникновение неравномерных деформаций приводит к появлению дополнительных погрешностей, величина и форма которых тем больше, чем меньше жёсткость соединяемых деталей. Изложенные особенности маложёстких систем предъявляют требования подхода к модели оценки сборочных параметров как к единому комплексу всех сопрягаемых пар деталей. Описанные модели будут изложены в последующих подразделах текущей главы.

На четвёртом этапе выполняется моделирование выявленных в ходе третьего этапа сопряжений пар деталей или сборочной единицы в целом. Моделирование выполняется на основе результатов измерений, либо по априорно известной геометрической информации деталей и узлов. Для получения величин отклонений сборочных параметров узла с заданным уровнем достоверности выполняется моделирование сопряжений деталей с учётом интервалов их геометрических отклонений. Для дальнейших исследований интервалы геометрических отклонений разбиваются на сетку дискретных значений. Далее формируются алгоритмические модули, включающие зависимость вектора поля рассеивания геометрического параметра от величин погрешностей формы и расположения. В качестве геометрических параметров выступает радиус-вектор, описывающий положение детали в пространстве, включающий в себя линейные и угловые координаты, а также сборочные геометрические параметры. Для возможности эффективного использования дискретных множеств геометрических данных, полученных в результате моделирования, применяются аппроксимационные и/или интерполяционные методы с целью их непрерывного представления в пространстве.

Пятый этап. Корректное суммирование полей рассеивания звеньев размерных цепей для определения поля рассеивания замыкающего звена осуществляется путем построения схемы размерных связей, обеспечивающей возможность определения относительного положения деталей посредством операции преобразования локальных систем координат деталей. Вероятностное суммирование погрешностей может быть осуществлено методом Монте-Карло, либо другими методами. При использовании метода Монте-Карло необходимо предварительно выполнить исследование формы и параметров законов распределения исследуемых величин, которые позволяют распространить моделируемые величины на множество реализаций случайного процесса сопряжений. Затем следует использовать обобщённые законы распределения с учётом параметров варьирования случайных величин, которые определяются в ходе моделирования сопряжений.

На шестом этапе определяются доверительные интервалы и наиболее вероятные значения замыкающих звеньев, в качестве которых выступают сборочные параметры. При

выполнении сборки и ремонта изделий основной расчётной задачей является определение параметров сопряжения комплекта деталей сборочной единицы, которые характеризуют:

- взаимное расположение деталей сборочной единицы, включающие по три поступательные и угловые координаты вокруг соответствующих координатных осей;
- зазоры или натяги, а также площадь контакта в соединениях между деталями сборочной единицы.

Действительные модели деталей сборочной единицы формируются по результатам их измерений. При оценке доверительных интервалов необходимо учитывать факторы, оказывающие влияние на размах поля рассеивания. К таким факторам при выполнении ремонта относятся:

- возможные относительные положения собираемых деталей;
- вариация условий сборки и сил закрепления.

Оценка значений может осуществляться точечными и интервальными оценками. В качестве точечной оценки выступает среднеарифметическое значение \bar{X} , являющееся оценкой математического ожидания. Интервальная оценка определяется исходя из среднеквадратического отклонения (σ), уровня доверительной вероятности (p) и количества степеней свободы (v_{eff}) с использованием t -распределения (3.2):

$$(\bar{X} - t_{p, v_{eff}} \sigma; \bar{X} + t_{p, v_{eff}} \sigma). \quad (3.2)$$

Эффективное число свободы v_{eff} рассматриваемого параметра определяется по объёму выборки и количеству параметров для рассматриваемого закона распределения. Так, для нормального распределения при заданном в техническом задании уровне доверительной вероятности, равном 95%, рассматриваемый показатель $t_{p=0,95, v_{eff}=2}$ составит 1,96.

В случаях, когда на итоговую случайную величину действует совокупность независимых факторов, можно говорить о том, что она распределена по нормальному закону в соответствии с центральной предельной теоремой. Для случайных величин, плотность вероятности которых не распределена в соответствии с известными законами, необходим метод получения интервальных оценок, который инвариантен к виду распределения. В качестве такого метода можно использовать аппроксимацию законов распределения аналитическими выражениями и получение с их помощью оценок при заданном уровне достоверности. Теоретические положения данного метода рассмотрены в работе [95].

На седьмом этапе выполняется анализ влияния различных погрешностей деталей на суммарное поле рассеивания замыкающих звеньев, в качестве которых могут выступать сборочные параметры.

На восьмом этапе выполняется проверка возможности достижения заданной точности замыкающих звеньев (сборочных параметров узлов). Проверка выполняется путём сравнения оцененных доверительных интервалов сборочных параметров с заданными допусками или техническими требованиями.

На заключительном девятом этапе формируются рекомендации по обеспечению требуемой точности сборочных параметров, заключающиеся в выборе взаимных положений деталей друг относительно друга и назначению допусков.

Реализация предложенной методики требует разработки моделей, позволяющих оценивать величины замыкающих звеньев или сборочных параметров на основе информации о результатах измерений деталей и/или узлов, представленных их действительными моделями. Последующие подразделы будут посвящены описанию разрабатываемых моделей.

3.2 Формализованная постановка задачи сборки деталей

Пусть имеется механическая система S и определена глобальная система координат O , заданная базисом $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ и точкой начала координат P_0 . Механическая система S включает в себя множество деталей $K = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$, для каждой из которых определена локальная система координат O_i с базисом $\vec{i}_i, \vec{j}_i, \vec{k}_i$ и точкой начала координат P_{0i} . Каждая из деталей k_i включает в себя подмножество поверхностей $B_i = \{b_i^1, b_i^2, \dots, b_i^{m_i}\}$.

Множество состояний системы Ω описывает взаимное положение множества деталей K . Каждый элемент данного множества ω является параметрами расположения локальной системы координат O_i относительно глобальной системы координат O :

$$\Omega = \left\{ \omega : \omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n), \omega_i = \begin{pmatrix} dx_i \\ dy_i \\ dz_i \\ \alpha_i \\ \beta_i \\ \gamma_i \end{pmatrix} \right\}, \quad (3.3)$$

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 сборки может быть определена в виде совокупности дискретных состояний системы: $\omega_1(t), \omega_2(t), \dots, \omega_n(t)$. Промежуточным или финальным состояниям системы можно сопоставить множество характеристик качества (целевых показателей) F сборки:

$$F = \left\{ \left\{ f_i \right\}, \left\{ f_j^r \rightarrow f_j, f_j^r > f_j \right\}, \left\{ f_k^r \rightarrow f_k, f_k^r < f_k \right\}, \dots \right\}, \quad (3.4)$$

где f_j, f_k – целевые показатели, численные величины которых могут быть заданы в технических требованиях к узлу или изделию, или предписаны другим образом;

f_j^r, f_k^r – расчётная (достигнутая) характеристика качества.

При этом промежуточные или финальные состояния системы должны удовлетворять совокупности ограничений по параметрам состояний:

$$\Omega_b = \left\{ \left\{ \omega_i^0 \leq \omega_i \leq \omega_i^1 \right\}, \omega_m \in \left\{ \omega_m^0, \omega_m^1, \dots, \omega_m^N \right\} \right\}, \quad (3.5)$$

где ω_i – вектор параметров i -го рассматриваемого состояния системы;

ω_i^0, ω_i^1 – соответственно нижнее и верхнее допустимые значения вектора параметров i -го рассматриваемого состояния системы, определяемые конструкцией сборочной единицы или условиями сборки;

$\left\{ \omega_m^0, \omega_m^1, \dots, \omega_m^N \right\}$ – множество, характеризующее допустимые значения рассматриваемых состояний системы.

Сформированные на втором этапе методики оценки точности размерных связей (см. подраздел 3.1) схемы сопряжений контактирующих пар деталей могут быть представлены в виде упорядоченного множества сопряжений контактирующих поверхностей c_i при сборке:

$$C = \left\{ \left\{ c_i, c_k \right\}_n, \left\{ c_i, c_k, c_{k+1} \right\}_{n+1}, \dots \right\}; C \subset B, \quad (3.6)$$

где $\left\{ c_i, c_k \right\}_n$ – подмножество контактирующих поверхностей c_i, c_k на n -м этапе сборки узла, сборочной единицы или изделия.

Последовательность подмножеств в упорядоченном множестве сопряжений C строго определяется порядком переходов в операции сборки.

Возможные реализации процесса сборки описываются множеством комбинаций $M_{сб}$:

$$M_{сб} = \left\{ \left\{ \omega_j, \left\{ c_i, c_k \right\}_n : \omega_j \in \Omega_b \right\} \right\}. \quad (3.7)$$

То есть каждому подмножеству контактных поверхностей соответствует группа состояний:

$$M_{сб} = \left\{ m_j \right\} = \Omega_b \cdot C^T. \quad (3.8)$$

Введем понятие функционала качества P , который задан на множестве возможных комбинаций вариантов сборки $M_{сб}$:

$$P(m_j) = \{f_i^r\}. \quad (3.9)$$

Результатом применения P является расчёт одной или нескольких характеристик качества. В этом случае достижение целевых характеристик качества f_i определяется как

$$f_i^r \rightarrow f_i, \quad (3.10)$$

где f_i^r – достигаемые целевые характеристики качества могут определяться следующим образом (для целевых характеристик, значения которых необходимо минимизировать):

$$f_i^r = \arg \min P(\{m\}) = \{\{m_k\} | \{m_l\} : P(\{m_l\}) > P(\{m_k\})\}. \quad (3.11)$$

где $\{m_k\} = \{c_i, c_j, \dots, \omega_k\}$ – вариант сборки номер k ;

$\{m_l\} = \{c_i, c_j, \dots, \omega_l\}$ – вариант сборки номер l ;

$\{m_k\} \subset M_{сб}, \{m_l\} \subset M_{сб}, \omega_k \subset \Omega_b, \omega_l \subset \Omega_b$.

Для целевых характеристик, значения которых необходимо максимизировать, формула (3.10) представляется следующим образом:

$$f_i^r = \arg \max P(\{m\}) = \{\{m_k\} | \{m_l\} : P(\{m_l\}) < P(\{m_k\})\}. \quad (3.12)$$

Введем интегральную функцию качества $Q = \{P_i(\{m\})\}$ как множество функционалов качества. Тогда справедливо, что:

$$Q \rightarrow Q_{\max} = F, \quad (3.13)$$

где F – множество характеристик качества (целевых показателей).

Характеристиками качества сборки могут являться: величина зазора между поверхностями, параметры напряженно-деформированного состояния в области контакта, уровень вибрационного состояния узла или изделия в целом и др. Для оценки качества сборки по показателям необходимо ввести функции, которые позволят сопоставлять состояния системы с целевыми показателями характеристик. Ключевой задачей является определение последовательности сборки, приводящей к достижению целевых показателей качества.

Определим, что под сопряжением понимается взаимное расположение двух и более деталей с образованием посадки по контактирующим поверхностям. Сопряжение двух поверхностей характеризуется величиной зазора G между поверхностями. В случае пересечения поверхностей образуется натяг, который можно трактовать как отрицательную

величину зазора. На рисунке 3.1 приведен пример условного зазора между двумя сопрягаемыми поверхностями.

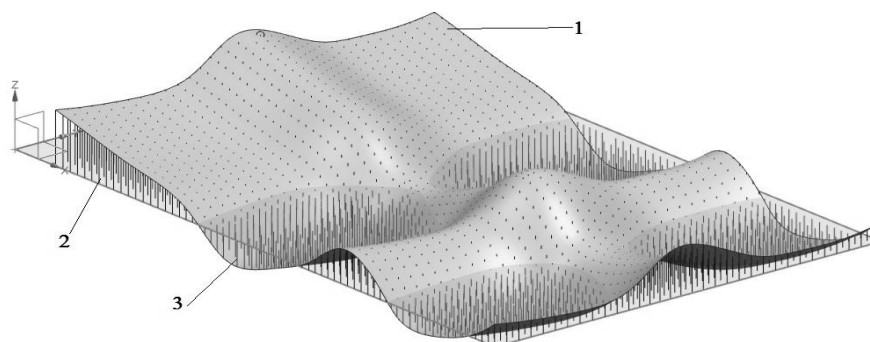


Рисунок 3.1 – Пример функции, описывающей зазор между двумя сопрягаемыми поверхностями в пространстве

Зазор между поверхностями определяется диаметрами вписанных между сопрягаемыми поверхностями сфер. Для дальнейших расчетов введем понятие условного зазора G , который в общем случае определяется как расстояние между поверхностями, измеренное по нормали к одной из поверхностей. Если поверхность (позиция 1 на рисунке 3.1) расположена выше поверхности (позиция 2 на рисунке 3.1) то условный зазор будет положительным. В противном случае (позиция 3 на рисунке 3.1) – отрицательным.

Рассмотрим вариант, предполагающий оценку качества сборки по величине условного зазора G между контактирующими поверхностями:

$$G = f(c_1, c_2, \dots, c_n), \quad (3.14)$$

где C_i – множество поверхностей i -й детали, сопрягаемых с поверхностями других деталей:
 $C_i = \{c_i : c_i \in B_i\}$.

На рисунке 3.2 приведено схематичное описание сборки на примере системы, состоящей из трёх деталей k_1 , k_2 и k_3 .

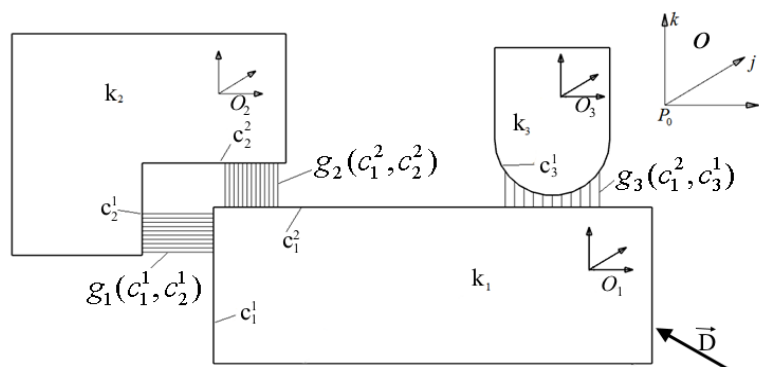


Рисунок 3.2 – Формализованное описание сборки сложных систем

Определение пространственного положения деталей производится относительно системы координат O , определяемой базисом $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ и точкой начала координат P_0 . Каждая деталь имеет собственную систему координат O_1, O_2, O_3 с соответствующими базисными векторами и точкой начала координат. Для приведенного на рисунке 3.2 примера состояние системы будет описываться матрицей:

$$\omega = \begin{pmatrix} dx_1 & dx_2 & dx_3 \\ dy_1 & dy_2 & dy_3 \\ dz_1 & dz_2 & dz_3 \\ \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 \\ \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 \end{pmatrix}. \quad (3.15)$$

Пусть последовательность сборки регламентируется условием неподвижности деталей k_2, k_3 и перемещением детали k_1 вдоль единичного вектора \vec{D} . Эта последовательность запишется в виде:

$$\omega = \begin{pmatrix} dx_1^0 + t \cdot D_x & dx_2^0 & dx_3^0 \\ dy_1^0 + t \cdot D_y & dy_2^0 & dy_3^0 \\ dz_1^0 + t \cdot D_z & dz_2^0 & dz_3^0 \\ \alpha_1^0 & \alpha_2^0 & \alpha_3^0 \\ \beta_1^0 & \beta_2^0 & \beta_3^0 \\ \gamma_1^0 & \gamma_2^0 & \gamma_3^0 \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

где $dx_i^0, dy_i^0, dz_i^0, \alpha_i^0, \beta_i^0, \gamma_i^0$ – расположение локальной системы координат O_i относительно системы координат O перед началом сборки.

t – перемещение вдоль вектора \vec{D} .

Каждая деталь сборки имеет сопрягаемые и не участвующие в сопряжении поверхности. Построим разбиение сопрягаемых поверхностей c_1^1 и c_1^2 детали k_1 равномерной координатной сеткой и определим расстояние от узлов сетки до этих поверхностей. Функциями локальных зазоров g_1, g_2, g_3 будут являться суммы расстояний от точек разбиения поверхностей c_1^1 и c_1^2 до поверхностей c_2^1, c_2^2, c_3^1 . Итоговую функцию зазора определим как сумму локальных функций зазора:

$$\begin{cases} g_1 = \sum_i dist(p_i, c_2^1), p_i \in c_1^1 \\ g_2 = \sum_i dist(p_i, c_2^2), p_i \in c_1^2 \\ g_3 = \sum_i dist(p_i, c_3^1), p_i \in c_1^1 \\ G = g_1 + g_2 + g_3 \end{cases}, \quad (3.17)$$

где $dist(p_i, c_k^j)$ – расстояние от точки p_i до поверхности c_k^j .

Исходной информацией для определения функций зазоров являются действительные модели деталей и узлов ГТД.

В следующих подразделах будет приведено описание моделей для определения параметров сборки деталей.

3.3 Прогнозирование геометрических параметров сопряжений поверхностей абсолютно жёстких деталей

Сопрягаемые сборочные единицы в данном разделе рассматриваются как абсолютно жёсткие тела. К числу таких сборочных единиц допустимо отнести опоры ГТД, толстостенные корпуса, жёсткие валы и другие. Для подобных деталей характерны деформации, величины которых не являются существенными по отношению к рассматриваемым сборочным параметрам. В ряде случаев маложёсткие детали могут рассматриваться как абсолютно жёсткие, для упрощения и ускорения размерных расчётов. В следующих подразделах приведено описание разработанных моделей прогнозирования геометрических параметров сопряжений абсолютно жёстких деталей.

3.3.1 Моделирование сопряжения поверхностей деталей методом совмещения

Наиболее распространённое сопряжение деталей в роторах ГТД выполняется с использованием плоских (торцевых) и цилиндрических поверхностей. Графические пояснения модели сопряжения абсолютно жёстких тел будут приводиться на примере плоских поверхностей, имеющих геометрические отклонения. На рисунке 3.3 представлены две детали, сопрягаемые по двум поверхностям, которые имеют геометрические отклонения.

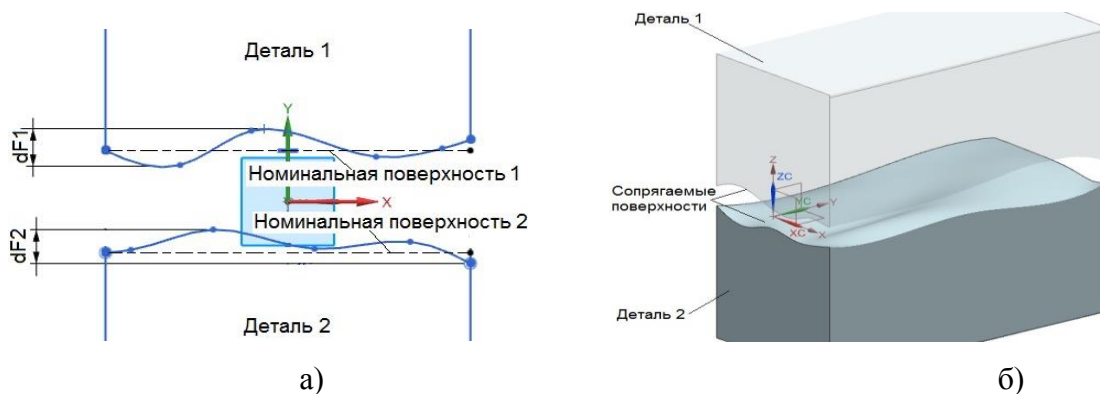


Рисунок 3.3 – Двухмерное (а) и трёхмерное (б) графическое пояснение к задаче сопряжения двух деталей по плоским поверхностям с отклонениями формы

Номинальная форма плоских поверхностей, приведенных на рисунке 3.3, а представлена двумя прямыми. Отклонения формы сопрягаемых поверхностей обозначены через dF_1 и dF_2 соответственно.

Универсальным подходом к расчету параметров сопряжения кривых и поверхностей является метод их наилучшего совмещения. Этот метод предусматривает систему ограничений на пересечение сопрягаемых элементов. Совмещение поверхностей широко используется в метрологии для обработки результатов измерений. Результат операции совмещения профилей поверхностей 1 и 2 представлен на рисунке 3.4, а.

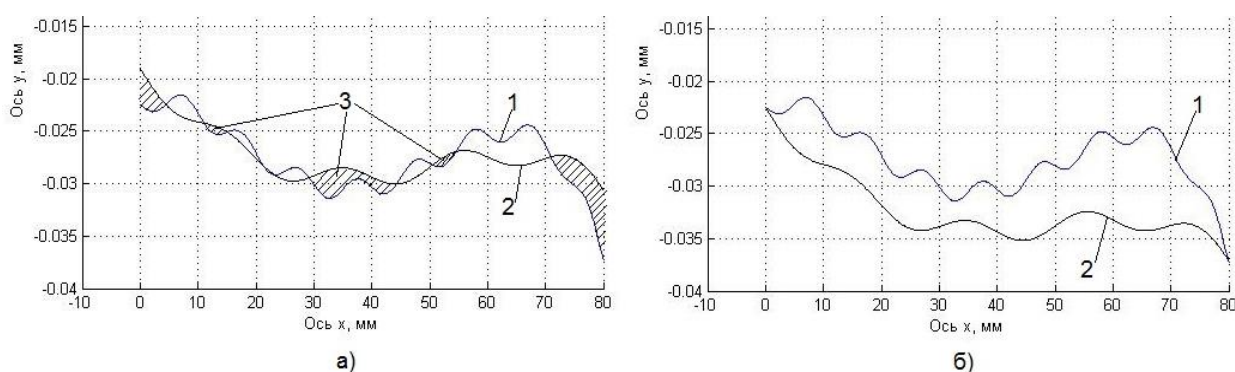


Рисунок 3.4 – Сопряжение двух деталей, имеющих геометрические отклонения без учета ограничения на пересечение (а) и с учетом ограничения на пересечение (б)

Между совмещаемыми профилями могут возникать как зазоры, так и пересечения поверхностей – «заступы». Контактное взаимодействие поверхностей натуральных деталей не может иметь заступы при условии соблюдения технологии их сборки. Поэтому для определения сопрягаемого состояния деталей необходимо учитывать ограничения на пересечение их поверхностей, как показано на рисунке 3.4, б.

В качестве целевой функции условий сопряжений поверхностей деталей, используется функция G , зависящая от вектора координат взаимного расположения поверхностей \vec{V} . Функция G определяется как сумма расстояний между точками с отрицательным зазором:

$$G(\vec{V}) = \sum d_{gap}; \quad d_{gap} < 0, \quad (3.18)$$

где d_{gap} – величина зазора.

В общем случае вектор взаимного расположения содержит три линейных и три угловых параметра для соответствующих координатных осей. Сборка деталей производится вдоль заданного направления перемещения. Процесс перемещения

поверхностей одной детали относительно другой производится вдоль координатных осей итерационно до выполнения условия:

$$\xi_1 \leq -G(z) \leq \xi_2, \quad (3.19)$$

где ξ_1 и ξ_2 – константы, задающие погрешность сопряжённого состояния.

Для расчёта функции $G(z)$ на каждом этапе выполняется наилучшее совмещение сопрягаемых поверхностей. Стандартным алгоритмом, решающим задачу наилучшего совмещения, является итерационный алгоритм ближайших точек (ICP) [199]. Это итерационный алгоритм, у которого на каждой итерации методами нелинейного оптимизационного поиска рассчитываются углы поворота и перемещения вдоль координатных осей. Целевую функцию алгоритма можно представить в виде:

$$f(R, t) = \frac{1}{n_p} \sum_{ip=1}^N \left\| R \cdot \bar{p}_{пов2_ip} + \bar{T} - \bar{p}_{пов1_ip} \right\|^2 \rightarrow \min, \quad (3.20)$$

где n_p – количество точек совмещения;

$\bar{p}_{пов1_ip}$ – вектор координат точки первой поверхности;

R, \bar{T} – матрица поворота и вектор перемещения соответственно;

$\bar{p}_{пов2_ip}$ – вектор координат точки второй поверхности, соответствующий $\bar{p}_{пов1_ip}$.

Графическое пояснение к совмещению поверхностей представлено на рисунке 3.5.

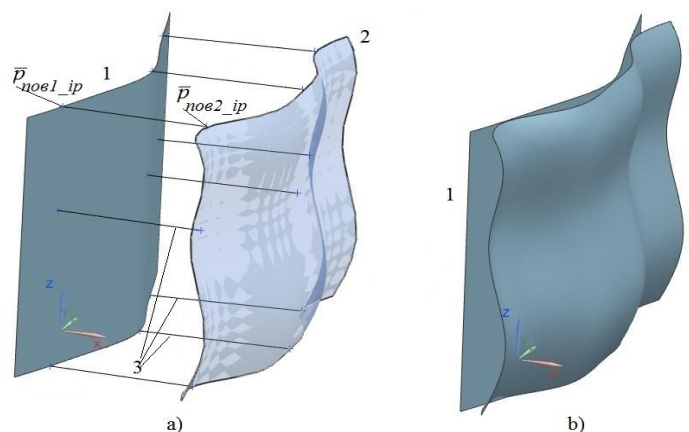


Рисунок 3.5 – Графическое представление задачи совмещения поверхностей 1 и 2 до выполнения их совмещения (а) и при сопряжённом состоянии (б)

На рисунке 3.5, а показаны три нормали \bar{p} к поверхности 1, проходящие через совмещаемые точки. Для поиска параметров функции (3.20) применялся метод последовательного квадратичного программирования. Система ограничений для исключения пересечений двух поверхностей выглядит следующим образом [179]:

$$\left\{ \begin{array}{l} (\bar{P}_{\text{пов2}_1} - \bar{P}_{\text{пов1}_1})^T \cdot \bar{n}_1 \geq 0, \\ \dots \\ (\bar{P}_{\text{пов2}_i} - \bar{P}_{\text{пов1}_i})^T \cdot \bar{n}_i \geq 0, \end{array} \right. \quad (3.21)$$

где \bar{n}_i – вектор нормали i -й точки сопрягаемой первой поверхности.

Таким образом, алгоритм достижения требуемых условий сопряжения (3.19) заключается в итерационном формировании вектора движения \bar{D}_1 сопрягаемых поверхностей путем достижения целевой функции (3.20) с учётом ограничений на пересечение поверхностей (3.21). Вектор движения \bar{D}_1 задаётся с учётом последовательности выполнения переходов операции сопряжения торцевых и цилиндрических поверхностей деталей ротора.

1. Первый предварительный переход обеспечивает сопряжение торцевых и цилиндрических поверхностей деталей, при этом вектор \bar{D}_1 задается изменением трёх поступательных и трёх угловых координат;

2. Второй переход обеспечивает сонаправленность осей сопрягаемых деталей и включает сопряжение торцевых поверхностей, при этом вектор \bar{D}_1 задается изменением одной поступательной и двух угловых координат;

3. Третий переход обеспечивает совпадение осей сопрягаемых деталей, включает сопряжение по цилиндрическим поверхностям, при этом вектор \bar{D}_1 задается изменением двух поступательных координат;

На четвертом переходе производится уточнение направления осей сопрягаемых деталей и их сопряжения по торцевым поверхностям, при этом вектор \bar{D}_1 задается изменением одной поступательной и двух угловых координат.

В рассматриваемых роторах точность торцевых поверхностей является определяющей в силу их большей протяженности по сравнению с цилиндрическими центрирующими поясками дисков.

Неопределённость сопряжения поверхностей можно оценить с использованием метода Монте-Карло путем многократного моделирования контактного взаимодействия при различных исходных условиях. В качестве исходных условий могут выступать:

- 1) отклонения формы сопрягаемых поверхностей, определяемые амплитудой и фазой;
- 2) условия сборки, в том числе определяемых вектором направления приложения усилия сборки. Количество n_n рассчитываемых вариантов сопряжений определяется с учётом требуемой точности δ при заданной доверительной вероятности P . Если неопределённость

сопряжений описываются законом нормального распределения с среднеквадратичным отклонением σ_x , то n_n может быть определено по формуле:

$$n_n \geq (z_p \cdot \sigma_x / \delta)^2, \quad (3.22)$$

где z_p – квантиль нормального распределения при $P = 95\%$.

Рассмотрим метод сопряжения поверхностей абсолютно жёстких деталей на основе метода сечения поверхностей.

3.3.2 Моделирование сопряжения поверхностей деталей с использованием метода сечений

Модель сопряжения поверхностей деталей на основе численного метода множества сечений целесообразно использовать для моделирования сопряжений деталей, имеющих сопрягаемые отвесные наклонные поверхности, например конусные. Предложенный метод может быть использован для решения следующих задач: 1) определения допустимости взаимного положения деталей при сборке узла; 2) оценки текущего состояния собираемой системы, включающей комплект деталей для сборки узла; 3) определение оптимального состояния узла при его сборке и последовательности, приводящей к данному состоянию. Допустимое состояние сборки деталей может быть определено при анализе кривых пересечения Cur_1 и Cur_2 сопрягаемых поверхностей c_1 и c_2 произвольной плоскостью P , параллельной плоскости XOY , как показано на рисунке 3.6.

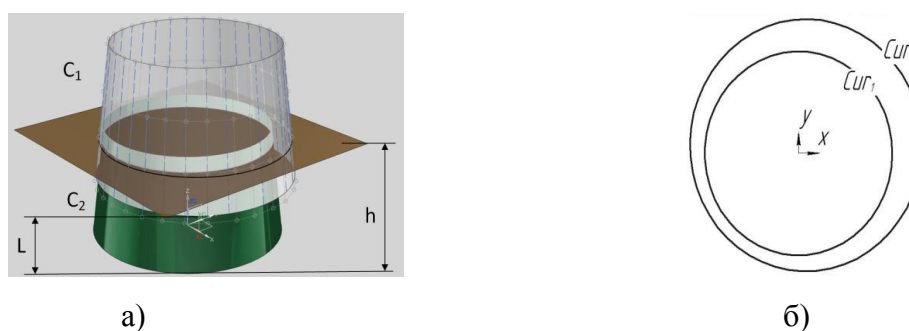


Рисунок 3.6 – Сечение сопрягаемых поверхностей на примере конусных поверхностей (а) и формируемые кривые Cur_1 и Cur_2 (б)

Допустимое взаимное положение собираемых деталей определяется тем, что кривые Cur_1 и Cur_2 не должны пересекаться. Это утверждение справедливо для любой плоскости P , пересекающей поверхности c_1 и c_2 , т.е. для плоскостей, удовлетворяющих условию:

$$h \in [L; \min(H_1, L + H_2)], \quad (3.23)$$

где L – расстояние между плоскостями XOY и $X_2O_2Y_2$;

h – расстояние между плоскостями XOY и P ,

H_1 и H_2 – протяженность поверхностей b_1 и b_2 .

Для проверки допустимости состояния численными методами необходимо произвести разбиение интервала $[L; \min(H_1, L + H_2)]$ на участки и выяснить, будут ли пересекаться кривые Cur_1 и Cur_2 , на каждом участке интервала между плоскостями XOY и P . Сетка разбиения интервала на участки зависит от предполагаемого поведения функции отклонения формы поверхностей.

Определение оптимального собранного состояния узла выполняется в два этапа: 1) поиск расстояния L_p , которое обеспечивает максимальную площадь контакта поверхностей сопрягаемых деталей; 2) определение положения, при котором достигается минимальное значение функции зазора, образованного кривыми Cur_1 и Cur_2 . Параметрическую модель осесимметричной поверхности удобно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} \Delta F = \Delta F(u, v) \\ x = (R(u, v) + \Delta F(u, v)) \cdot \cos(v) \\ y = (R(u, v) + \Delta F(u, v)) \cdot \sin(v) \\ z = u \end{cases} \quad (3.24)$$

где ΔF – функция отклонения формы поверхности от её номинального значения;

x, y, z – координаты точки поверхности;

$R(u, v)$ – радиус-вектор, описывающий номинальную форму профиля поверхности;

u, v – параметры поверхности.

Для оценки сопряжения поверхностей c_1 и c_2 выполняется разбиение поверхности b_1 равномерной сеткой и определение функции зазора как суммарного расстояния от точек сетки до поверхности:

$$G = \sum_i dist(p_i, b_i), p_i \in b_i. \quad (3.25)$$

Указанная функция является оценкой пространства между сопрягаемыми поверхностями c_1 и c_2 . Для повышения точности сборки необходимо выполнить минимизацию функции (3.25), что обеспечивает максимальное перекрытие сопрягаемых деталей.

Рассмотрим модель сопряжения деталей с конусными поверхностями. Номинальная форма профиля для конусной поверхности описывается функцией:

$$R = R_1 + \frac{H-u}{H} \cdot (R_2 - R_1), \quad (3.26)$$

где R_1, R_2, H – радиусы конусной поверхности и её высота, как показано на рисунке 3.7.

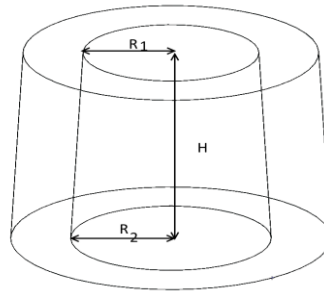


Рисунок 3.7 – Эскиз детали с конусной поверхностью

Модель сопряжения поверхностей деталей реализована на основе алгоритма поиска величины максимального перекрытия для множества сечений при последовательном спуске сопрягаемой поверхности с начальной высоты и подборе вектора совмещения. На рисунке 3.8 показана система из двух деталей с конусными поверхностями.

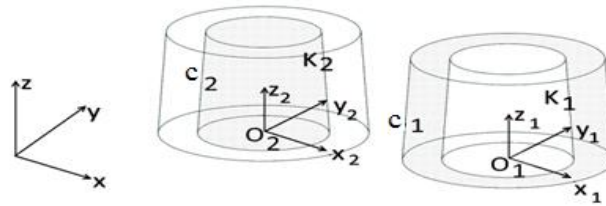


Рисунок 3.8 – Модель механической системы с двумя конусными кольцами

Для деталей K_1 и K_2 заданы локальные системы координат R_1 и R_2 . Сопряжение деталей происходит по поверхностям c_1 и c_2 . Каждая из поверхностей задается в локальных координатах детали и описывается формулой (3.26). Для удобства система координат всей системы определена совпадающей с системой координат детали K_1 . Совмещение систем координат и фиксация положения детали позволяет представить состояние системы в виде:

$$\omega = (dx_2 \quad dy_2 \quad dz_2 \quad \alpha_2 \quad \beta_2 \quad \gamma_2)^T. \quad (3.27)$$

В качестве последовательности сборки будем рассматривать функцию сборки конусных колец, моделирующую технологию их запрессовки, имеющую следующий вид:

$$F(t) = (dx_2^0 \quad dy_2^0 \quad dz_2^0 + t \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T, \quad (3.28)$$

где dx_2^0, dy_2^0, dz_2^0 – расположение системы координат R_2 относительно системы координат R перед началом сборки, а t – величина смещения по координате z .

Допустимость состояния рассматриваемой системы определяется численными методами путем анализа пересцаемости описанных выше кривых Cur_1 и Cur_2 . В параметрическом представлении поверхностей (3.26) ось параметра u совпадает с осями Z и Z_2 систем координат R и R_2 , поэтому для получения уравнения кривых Cur_1 и Cur_2 достаточно найти соответствующее значение параметров u_1 и u_2 . Блок-схема алгоритма оценки допустимости состояния механической системы представлена на рисунке 3.9.

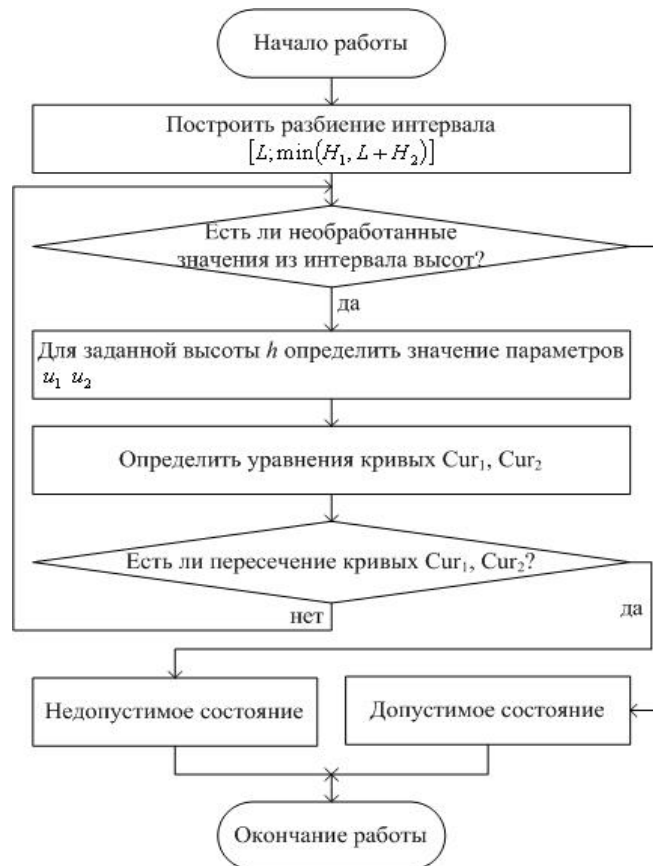


Рисунок 3.9 – Блок-схема алгоритма определения допустимости состояния механической системы

Рассмотренная задача является вспомогательной для решения задачи определения оптимального состояния собранного узла и назначения последовательности сборки, приводящей к данному состоянию. В качестве начального состояния будем рассматривать положение деталей, при котором деталь K_2 располагается на высоте $H_1 + \Delta$ и ось OZ совпадает с осью O_2Z_2 . Формулирование начального состояния:

$$\omega_0 = (a_0 \quad b_0 \quad c_0 \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T, \quad (3.29)$$

где a_0 и b_0 – параметры, равные 0;

c_0 – параметр, равный $H_1 + \Delta$.

Очевидно, что данное состояние является допустимым, так как детали находятся друг над другом и их поверхности не пересекаются. Задачей поиска оптимального состояния при заданной последовательности сборки по (3.28) является нахождение параметров состояния механической системы a, b, c , при которых достигается минимальные зазоры между сопрягаемыми поверхностями.

Решение этой задачи выполняется в два этапа: 1) поиск максимального перекрытия l (см. рисунок 3.6); 2) определение смещений, при которых достигается минимальное значение функции зазора. Для поиска величины максимального перекрытия будем использовать последовательный спуск с начальной высоты с подбором вектора перемещения t . Блок-схема разработанного алгоритма представлена на рисунке 3.10.



Рисунок 3.10 – Блок-схема алгоритма определения максимального перекрытия

После нахождения максимального перекрытия l изменяются параметры a, b таким образом, чтобы минимизировать функцию зазора:

$$G(a, b) \rightarrow \min . \quad (3.30)$$

Результатом выполнения названных этапов является оценка состояния системы, при которой достигается оптимальный вариант сборки по рассматриваемому значению зазора.

3.4 Методика оценки геометрических параметров сопряжений поверхностей деталей с учетом податливости деталей

Высокие требования к весовым характеристикам ГТД приводят к тому, что в их конструкции присутствуют маложёсткие детали. В процессе сборки узлов, включающих маложёсткие детали, происходят существенные деформации, оказывающие значительное влияние на сборочные параметры изделий. Таким образом, оценка сборочных параметров узлов ГТД в большинстве случаев должна выполняться с учётом жёсткости деталей и узлов. Разработка аналитических моделей для оценки сборочных параметров узлов сопряжена со значительными трудностями из-за сложного характера конструкции деталей и геометрических отклонений их поверхностей. Перспективным направлением является разработка и использование конечно-элементных моделей. В последующем подразделе приводится описание разработанной методики оценки геометрических параметров сопряжений поверхностей деталей в нежёсткой постановке, основанной на использовании метода конечных элементов.

Разработанная методика оценки геометрических параметров сопряжений поверхностей деталей в нежёсткой постановке включает в себя пять этапов. Рассмотрим подробно каждый из них.

1 этап. Анализ сборочной единицы, определение сопрягаемых поверхностей и технических требований. На данном этапе производится анализ конструкции и технологии сборки деталей или сборочных единиц. Определяются метод, условия и характеристики процесса сборки. Выявляются:

- сопрягаемые поверхности;
- заданные посадки;
- поверхности, к которым прилагаются усилия в процессе сборки;
- последовательность приложения и характер прилагаемых усилий.

2 этап. Разработка расчётной схемы и уточнение требований к формированию конечно-элементных моделей. Расчетная схема включает в себя следующие элементы:

- геометрические модели деталей и их сопрягаемые поверхности;
- параметры контактного взаимодействия между сопрягаемыми поверхностями;
- приложенные к деталям нагрузки, возникающие от болтовых соединений и прочих элементов;

- внешние усилия от других сборочных единиц;
- условия закрепления узлов и ограничения их степеней свободы.

В ходе разработки расчетной схемы необходимо:

- а) определить контактное взаимодействие между поверхностями деталей из учёта требований к описанию зазоров между их поверхностями, возникающих трений и нелинейностей;
- б) определить силовые факторы, действующие на сборочную единицу со стороны внешней среды, рабочего тела;
- в) определить вид решаемой задачи в статической или динамической постановке при создании конечно-элементных моделей;
- г) сформировать требования к сетке конечных элементов, исходя из заданной точности и производительности вычислений.
- д) уточнить требования к действительным моделям деталей и узлов;
- е) уточнить требования по автоматизации вычислений.

Геометрическая модель узла включает совокупность деталей $K = \{K_1, K_2, \dots, K_n\}$, входящих в узел. Между всеми деталями в сборке существует связь, которую можно описать множеством N . Каждый элемент множества N представляет собой внутреннюю силу, с которой каждая деталь в сборке взаимодействует с соседними деталями:

$$F_n = \begin{pmatrix} F_{12} & \dots & F_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ F_{n1} & \dots & F_{n(n-1)} \end{pmatrix}. \quad (3.31)$$

При этом $F_{ij} = F_{ji}$.

Приложение сил N_{ij} может иметь либо локальный характер, то есть сила приложена в точке, либо распределённый характер (контактное напряжение). Аналогичным образом можно представить ограничения, приложенные ко всем деталям, входящим в сборку:

$$N_\Sigma = \{N_{m1}, N_{m2}, \dots, N_{mi}\}, \quad (3.32)$$

где $N_m = N_x + N_y + N_z + N_{rotX} + N_{rotY} + N_{rotZ}$, – совокупность ограничений, наложенных на одну сборочную единицу;

N_x, N_y, N_z – ограничения перемещения тела вдоль осей X, Y, Z соответственно;

$N_{rotX}, N_{rotY}, N_{rotZ}$ – ограничения поворота тела вокруг осей X, Y, Z соответственно.

Зависимости (3.31) и (3.32) образуют граничные условия для расчёта напряжённо деформированного состояния каждой детали сборки.

Решатель (процессор) метода конечных элементов программного обеспечения должен иметь возможность автоматизации выполнения вычислений при различных начальных условиях моделирования. Препроцессор – возможность по автоматизированному импорту/экспорту 3D моделей и результатов вычислений.

3 этап. Разработка конечно-элементной модели собираемой системы.

4 этап. Выполнение расчёта при разных значениях исходных параметров. Для определения искомого смещения узлов сетки конечных элементов и расчета полей деформаций и напряжений конструкции задаётся разрешающая система алгебраических уравнений. Разрешающая система уравнений формируется из глобального уравнения жёсткости в результате учета граничных условий.

$$\{N\} = [K] \cdot \{q\} - \{Q\}, \quad (3.33)$$

где $\{N\}$ – вектор реакций в узлах элемента;

$[K]$ – глобальная матрица жёсткости;

$\{q\}$ – вектор узловых смещений;

$\{Q\}$ – вектор приложения внешних нагрузок.

Учет граничных условий позволяет из (3.33) построить разрешающую систему уравнений:

$$[H] \cdot \{q\} = \{P\}, \quad (3.34)$$

где $[H]$ – матрица жёсткости конструкции с учетом граничных условий;

$\{q\}$ – вектор узловых смещений с учетом граничных условий;

$\{P\} = \{Q\} + \{F\}$ – вектор полной узловой нагрузки;

$\{F\}$ – вектор внешних узловых сил.

5 этап. Обработка результатов. Выполнение обработки результатов расчётов производится в следующей последовательности.

5.1 Определение перечня исследуемых целевых параметров. В зависимости от поставленной задачи могут быть извлечены следующие данные расчётов, полученных на четвёртом этапе:

- 1) деформации деталей и узла;
- 2) напряжения деталей и сборочных единиц в различные моменты времени: перед сборкой, в процессе сборки, после сборки, в процессе эксплуатации с учетом напряженно-деформированного состояния, созданного при сборке;

3) перемещения тел в системе при их контактном взаимодействии с окружающей средой;

4) усилия, необходимые для выполнения сборочных работ;

5) геометрические параметры и технические требования, получаемые посредством расчёта на основании перемещения тел и их деформаций.

5.2. Разработка алгоритма расчёта заданных геометрических параметров и технических требований. Модели цифровой сборки узлов должны позволять оценивать их сборочные параметры. Государственным стандартом предусмотрен ряд показателей, нормирующих точность деталей и сборочных единиц. Такие показатели разбиваются на четыре группы, в которые входят показатели точности формы и взаимного расположения поверхностей. Показателями точности формы поверхностей являются: отклонение от круглости, цилиндричности, плоскостности. Показателями точности взаимного расположения поверхностей являются: радиальное и торцевое биения, несоосность, неперпендикулярность, непараллельность. В практике также используются следующие показатели: неравномерность зазора между поверхностями и формируемое пятно контакта. Для вычисления названных показателей необходимо задавать модель расчёта, в которой в качестве исходных параметров будут использоваться перемещения узловых точек деталей.

5.3. Расчёт и статистическая обработка исследуемых целевых параметров. На данном этапе производится статистическая обработка исследуемых целевых параметров. Вычисляются статистические параметры: моментные характеристики, эмпирические и теоретические законы распределений, функции отклонения формы вычисленных на подэтапе 5.2 параметров.

5.4. Построение регрессионных моделей, связывающих исходные и целевые параметры. Производится обобщение, создаются регрессионные зависимости, описывающие взаимосвязи между сборочными параметрами и факторами, оказывающими влияние на них.

Применение методики и моделей рассмотрено на примерах теоретико-экспериментальных исследований сопряжений деталей. Рассматривались сопряжения имитаторов деталей ГТД, а также проставки и диска турбины низкого давления, представленных в приложениях В, Г, Д и Е. Результаты теоретико-экспериментальных исследований сопряжений деталей показывают удовлетворительную сходимость. Разработанная методика и модели могут быть использованы в дальнейших исследованиях при выполнении сборочных работ узлов ГТД.

3.5 Метод оценки параметров сопряжений поверхностей деталей на основе технологий машинного обучения

Предложен метод оценки параметров сопряжений поверхностей деталей, основанный на использовании технологий машинного обучения. Разработанный метод предназначен для решения следующих задач:

- оперативной оценки геометрических параметров размерных связей в цеховых условиях при приемлемой трудоёмкости выполнения расчётов;
- формирования обобщающей оценки факторов, влияющих на точность размерных связей.

Метод включает в себя следующие этапы: выявление влияющих факторов, формирование структуры модели оценки на основе анализа поставленных задач и требований к универсальности, применимости, обобщающей способности, производительности и точности моделей, формирование обучающих и тестовых выборок, обучение моделей. Исходные данные для обучения нейронных сетей формируются с использованием моделей и методик, описанных в подразделах 3.1 – 3.3. Геометрические параметры сопряжений деталей по поверхностям могут быть описаны детализированными моделями. Укрупнённые модели могут описывать только выходные параметры размерных связей. На рисунке 3.11 приведено пояснение к предложенному методу.

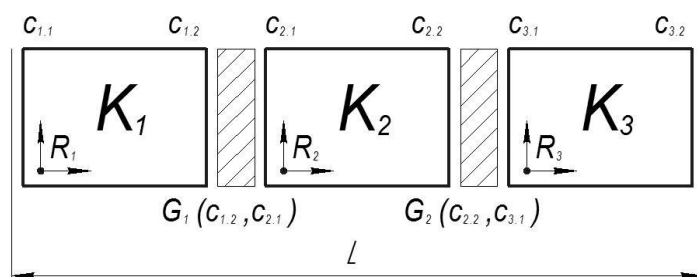


Рисунок 3.11 – Пояснение к методу оценки сопряжений деталей
с использованием машинного обучения

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 $G_2(c_{2,2}, c_{3,1})$. Формирование детализированных моделей производится последовательно, путем составления размерных связей деталей. Определяются сопряжения между поверхностями деталей и формируются соответствующие модели M_1 и M_2 , описывающие размерные связи. Интересующий размерный параметр L определяется исходя из параметров, оцениваемых моделями M_1 и

M_2 , а также поверхностей $c_{1.1}$ и $c_{3.2}$. На рисунке 3.12, а приведено пояснение формирования детализированных моделей.

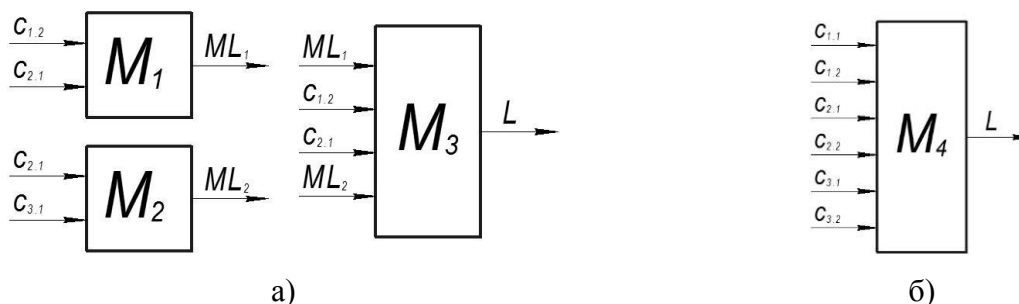


Рисунок 3.12 – Формирование детальных (а) и укрупнённых (б) моделей сопряжений деталей

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 3.12, б. Используемые нейросетевые модели могут иметь различные по типу структуры. Достаточная точность наблюдается для 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.

Комплекс разработанных методик и моделей будет использован при решении задачи повышения точности сборочных параметров узлов ГТД. Одним из направлений повышения точности сборочных параметров является пригонка комплектов деталей, формирующих узел. В последующем подразделе будет приведено описание метода повышения точности сборки узлов за счёт автоматизации операции пригонки деталей с использованием их действительных моделей.

3.6 Метод повышения точности сборки узлов за счёт автоматизации операции пригонки деталей с использованием их действительных моделей

Одним из резервов повышения точности сборки узлов ГТД является использование доводочных операций. В ряде технологических процессов сборки роторов могут быть использованы операции притирки сопрягаемых поверхностей деталей. Притирка поверхностей производится на основе результатов контроля их прилегания по краске

ручным способом. Операция притирки повышает площадь контакта поверхностей, способствует повышению точности сборочных параметров и надежности соединений. В ходе выполнения операции притирки повышается точность формы обрабатываемых поверхностей, но не исправляются погрешности их расположения. Дальнейшее повышение точности сборочных параметров узлов ГТД возможно за счёт корректировки расположения сопрягаемых поверхностей деталей в ходе выполнения доводочных операций. В основе предлагаемого метода повышения точности сборки узлов заложено использование цифрового моделирования сопряжений деталей и определение варианта коррекции поверхностей, исходя из наилучшего соответствия заданным величинам сборочных параметров. Обработка поверхностей на основе результатов моделирования может выполняться автоматизировано либо ручным способом по машинной разметке снимаемого припуска на деталях. Предлагаемый метод может быть использован для совершенствования доводочных операций в инструментальном производстве при изготовлении оснастки и других объектов, к которым предъявляются высокие требования по геометрической точности. Метод включает три этапа (рисунок 3.13).



Рисунок 3.13 – Этапы метода повышения точности сборки узлов

Назначение первого этапа заключается в предварительном расположении сопрягаемых деталей, минимизирующем зазор между деталями, и выполняемом на основе их действительных моделей. Целевая функция модели и система ограничений аналогичны виду, который используется в модели сопряжений деталей (3.20) и (3.21).

В ходе второго этапа выполняется поиск уточненного расположения деталей, при котором уменьшаются погрешности сборочных параметров узла. Целевая функция для определения рационального варианта корректировки представлена в виде:

$$K = \sum_{j=1}^N \frac{|AsP_j - [AsP_j]|}{T_{AsP_j}} \rightarrow \min, \quad (3.35)$$

где AsP_j – j -й сборочный параметр ротора;

$[AsP_j]$ – допустимое значение параметра;

T_{AsP_j} – допуск сборочного параметра ротора.

Определяемыми величинами в оптимизационной модели являются линейные и угловые корректировки к параметрам, характеризующим расположение деталей при выполнении сборки узла, которые представлены в виде вектор-строки:

$$Adj = (\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta z \quad \Delta \alpha \quad \Delta \beta \quad \Delta \gamma), \quad (3.36)$$

где $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – поступательные степени свободы по соответствующим осям x, y и z ;

$\Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma$ – вращательные степени свободы вокруг соответствующих осей x, y и z .

В качестве ограничений выступает выражение (3.21), регламентирующее допустимость пересечениями поверхностей и ограничение на величину сборочных параметров узла:

$$AsP \leq [AsP] \in R. \quad (3.37)$$

После решения задачи (3.35) формируется вектор-строка (3.36) с корректирующими значениями параметров взаимного расположения. Полученное расположение деталей уменьшает погрешности сборочных параметров узла, но при этом может возникнуть существенный зазор между деталями. Возникший зазор ликвидируется путем доработки деталей посредством съёма материала. Доработке подвергаются торцевые поверхности с использованием тонких ручных или машинных методов обработки.

Параметры доводки сопрягаемых деталей (положение и объём снимаемого материала) вычисляются на третьем этапе рассматриваемого метода. Определение припуска на каждой из сопрягаемых поверхностей выполняется путём нахождения двух параллельных секущих плоскостей Pl_{sec}^1 и Pl_{sec}^2 , минимизирующих объём снимаемого материала при соблюдении требуемого уровня контакта поверхностей (рисунок 3.14).

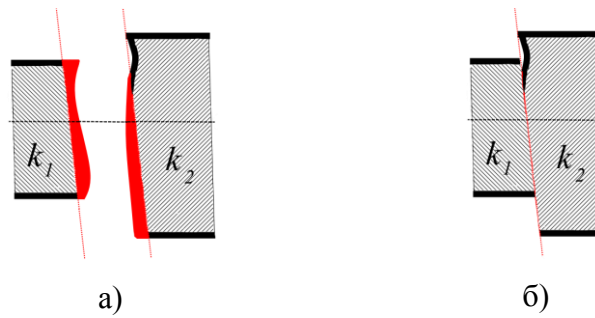


Рисунок 3.14 – Определение параметров припуска (а) и полученный результат (б) при доводке деталей

Для нахождения данных плоскостей необходимо решить следующую задачу:

$$\begin{cases}
 G^1 + G^2 \rightarrow \min, \\
 G^m = \sum_{i,j} G_{ij}^m, \\
 G_{ij}^m = \begin{cases} \|p_{ij}^m c_{ij}^m\|, & \text{если } c_{ij}^m \text{ лежит со стороны удалемого материала} \\
 0 & \end{cases}, \\
 p_0^1 = O^1 + t^1 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \\
 p_0^2 = O^2 + t^2 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}, \\
 (\vec{n}, \overrightarrow{p_0^m p_{ij}^m}) = 0,
 \end{cases} \quad (3.38)$$

где $G^m, m=1,2$ – оценка объёма удаляемого материала с детали k_m ;

p_{ij}^m – точка пересечения с прямой, проходящей через точку $(x_i, y_i, 0)$ и направляющим вектором $(0, 0, 1)$;

c_{ij}^m – точка пересечения сопрягаемой поверхности c^m с прямой, проходящей через точку p_{ij}^m и перпендикулярной Pl_{sec}^m ;

O^m – центр локальной системы координат детали k_m после выполнения второго этапа методики;

t^1, t^2, \vec{n} – параметры, задающие секущие плоскости Pl_{sec}^1 и Pl_{sec}^2 .

Равномерная сетка x_i, y_i задается ограничивающим прямоугольником пересечения проекций сопрягаемых поверхностей на плоскость XOY собранного узла. В качестве ограничения выступает условие обеспечения требуемого уровня контакта сопрягаемых поверхностей:

$$\frac{C^c}{C^o} > L, \quad (3.39)$$

где C^c – количество случаев, когда $G_{ij}^1 > 0$ и $G_{ij}^2 > 0$;

C^o – общее количество значений G_{ij}^m ;

L – требуемый уровень контакта поверхностей.

Решением данной задачи является положение секущих плоскостей Pl_{sec}^1 и Pl_{sec}^2 , при котором достигается минимальный объём снимаемого материала и обеспечивается необходимый уровень контакта сопрягаемых поверхностей.

Найденные параметры могут быть использованы при ручной или машинной обработке сопрягаемых поверхностей деталей, что позволит повысить точность сборочных параметров узлов.

3.7 Обобщённая методика цифровой коррекции формообразования заготовок с применением их действительных моделей

Обобщённая методика цифровой коррекции формообразования заготовок с применением их действительных моделей предназначена для повышения точности обработки заготовок и точности сборки узлов. Повышение точности сборки узлов возможно за счёт формирования в процессе обработки заготовок заданных отклонений формы поверхностей, способствующих компенсации геометрических погрешностей ответных деталей рассматриваемого узла. Предложенная методика учитывает первичные погрешности, возникающие от действия упругих деформаций заготовки и инструмента, а также поводки заготовок, происходящие вследствие релаксации остаточных напряжений. Блок-схема методики приведена на рисунке 3.15 (на следующей странице).

Компенсирующие отклонения формы обрабатываемых поверхностей заготовок определяются инвертированием неравномерности натягов или зазоров узла, оцененных посредством использования метода оценки точности размерных связей и действительных моделей комплекта деталей. Коррекция формообразования заготовок выполняется за счёт изменения управляющей программы оборудования с ЧПУ на основе функции, учитывающей действие всех рассматриваемых в методике факторов.

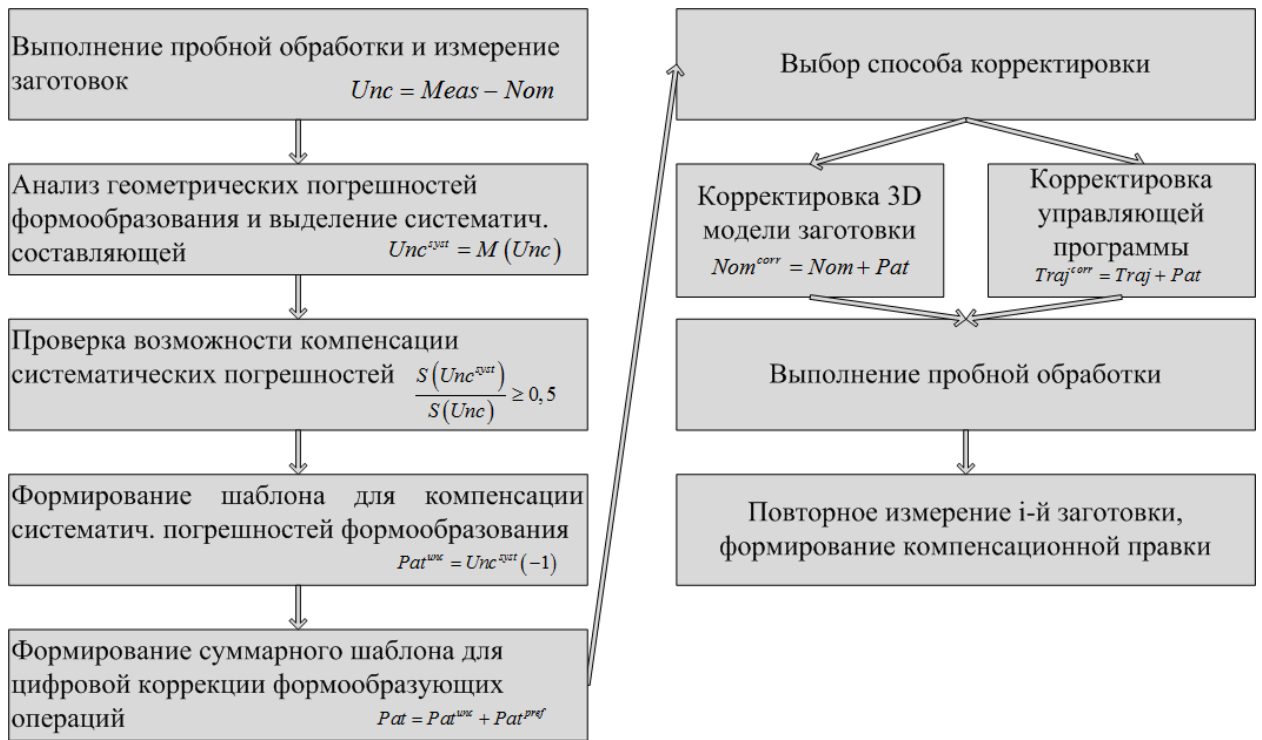


Рисунок 3.15 – Блок-схема обобщённой методики цифровой коррекции формообразования заготовок с применением их действительных моделей

Предложенная методика включает в себя совокупность следующих этапов.

На первом этапе методики предусмотрено выполнение пробной обработки и последующее измерение заготовки или заготовок. Оцениваются погрешности формообразования Unc посредством сравнения результатов измерений $Meas$ и номинальной геометрии Nom заготовок:

$$Unc = Meas - Nom. \quad (3.40)$$

В ходе второго этапа выполняется анализ геометрических погрешностей формообразования, по результатам которого выделяется систематическая составляющая погрешности Unc^{sysf} , которая может быть учтена в ходе корректировки управляющих программ:

$$Unc^{sysf} = M(Unc). \quad (3.41)$$

Систематическая составляющая определяется в виде математического ожидания измеренных погрешностей, которое может быть оценено с использованием различных статистических методов, в том числе скользящего среднего.

Третий этап содержит проверку возможности и целесообразности компенсации погрешностей. Проверка выполняется исходя из отношения среднеквадратических отклонений, взятых по массивам систематической и суммарной погрешностей:

$$\frac{S(Unc^{syst})}{S(Unc)} \geq 0,5, \quad (3.42)$$

где $S(Unc^{syst})$, $S(Unc)$ – среднеквадратические отклонения, вычисленные соответственно по массивам систематической и суммарной погрешностей.

При выполнении приведенного соотношения (3.41) целесообразно выполнение корректировки систематических составляющих погрешностей.

На четвёртом этапе производится формирование шаблона, учитывающего систематические погрешности формообразования, для выполнения цифровой коррекции управляющих программ. Под шаблоном понимается дискретно или непрерывно заданная функция, использование которой для корректировки управляющих программ позволяет повысить точность обработки заготовок и/или сборки узлов. Формирование шаблона, учитывающего систематические погрешности формообразования, можно представить выражением:

$$Pat^{unc} = Unc^{syst} (-1). \quad (3.43)$$

В ходе пятого этапа производится формирование суммарного шаблона для выполнения цифровой коррекции управляющих программ в соответствии с выражением:

$$Pat = Pat^{unc} + Pat^{pref}, \quad (3.44)$$

где Pat^{pref} – шаблон для корректировки погрешностей сборки узла, определяемый с использованием метода повышения точности сборки узлов за счёт автоматизации операции пригонки деталей.

Шестой этап включает в себя выбор способа корректировки формообразования заготовок. Возможны два варианта. Первый вариант предусматривает корректировку 3D модели заготовки или детали, используемой с целью создания управляющей программы для оборудования с ЧПУ. В результате выполнения текущего этапа формируется скорректированная 3D модель заготовки или детали:

$$Nom^{corr} = Nom + Pat. \quad (3.45)$$

Второй вариант включает непосредственную корректировку текста управляющей программы, используемой для оборудования с ЧПУ:

$$Traj^{corr} = Traj + Pat, \quad (3.46)$$

где $Traj^{corr}$ – скорректированная траектория управляющей программы;

$Traj$ – траектория управляющей программы, сформированная с использованием исходной 3D модели заготовки или детали.

В ходе седьмого этапа производится пробная обработка заготовки с использованием скорректированной управляющей программы.

Восьмой этап предполагает повторное измерение обработанной заготовки или детали и повторное выполнение этапов с первого по восьмой в случае необходимости.

Разработанная методика может быть использована совместно с предложенным методом повышения точности сборки узлов за счёт автоматизации операции пригонки деталей с использованием их действительных моделей.

Выводы по главе 3

1. Разработан метод оценки параметров сопряжений деталей и узлов при учёте контактного взаимодействия их поверхностей с использованием действительных моделей, основанный на создании и использовании действительных моделей объектов, обеспечивающий повышение точности расчётов сборочных параметров. Метод позволяет определять геометрические параметры сопряжений деталей при допущении их абсолютной жёсткости 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, что точность расчёта биений ротора в сборе при применении метода увеличилась на 25% по сравнению с методом размерных цепей.

2. На базе действительных моделей деталей и сборочных единиц разработаны модели оценки параметров сопряжений их поверхностей для выполнения технологических размерных расчётов. Комплекс моделей позволяет определять параметры сопряжений деталей в случае допущения абсолютной жёсткости контактирующих деталей и в случае необходимости учета их податливости.

3. Предложен метод оценки параметров сопряжений поверхностей деталей на основе технологий машинного обучения, отличающийся от существующих методов использованием результатов численного моделирования параметров сопряжений поверхностей деталей для формирования обучающей нейронную сеть выборки. Данный метод может быть использован для оперативной оценки геометрических параметров размерных связей в цеховых условиях при приемлемой трудоёмкости выполнения расчётов. Метод предусматривает формирование обобщающей и экстраполирующей возможности при оценке влияния факторов на точность размерных связей узлов.

4. Предложен метод повышения точности сборки узлов за счёт расчёта параметров операции пригонки деталей с использованием их действительных моделей. Повышение точности сборки узлов достигается расчётом оптимального взаимного расположения деталей и микрообъемов удаляемого металла при пригонке поверхностей. Применение метода на операциях доводки при сборке узлов ГТД позволяет обеспечивать требуемую площадь контакта поверхностей.

5. Разработана обобщённая методика цифровой коррекции формообразования заготовок с применением их действительных моделей. Предложенная методика учитывает первичные погрешности, возникающие от действия упругих деформаций заготовки и инструмента, а также поводки заготовок, происходящие вследствие релаксации остаточных напряжений. Для повышения точности сборки узлов в предложенной методике предусмотрено формирование геометрии поверхностей, которая компенсировала бы погрешности ответных деталей узла. Коррекция формообразования заготовок выполняется за счёт изменения управляющей программы оборудования с ЧПУ. Обобщённая методика цифровой коррекции формообразования заготовок может быть использована совместно с предложенным методом повышения точности сборки узлов за счёт автоматизации операции пригонки деталей с использованием их действительных моделей.

ГЛАВА 4 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ВИБРАЦИЙ РОТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ

В главе описываются метод, модель и алгоритм снижения неуравновешенностей роторов в условиях цифрового производства на основе использования действительных моделей. Снижение неуравновешенностей роторов ГТД достигается с помощью метода балансировки на цифровой модели. Идея балансировки ротора с использованием цифровой модели состоит в выборе относительных взаимных угловых положений деталей, при которых обеспечивается противонаправленность возмущающего воздействия от их неуравновешенностей и определения величин корректировочных масс. Суммарная неуравновешенность ротора анализируется по значениям виброскоростей на опорах двигателя, рассчитанных на его цифровой модели. Реализация метода предусматривает два этапа. На первом этапе производится поиск начального приближения углового положения деталей и сборочных единиц с использованием аналитической модели балансировки, рассматривающей ротор как абсолютно жёсткое тело без учёта действительной геометрии его деталей и контактных взаимодействий, возникающих при сопряжении деталей в узле. На втором этапе выполняется уточнение углового положения деталей и сборочных единиц с использованием конечно-элементного моделирования с учетом их действительной геометрии и рассчитываемых деформаций деталей ротора при сборке. Для реализации предложенного метода разработаны специализированные модель, методики и алгоритмы.

Верификация разработанных модели и алгоритма снижения неуравновешенностей ротора, выполнялась с использованием имитатора ротора турбины низкого давления, являющейся его уменьшенной массогабаритной копией. Исследования выполнялись с применением разработанного разгонно-балансирующего стенда, позволяющего измерять виброскорость опор ротора и его перемещения в отдельных точках.

Выполнены исследования по оценке дисбалансов ротора турбины низкого давления ГТД в статической постановке. Проанализированы уровни вибраций рассматриваемого ротора в зависимости от погрешностей балансировки и угловых положений составных деталей. Для оперативного прогнозирования параметров вибрационного состояния ротора в цеховых условиях разработана регрессионная модель с использованием технологий машинного обучения.

Подготовлено заключение о возможности использования разработанных метода и моделей для определения параметров сборки роторов в условиях цифрового производства.

4.1 Разработка метода снижения неуравновешенностей роторов ГТД с помощью цифровой балансировки

Вибрации роторов ГТД обусловлены конструктивными, технологическими и эксплуатационными дисбалансами сборочных единиц. Технологические неуравновешенности роторов ГТД возникают вследствие погрешностей сборки и неуравновешенностей деталей. Многие из роторов существующих и перспективных ГТД являются квазигибкими или гибкими. Количество плоскостей коррекций, предусмотренных в конструкции ряда гибких роторов ГТД и используемых для окончательной балансировки, является недостаточным для их уравновешения по всем изгибным формам. Сборка роторов с учётом возмущающего воздействия деталей и присутствующих в них неуравновешенностей позволит снизить уровень вибраций на опорах двигателя.

Идея балансировки ротора с использованием цифровой модели в предложенном методе состоит в выборе относительных взаимных угловых положений деталей, при которых обеспечивается противоположность влияния возмущающего воздействия от их неуравновешенностей и определения величин корректировочных масс. Поясним предлагаемый подход на схеме, представленной на рисунке 4.1.

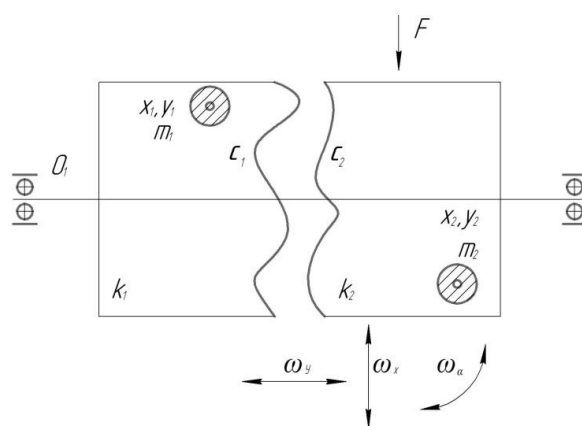


Рисунок 4.1 – Схема предлагаемого подхода

Для расчета дисбаланса пары деталей k_1 , k_2 необходимо и достаточно иметь контактные поверхности c_1 , c_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 ω_x , ω_y , ω_α 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. Измерение поверхностей выполняется

в ряде точек. В ходе измерения дисбалансов определяются величины и угловые расположения сосредоточенных масс относительно поверхностей деталей и оси вращения O_1 . На основе измерений точек поверхностей формируются триангуляционные модели основных поверхностей деталей. Выполняется расчёт векторов силовых и моментных нагрузок, возникающих при контактном взаимодействии поверхностей деталей и возможные перемещения координат их центров масс. Полученные данные используются для построения упрощенной модели с номинальными поверхностями деталей без отклонений, но содержащей величины и угловые расположения сосредоточенных масс с учетом отклонений от номинальных величин геометрии. Упрощенная модель может использоваться для определения суммарной величины дисбаланса узла, пространственного распределения его главной центральной оси инерции или уровня вибраций на опорах.

Детали роторов могут иметь статическую и моментную неуравновешенности, приводимые к главным вектору сил и моменту, действующему на ротор, которые для решения задачи балансировки рассчитываются в его цифровой модели. Поскольку многие из роторов существующих и перспективных авиадвигателей являются квазигибкими и гибкими, то цифровая модель также должна учитывать возможные деформации его ДСЕ, возникающие в процессе работы.

В качестве критериев цифровой балансировки предлагается использовать уровни виброскоростей на опорах ротора:

$$\min \{St_1, St_2, \dots, St_l\}, \quad (4.1)$$

где St_l – величина виброскоростей для опоры ротора l .

В частном случае можно применить метод линейной свёртки критериев, что позволяет перейти к использованию коэффициента K_r , определяемого суммой уровней виброскоростей опор двигателя (4.2), стремящейся к минимуму:

$$K_r = \sum_{l=1}^k v_l St_l, \quad (4.2)$$

где v_l – весовой коэффициент учета влияния дисбаланса для опоры ротора l ;

k – количество опор.

Регулирующими параметрами для выполнения балансировки являются относительные угловые положения деталей, определяемые множеством:

$$PP = \{\alpha p_1, \alpha p_2, \alpha p_3, \dots, \alpha p_l\}, \quad (4.3)$$

где αp_i – относительное угловое положение i -й детали.

Для параметров αp_i задаются их допустимые значения, исходя из конструктивных особенностей, включающих число равномерно расположенных крепёжных отверстий. Таким образом, формируется множество возможных состояний собираемого ротора:

$$\begin{aligned} S &= \{s : \alpha p_i \in V_{\alpha p_i}\}, \\ V_{\alpha p_i} &= \{\alpha p_i^1, \alpha p_i^2, \dots, \alpha p_i^j\}, \end{aligned} \quad (4.4)$$

где $V_{\alpha p_i}$ – множество дискретных допустимых относительных угловых положений деталей ротора;

αp_i^j – j -е относительное угловое положение i -й детали.

Предложенный метод снижения уровня вибраций роторов ГТД можно представить в следующей математической форме:

$$\{\alpha p_i^{opt}\}_{S, V_{\alpha p_i}} = \arg \min \{K_r^j\}, \quad (4.5)$$

где каждому j -у угловому положению детали i соответствуют значения целевой функции балансировки K_r^j , рассчитываемые по зависимости (4.1).

Реализация метода (4.5) включает два укрупнённых этапа. На первом этапе производится предварительный поиск начального приближения для определения углов αp_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 αp_i^{opt} с использованием конечно-элементной модели, учитывающей деформации ротора. Реализация метода (4.5) требует разработки специализированных методик и алгоритмов, которые рассматриваются в последующих подразделах. Разработка цифровой модели ротора ГТД требует создания параметрической модели, которая должна учитывать погрешности его сборки и неуравновешенности деталей. В следующем подразделе описывается принципиальная схема параметрической модели ротора ГТД.

4.2 Описание принципиальной схемы структурно-параметрической модели ротора

Общий вид принципиальной схемы структурно-параметрической модели ротора ГТД приведен на рисунке 4.2.

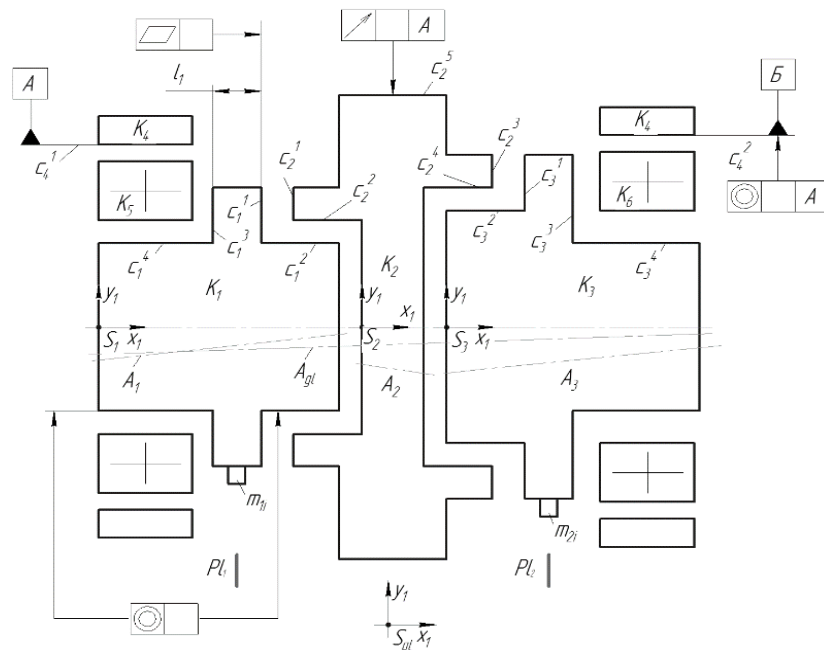


Рисунок 4.2 – Структурно-параметрическая модель ротора

В состав структурно-параметрической модели ротора входит множество деталей K . Приведенный на рисунке 4.2 пример содержит шесть деталей: общий статор k_4 , подшипники k_5 и k_6 , вал передний k_1 , диск k_2 и вал задний k_3 , которые сопрягаются по контактным поверхностям.

Каждая из деталей i имеет собственную систему координат S_i , а также совокупность поверхностей, обозначаемых c_i^j , где i – номер детали, j – порядковый номер поверхности. Взаимное расположение деталей определяется по отношению к глобальной системе координат S_{gl} . Направление и положение осей вращения деталей совпадает соответственно с направлением координатной оси x_i и координатой центра O_i систем координат S_i . Относительно систем координат S_i деталей определенным образом располагаются поверхности c_i^j . Относительно систем координат детали S_i и соответственно их осей вращения располагаются главные оси инерции A_i .

Сопряжение деталей ротора между собой осуществляется следующим образом:

- вал передний k_1 сопрягается со статором k_4 по поверхностям c_1^3 и c_1^4 , а с диском k_2 по поверхностям c_1^1 и c_1^2 ;
- диск k_2 сопрягается с валом k_1 по поверхностям c_2^1 и c_2^2 , образуются пары сопрягаемых поверхностей $c_1^1 - c_2^1$ и $c_1^2 - c_2^2$;
- сопряжение диска k_2 и вала заднего k_3 осуществляется по парам поверхностей $c_2^3 - c_3^1$ и $c_2^4 - c_3^2$;

– вал задний k_3 сопрягается со статором по поверхностям c_3^3 и c_3^4 .

Каждая из рассматриваемых деталей может быть охарактеризована параметрами точности, которые определяют величину отклонений формы поверхностей, размеров между ними и взаимного расположения. На рисунке 4.2 приведен пример требования по максимальному отклонению от плоскостности поверхности c_1^1 , размер l_1 между поверхностями c_1^1 и c_1^3 , радиальное биение между поверхностями c_1^2 и c_1^4 детали k_1 . Для детали статор k_4 приведено требование по взаимному радиальному биению поверхностей c_4^1 и c_4^2 . Требования по точности определяются конструкторской документацией на каждую из деталей. Геометрическая точность ротора в собранном состоянии может быть охарактеризована совокупностью сборочных параметров. На рисунке 4.2 точность расположения диска k_3 относительно статора k_4 и вала k_1 в радиальном направлении может быть охарактеризована величиной радиального биения к поверхности c_2^5 , которое задано относительно базы A , задаваемой поверхностью c_4^1 . Сборочные параметры и требования к ним приведены в конструкторской документации на данный ротор.

Каждое возможное сопряжение деталей по поверхностям образует вариант сборки, которая имеет единую главную ось инерции всего ротора A_{gl} . Положение этой оси определяется относительно базовых поверхностей деталей ротора. В качестве базовых поверхностей целесообразно использовать поверхности c_4^1 и c_4^2 статора k_4 , обозначенные на рисунке 4.2 как базы A и B . Решение задачи балансировки сводится к совмещению главной оси инерции A_{gl} ротора и его оси вращения. В свою очередь ось вращения ротора определяется по его геометрической оси, задаваемой базами A и B на опорах газотурбинного двигателя.

В операции балансировки на цифровой модели предусмотрена установка корректирующих масс в нескольких плоскостях коррекции. Пример на рисунке 4.2 содержит две плоскости коррекции P_{11} и P_{12} для установки соответствующих корректирующих масс m_{1i} и m_{2i} .

Контактное взаимодействие сопряженных поверхностей деталей будет приводить к отклонениям их взаимного расположения. В общем виде относительное расположение деталей можно определить шестью геометрическими параметрами. Три параметра определяют поступательные степени свободы по осям x , y и z . Остальные три параметра – углы поворота вокруг соответствующих осей x , y и z . Параметрическая модель ротора содержит величины отклонений взаимного расположения деталей по указанным шести координатам.

Следует отметить, что дисбаланс и моментную неуравновешенность отдельных ДСЕ ротора можно получить на балансировочном стенде либо, как это описывается ниже, путем расчета массово-инерционных характеристик измеренных деталей.

Для реализации метода виртуальной балансировки комплект деталей ротора K разбивается на конечные элементы (КЭ). Твёрдотельные 3D модели включают поверхности, имеющие действительные размеры и форму, которые определяют неравномерность распределения масс по объёму. Для определения моментов инерции детали необходимо суммирование моментов инерции объёмов, составляющих твёрдое тело детали КЭ. Для этой цели использовалось представление геометрии деталей в формате *.stl, включающего в себя следующие параметры:

- 1) $V_{g \times 3}$ – матрица координат вершин сетки *stl*-модели;
- 2) $F_{m \times 3}$ – матрица сочетаний вершин по три, образующих фасеты поверхности;
- 3) $N_{m \times 3}$ – матрица координат нормалей фасет.

Геометрия детали в формате *.stl описывается набором связанных фасет, которые аппроксимируют их поверхности с заданной точностью. Каждая три точки поверхности определяют 1 фасету, которая является частью плоскости, проходящей через эти точки и ограниченной соединяющими эти точки отрезками. Одним из вариантов определения КЭ в виде усеченных призм является построение проекций фасет на координатную плоскость XOY , как показано на рисунке 4.3.

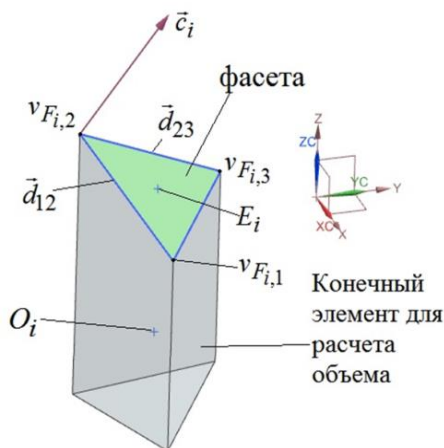


Рисунок 4.3 – Конечный элемент 3D модели при использовании файла формата *.stl

Дополнительно возможно включение в модель присоединенных масс в указанных координатах. Представление деталей в виде КЭ моделей может выполняться с использованием CAD и CAE систем.

Параметрическая модель ротора используется для учёта особенностей его технологий сборки и балансировки, заключающихся в определённой последовательности, параметрах точности и условиях выполнения операций. Последовательность сборки и балансировки можно закодировать в виде матрицы. Строки матрицы будут представлять номер выполняемой операции, а столбцы – номер поверхностей детали или деталей, которые используются для удаления материала или добавления корректирующих масс при уравнивании дисбаланса. В ходе выполнения технологических операций балансировки деталей или сборочных единиц возникает остаточный дисбаланс, который оказывает существенное влияние на дисбаланс ротора. Остаточный дисбаланс детали проявляется в смещении её главной центральной оси инерции относительно оси вращения. Учёт остаточного дисбаланса в 3D модели детали можно выполнить посредством неравномерного распределения масс по конечным элементам 3D модели либо добавлением или удалением заранее известной корректирующей массы. Наиболее простым способом учёта дисбаланса детали является добавление или удаление корректирующей массы в определённом месте.

На первом этапе балансировки выполняется уравнивание отдельных деталей роторов. На втором этапе выполняется уравнивание ротора в собранном состоянии. На втором этапе компенсируется остаточный дисбаланс и геометрические отклонения деталей и ротора в сборе. Корректный учёт формируемых неуравновешенностей требует моделирования процесса балансировки ротора. Величина, форма и направление геометрических отклонений поверхностей деталей могут закладываться на основе результатов статистических наблюдений, полученных посредством измерений либо на основе априорных предположений. При разработке твердотельных 3D моделей деталей ротора его конфигурация может быть упрощена для учёта только значимых геометрических особенностей.

4.3 Модель предварительного уравнивания абсолютно-жестких роторов

Для того, чтобы жесткий или гибкий ротор на данной частоте вращения находился в состоянии динамического равновесия, необходимо выполнение двух условий.

1. Равенство нулю главного вектора неуравновешенных сил.
2. Равенство нулю главного момента неуравновешенных сил.

В зависимости от взаимного расположения оси вращения ротора и его главной оси инерции различают три вида неуравновешенности: 1) статическая; 2) моментная; 3) динамическая.

Статическая неуравновешенность полностью определяется главным вектором дисбалансов \vec{D}_Σ . При моментной неуравновешенности ось ротора и его главная центральная ось инерции пересекается в центре масс.

Моментная неуравновешенность представлена только главным моментом дисбалансов ротора. При динамической неуравновешенности ось ротора и его главная центральная ось инерции пересекаются не в центре масс ротора или перекрещиваются.

Динамическая неуравновешенность определяется главным вектором и моментом дисбалансов ротора.

Покажем, что главный вектор и момент дисбалансов ротора, состоящего из N тел, вращающихся вокруг оси, проходящей через неподвижные подшипники, будут равны 0, если его ось вращения совпадает с одной из главных осей инерции. Найдем выражения для главного вектора и момента дисбалансов ротора относительно точки его приложения на оси вращения. По теории о движении центра масс центробежная сила, приложенная к элементарной массе i -й ДСЕ, определяется формулой:

$$d\vec{F}_i = \omega^2 dm_i (\vec{r}_\perp)_i, \quad (4.6)$$

где ω – угловая частота вращения ротора;

$(\vec{r}_\perp)_i$ – радиус-вектор расположения (смещения) i -й элементарной массы dm_i относительно оси вращения ротора.

Элементарный момент от действия силы $d\vec{F}$ найдется по зависимости:

$$d\vec{M}_i = [(\vec{r}_\parallel)_i \cdot d\vec{F}_i] = \omega^2 [(\vec{r}_\parallel)_i \cdot (\vec{r}_\perp)_i] \rho_i dV, \quad (4.7)$$

где $\vec{r}_i = (\vec{r}_\perp)_i + (\vec{r}_\parallel)_i$ – разложение радиус-вектора материальной точки на векторы, перпендикулярные $(\vec{r}_\perp)_i = \vec{e}_i$ – эксцентриситет) и параллельные $(\vec{r}_\parallel)_i$ оси вращения.

Расположение масс и радиус-векторов поясняется рисунком 4.4.

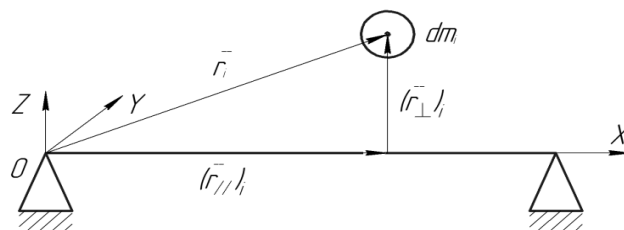


Рисунок 4.4 – Расположение масс и радиус-векторов

Тогда суммарный момент сил, действующих в точке приложения главного вектора

$\vec{F} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i$, определится как сумма N интегралов по элементарным объёмам всех ДСЕ:

$$\vec{M} = \omega^2 \sum_{i=1}^N \int_{V_i} [(\vec{r}_{\parallel})_i \cdot (\vec{r}_{\perp})_i] \rho_i dV. \quad (4.8)$$

Пусть глобальная система координат выбрана таким образом, что направление оси X совпадает с осью вращения. В этом случае:

$$\begin{aligned} (\vec{r}_{\parallel})_i &= \vec{i}x_i, \\ (\vec{r}_{\perp})_i &= \vec{j}y_i + \vec{k}z_i = \vec{e}_i. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Выражение $[(\vec{r}_{\parallel})_i \cdot (\vec{r}_{\perp})_i]$ может быть записано с помощью определителя в виде:

$$[(\vec{r}_{\parallel})_i \times (\vec{r}_{\perp})_i] = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x_i & 0 & 0 \\ 0 & y_i & z_i \end{vmatrix} = 0\vec{i} - x_i z_i \vec{j} + x_i y_i \vec{k}. \quad (4.10)$$

После подстановки значений векторов в формулу для момента дисбалансов и преобразований получим:

$$\vec{M} = \vec{k} \omega^2 \sum_{i=1}^N \int_{V_i} x_i y_i \rho_i dV - \vec{j} \omega^2 \sum_{i=1}^N \int_{V_i} x_i z_i \rho_i dV. \quad (4.11)$$

Полагая равномерное распределение плотности ρ_i по объёму V_i каждой из ДСЕ, получим в итоге:

$$\vec{M} = \vec{k} \omega^2 \sum_{i=1}^N \rho_i (J_{xy})_i - \vec{j} \omega^2 \sum_{i=1}^N \rho_i (J_{xz})_i, \quad (4.12)$$

где центробежные моменты инерции каждой i -й ДСЕ определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} \rho_i (J_{xy})_i &= \rho_i \int_{V_i} x_i y_i dV, \\ \rho_i (J_{xz})_i &= \rho_i \int_{V_i} x_i z_i dV. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Зависимость (4.13) учитывает тот факт, что некоторые детали ротора могут изменять свою геометрию (т.е. изменяются границы объёма V_i) при сборке, если не являются абсолютно жёсткими. Таким образом, чтобы вращающийся ротор не испытывал действия от момента дисбалансов ротора, то согласно (4.11) необходимо, чтобы выполнялось условие (4.14).

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N \rho_i (J_{xz})_i = 0 \\ \sum_{i=1}^N \rho_i (J_{xy})_i = 0 \end{cases}. \quad (4.14)$$

Зависимость (4.14) определяет направление главной оси инерции ротора, которая в общем случае параллельна его оси вращения, т.е. статическая неуравновешенность может

быть не устранена. Поэтому для выполнения условия совпадения главной оси инерции ротора с его осью вращения необходимо кроме условия (4.14) обеспечить равенство нулю вектора его дисбалансов (4.15):

$$\vec{D}_\Sigma = \sum_{i=1}^N \vec{D}_i = 0. \quad (4.15)$$

Дисбаланс жёсткого ротора ГТД как узла, состоящего из нескольких $i = 1 \dots N$, ДСЕ может быть уменьшен путем оптимизации углового положения φ_i каждой i -й ДСЕ относительно оси вращения ротора. В этом случае действия возбуждающих сил, вызванные дисбалансами деталей ротора, могут компенсироваться. Рассмотрим условия приближения положения главной оси инерции ротора к положению его оси вращения за счет изменения углов ориентации каждой его ДСЕ относительно указанной оси вращения.

С этой целью для каждой i -й ДСЕ определим связанную с ней локальную систему координат O'_i , ось \overline{OX}'_i которой совпадает с осью \overline{OX} глобальной системы координат O как показано на рисунке 4.5.

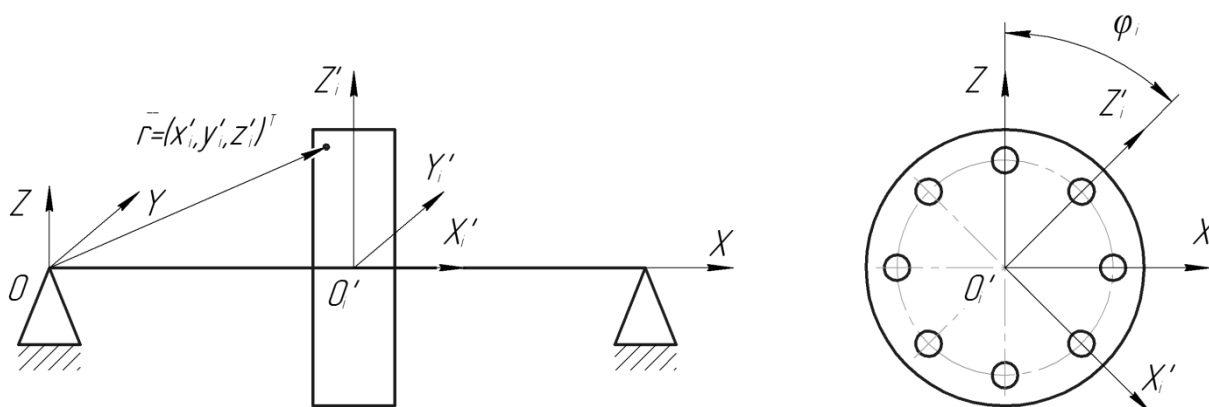


Рисунок 4.5 – Принятые системы координат в роторе

Пусть радиус-вектор материальной точки i -й ДСЕ $\vec{r} = (x_i, y_i, z_i)^T$, заданный в глобальной системе координат, описывается в локальной системе координат O'_i следующим видом: $\vec{r} = (x'_i, y'_i, z'_i)^T$. Каждая локальная система координат O'_i может быть развернута вместе с i -й ДСЕ на любой угол φ_i относительно глобальной системы O . Условимся, что множество из N таких углов разворота $\{\varphi_i\}$, $i = 1 \dots N$ каждой ДСЕ обеспечивает приближенное выполнение зависимостей (4.14) и (4.15). В этом случае имеет место система уравнений (4.16).

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^N \rho_i (J_{xz})_i \rightarrow 0 \\ \sum_{i=1}^N \rho_i (J_{xy})_i \rightarrow 0 \\ \sum_{i=1}^N \vec{D}_i \rightarrow 0 \end{array} \right. . \quad (4.16)$$

В (4.16) и далее выражение « $\rightarrow 0$ » вместо «равно 0» означает, что при назначении углов $\{\varphi_i\}$, $i=1\dots N$ может остаться остаточная неуравновешенность ротора, которая устраняется последующей балансировкой.

Последнее уравнение в системе уравнений (4.16) (стремление к нулю результирующего вектора всех дисбалансов) выполняется, если центр массы ротора лежит на оси вращения, т.е. выполняется условие (4.17):

$$\left\{ \begin{array}{l} D_y = m_\Sigma y_c = \sum_{i=1}^N \int_{V_i} y_i \rho_i dV \rightarrow 0, \\ D_z = m_\Sigma z_c = \sum_{i=1}^N \int_{V_i} z_i \rho_i dV \rightarrow 0, \end{array} \right. \quad (4.17)$$

где x_c, y_c, z_c – координаты центра масс в глобальной системе координат;

$m_\Sigma = \sum_{i=1}^N \int_{V_i} \rho_i dV$ – масса ротора.

Далее запишем условия (4.16) и (4.17) через координаты, определенные в N локальных системах координат. Для i -й ДСЕ и связанной с ней локальной системы координат O_i' выполняется преобразование координат (4.18):

$$(x_i, y_i, z_i)^T = M^{-1} \cdot (x'_i, y'_i, z'_i)^T, \quad (4.18)$$

где $M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_i & -\sin \varphi_i \\ 0 & \sin \varphi_i & \cos \varphi_i \end{pmatrix}$ – матрица преобразования.

В этом случае моменты инерции i -й ДСЕ ротора определяются через координаты локальной системы координат следующим образом:

$$\begin{aligned} \rho_i (J_{xy})_i &= \rho_i \int_{V_i} x'_i (y'_i \cos \varphi_i + z'_i \sin \varphi_i) dV = \rho_i (\cos \varphi_i \int_{V_i} x'_i y'_i dV + \sin \varphi_i \int_{V_i} x'_i z'_i dV) = \\ &= \rho_i (\cos \varphi_i (J'_{xy})_i + \sin \varphi_i (J'_{xz})_i), \\ \rho_i (J_{xz})_i &= \rho_i (-\sin \varphi_i (J'_{xy})_i + \cos \varphi_i (J'_{xz})_i). \end{aligned} \quad (4.19)$$

Тогда условие приближения положения главной оси инерции ротора к положению его оси вращения за счет изменения углов ориентации $\{\varphi_i\}$, $i=1\dots N$ ДСЕ ротора, записанное в форме (4.16) с учетом (4.17), принимает форму зависимости (4.20):

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{xy} = \sum_{i=1}^N \rho_i \left(\cos \varphi_i (J'_{xy})_i + \sin \varphi_i (J'_{xz})_i \right) \rightarrow 0 \\ J_{xz} = \sum_{i=1}^N \rho_i \left(\cos \varphi_i (J'_{xz})_i - \sin \varphi_i (J'_{xy})_i \right) \rightarrow 0 \\ D_y = \sum_{i=1}^N \left(\cos \varphi_i \int_{V_i} y'_i \rho_i dV + \sin \varphi_i \int_{V_i} z'_i \rho_i dV \right) \rightarrow 0 \\ D_z = \sum_{i=1}^N \left(\cos \varphi_i \int_{V_i} z'_i \rho_i dV - \sin \varphi_i \int_{V_i} y'_i \rho_i dV \right) \rightarrow 0 \end{array} \right. , \quad (4.20)$$

где $(D'_y)_i = \int_{V_i} y'_i \rho_i dV$, $(D'_z)_i = \int_{V_i} z'_i \rho_i dV$ – дисбалансы i -й ДСЕ в локальной системе координат детали.

Таким образом, если нам известны моменты инерции $(J'_{xy})_i$, $(J'_{xz})_i$ и дисбалансы $(D'_y)_i$, $(D'_z)_i$ для каждой i -й ДСЕ ротора, рассчитанные в ее локальной системе координат O'_i , то для того, чтобы ось вращения вала максимально совпадала с его главной осью инерции, достаточно найти такие углы φ_i , $i=1\dots N$, чтобы выполнялось условие (4.20).

Пусть координаты центра массы i -й ДСЕ определяются зависимостью (4.21).

$$(x_c)_i' = \frac{1}{m_i} \int_{V_i} \rho_i x'_i dV, \quad (y_c)_i' = \frac{1}{m_i} \int_{V_i} \rho_i y'_i dV, \quad (z_c)_i' = \frac{1}{m_i} \int_{V_i} \rho_i z'_i dV. \quad (4.21)$$

Тогда условие (4.19) запишется как:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{xy} = \sum_{i=1}^N m_i \cdot (x_c)_i' \cdot \left((y_c)_i' \cos \varphi_i + (z_c)_i' \sin \varphi_i \right) \rightarrow 0 \\ J_{xz} = \sum_{i=1}^N m_i \cdot (x_c)_i' \cdot \left((z_c)_i' \cos \varphi_i - (y_c)_i' \sin \varphi_i \right) \rightarrow 0 \\ D_y = \sum_{i=1}^N m_i \cdot \left((y_c)_i' \cos \varphi_i + (z_c)_i' \sin \varphi_i \right) \rightarrow 0 \\ D_z = \sum_{i=1}^N m_i \cdot \left((z_c)_i' \cos \varphi_i - (y_c)_i' \sin \varphi_i \right) \rightarrow 0 \end{array} \right. . \quad (4.22)$$

Решение системы (4.20) или (4.22) подразумевает произвольные значения углов поворота φ_i ДСЕ ротора. Однако на практике углы φ_i могут принимать только определенные дискретные значения, определяемые количеством монтажных отверстий

каждой i -й ДСЕ. Эти значения должны быть кратны угловому шагу расположения отверстий, т.е. должно выполняться условие, что угол φ_i пропорционален величине

$$\frac{2\pi}{k_i}, \quad (4.23)$$

где k_i – количество отверстий в i -й ДСЕ.

Таким образом, решение системы (4.22) должно удовлетворять ограничениям

$$\{\varphi_i\} = \left\{ \frac{2\pi}{k_i} n_i \mid \forall n_i : n_i = 1 \vee 2 \vee 3 \dots \vee k_i, i = 1 \dots N \right\}. \quad (4.24)$$

Строгое выполнение условия (4.24) означает, что (4.22) может выполняться с определенной погрешностью, в результате чего появляется остаточная неуравновешенность. В этом случае справедливо решение задачи оптимизации в следующей постановке:

$$\left\{ \begin{array}{l} \arg \min_{\varphi_i} (J_{xy}) \in \left\{ \varphi_i = \frac{2\pi}{k_i} n_i \mid \forall n_i : n_i = 1 \vee 2 \vee 3 \dots \vee k_i, i = 1 \dots N \right\} \\ \arg \min_{\varphi_i} (J_{xz}) \in \left\{ \varphi_i = \frac{2\pi}{k_i} n_i \mid \forall n_i : n_i = 1 \vee 2 \vee 3 \dots \vee k_i, i = 1 \dots N \right\} \\ \arg \min_{\varphi_i} (D_y) \in \left\{ \varphi_i = \frac{2\pi}{k_i} n_i \mid \forall n_i : n_i = 1 \vee 2 \vee 3 \dots \vee k_i, i = 1 \dots N \right\} \\ \arg \min_{\varphi_i} (D_z) \in \left\{ \varphi_i = \frac{2\pi}{k_i} n_i \mid \forall n_i : n_i = 1 \vee 2 \vee 3 \dots \vee k_i, i = 1 \dots N \right\} \end{array} \right. . \quad (4.25)$$

Задачу (4.25) можно решить по следующему алгоритму.

1. При нулевом значении $\{\varphi_i\}^0 = 0$ решаем систему (4.22) и получаем значения углов поворота $\{\varphi_i\}^1$. Среди полученных значений углов находим угол φ_l , который наиболее точно удовлетворяет ограничениям (4.24). Формируем новый вектор приближений с

заменой $\varphi_l = \frac{2\pi}{k_l} n_l$:

$$\{\varphi_i\}^1 = \left\{ \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{l-1}, \frac{2\pi}{k_l} n_l, \varphi_{l+1}, \dots, \varphi_N \right\}^1. \quad (4.26)$$

2. При приближении $\{\varphi_i\}^1$ (4.26) решаем систему (4.22) и получаем новые значения углов поворота $\{\varphi_i\}^2$. Производим аналогичную замену для следующего угла φ_m , наилучшим образом удовлетворяющего ограничениям (4.24).

$$\{\varphi_i\}^2 = \left\{ \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{l-1}, \frac{2\pi}{k_l} n_l, \varphi_{l+1}, \dots, \varphi_{m-1}, \frac{2\pi}{k_m} n_m, \varphi_{m+1}, \dots, \varphi_N \right\}^2. \quad (4.27)$$

3. Продолжаем выполнять п. 2 в цикле $N-1$ раз до получения решения $\{\varphi_i\}^N$.

Очевидно, что чем меньше возможный угол поворота каждой ДСЕ, т.е. чем меньше каждый n_i в (4.24), тем точнее будет выполняться (4.22) или (4.25).

На следующем этапе выполняется компенсация возмущающего действия на вал ротора от остаточной неуравновешенности методом балансировки.

Методами динамической балансировки осуществляется устранение динамической неуравновешенности ротора, при которой одновременно уменьшаются неуравновешенности, определяемые главным вектором и моментом дисбалансов ротора. Динамическая балансировка на практике реализуется как процесс проверки наличия дисбалансов, т.е. определения распределения масс ДСЕ вращающегося ротора, и направленное изменение этого распределения с помощью корректирующих масс до достижения допустимого значения дисбаланса.

В зависимости от типа ротора – жёсткого или гибкого – производится выбор метода динамической балансировки. Если ротор при вращении не изгибается и ведет себя как абсолютно твердое тело, совершая лишь перемещения, обусловленные только колебаниями подшипникового узла, то такой ротор относится к жёсткому типу. На самом же деле, в любом реально существующем роторе всегда присутствуют динамические изгибные деформации, обусловленные распределением дисбалансов по длине ротора. Но если эти деформации пренебрежимо малы по сравнению с перемещениями, характерными для жёстких роторов, и находятся в пределах допусков на всех частотах вращения ротора, то такой ротор рассматривается как жёсткий. В противном случае, ротор проявляет свойства гибкого ротора и требует изменения в выборе метода балансировки.

Балансировка жёстких роторов проводится методами, регламентированными ГОСТ ИСО 1940-1, а гибких роторов – ГОСТ 31320. Выбор того или иного метода определяется конфигурацией ротора и его частотой вращения. Согласно ГОСТ ИСО 11342-95 «независимо от используемой методики балансировки целью ее является получение сведений о дисбалансе и его распределении по длине ротора и уменьшение его влияния в диапазоне частот вращения до допустимого уровня».

Как было отмечено ранее, на втором этапе остаточная неуравновешенность после оптимизации угловых положений его ДСЕ устраняется методом динамической балансировки за счет размещения грузов массой m_1 и m_2 в двух плоскостях коррекции 1 и 2, расположенных в координатах $x = x_1$ и $x = x_2$ соответственно, как показано на рисунке 4.6.

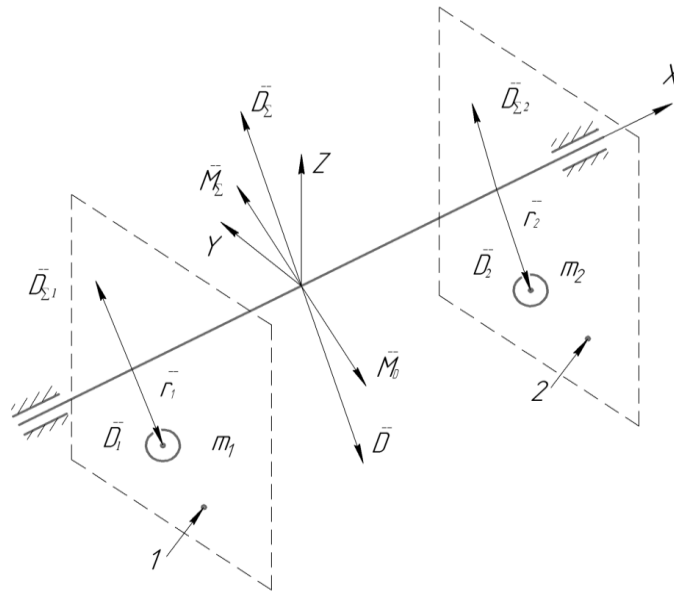


Рисунок 4.6 – Схема расположения корректировочных масс ($\bar{D}_\Sigma = \bar{D}_{\Sigma 1} + \bar{D}_{\Sigma 2}$)

Остаточная неуравновешенность ротора представлена на рисунке 4.6 суммарным дисбалансом $\bar{D}_\Sigma = \bar{D}_{\Sigma 1} + \bar{D}_{\Sigma 2}$ и суммарным моментом \bar{M}_Σ . Корректировочные грузы массой m_1 и m_2 создают компенсирующие дисбаланс $\bar{D} = \bar{D}_1 + \bar{D}_2$ и момент \bar{M}_D . Размещение грузов массой m_1 и m_2 в плоскостях коррекции будет производиться на заданных радиусах r_1, r_2 и расчетных углах α_1, α_2 , которые вместе с величинами масс m_1 и m_2 требуется найти из системы уравнений (4.28). Система уравнений (4.28) представляет собой условие равенства нулю вектора главного момента и вектора дисбалансов от остаточной неуравновешенности ротора и размещенных в плоскостях коррекции грузов, записанных в проекциях на оси координат OY и OZ глобальной системы координат.

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{xy} = \sum_{i=1}^N m_i \cdot (x_c)_i' \cdot \left((y_c)_i' \cos \varphi_i + (z_c)_i' \sin \varphi_i \right) + m_1 x_1 r_1 \cos \alpha_1 + m_2 x_2 r_2 \cos \alpha_2 = 0 \\ J_{xz} = \sum_{i=1}^N m_i \cdot (x_c)_i' \cdot \left((z_c)_i' \cos \varphi_i - (y_c)_i' \sin \varphi_i \right) + m_1 x_1 r_1 \sin \alpha_1 + m_2 x_2 r_2 \sin \alpha_2 = 0 \\ D_y = \sum_{i=1}^N m_i \cdot \left((y_c)_i' \cos \varphi_i + (z_c)_i' \sin \varphi_i \right) + m_1 r_1 \cos \alpha_1 + m_2 r_2 \cos \alpha_2 = 0 \\ D_z = \sum_{i=1}^N m_i \cdot \left((z_c)_i' \cos \varphi_i - (y_c)_i' \sin \varphi_i \right) + m_1 r_1 \sin \alpha_1 + m_2 r_2 \sin \alpha_2 = 0 \end{array} \right. \quad (4.28)$$

Следует еще раз отметить, что в (4.28) подставляются оптимизированные значения углов φ_i , определенные на первом этапе.

Проиллюстрируем изложенные алгоритмы примером, приведенным на рисунке 4.7.

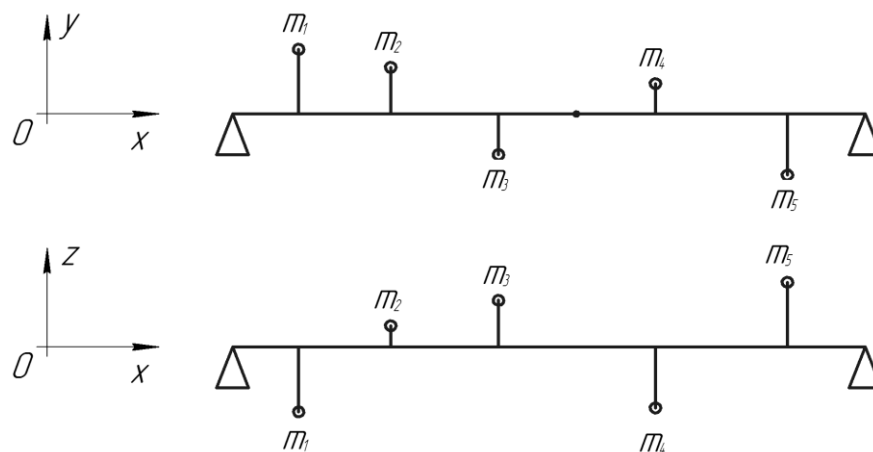


Рисунок 4.7 – Расположение центров масс 5 деталей ротора

Исходные условия по ротору:

$M=[20 \ 65 \ 15 \ 78 \ 34]$ кг – матрица масс 5 деталей ротора.

$X'_c=[0,24 \ 0,42 \ 0,57 \ 0,87 \ 1,06]$ м;

$Y'_c=[0,005 \ 0,003 \ -0,004 \ 0,002 \ -0,006]$ м;

$Z'_c=[-0,002 \ 0,001 \ 0,003 \ -0,004 \ 0,0045]$ м – матрицы координат центров масс деталей ротора при нулевых значениях углов поворота деталей относительно оси вращения ротора;

$2x_0 = 1,165$ м – расстояние между опорами ротора;

$x_1 = 0,24$ м – координата первой плоскости коррекции;

$x_2 = 1,1$ м – координата второй плоскости коррекции;

$r_1 = r_2 = 0,15$ м – радиус размещения уравновешивающегося грузика на 1 и 2-й плоскостях коррекции.

Для наглядности полагаем, что кратность углов поворота деталей ротора одинакова и дискретно изменяется в диапазоне от 9 до 90 град, что соответствует диапазону от 40 до 4 крепёжных отверстий для каждой детали.

Результаты расчетов по приведенному выше алгоритму дают следующие значения моментов инерции ротора с оптимизированными по зависимостям (4.25) углами поворота деталей, как показано на рисунке 4.8.

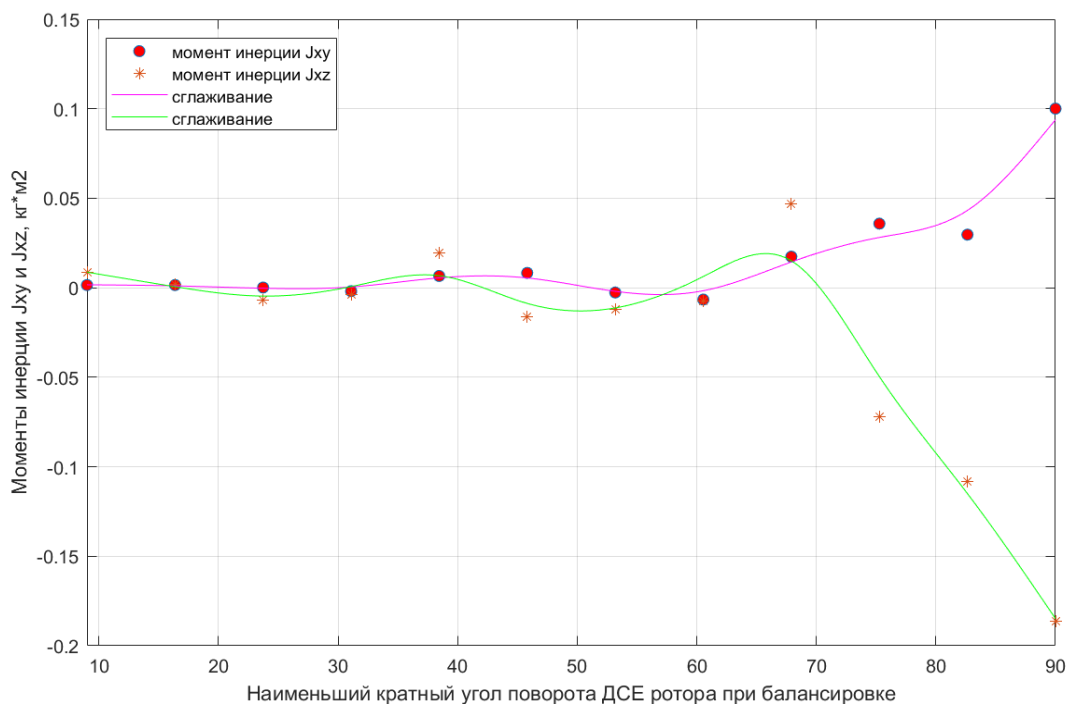


Рисунок 4.8 – Зависимость величин моментов инерции ротора от наименьшего кратного угла поворота деталей ротора

Из рисунка 4.8 видно, что с уменьшением кратного угла поворота деталей ротора менее, чем на 60 град (что соответствует 6-и и более крепёжным отверстиям в деталях), значения моментов инерции стремятся к 0. Применительно к рассматриваемому примеру это означает, что если каждая деталь ротора имеет не менее 6 крепёжных отверстий, равномерно расположенных по окружности, то за счет расчета углового положения каждой детали можно провести балансировку ротора с использованием 2 плоскостей коррекции.

Предположим, что пять деталей ротора (рисунок 4.7) имеют равномерно распределенные по окружности отверстия, количество которых задается вектором {24, 24, 20, 12, 10}. В этом случае вектор кратности углов поворота деталей ротора (4.24) принимает значения:

$$\{\varphi_i\} = \{\pi/12, \pi/12, \pi/10, \pi/6, \pi/5\}. \quad (4.29)$$

Расчет углов поворота каждой детали ротора для минимизации моментов инерции и дисбалансов (4.22) относительно оси вращения ротора, т.е. решение оптимизационной задачи (4.25), дает следующий вектор углов поворота (град):

$$\{\varphi_i\} = \{-30, -135, -18, -30, 0\}. \quad (4.30)$$

Результаты такой балансировки и соответствующие значения моментов инерции J_{xy} и J_{xz} представлены на рисунке 4.9.

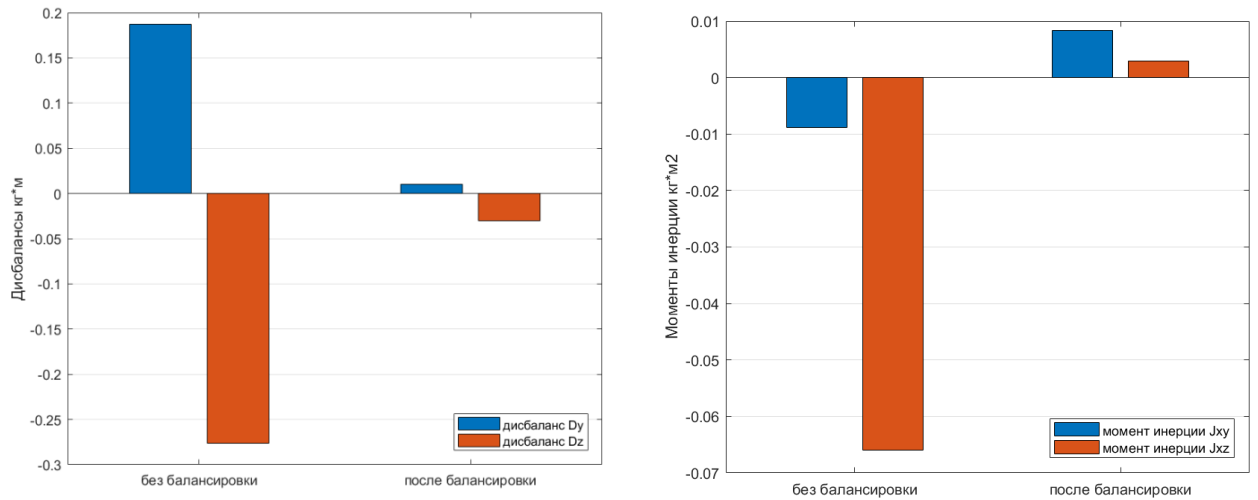


Рисунок 4.9 – Результаты балансировки за счет оптимизации углов поворота

Очевидно, что полученные неуравновешенности, соответствующие массовым моментам инерции $\{J_{xy}, J_{xz}\} = \{-0,008357 \ -0,002967\}$ кг·м² (рисунок 4.9) не являются минимально возможными. Сформулируем задачу минимизации указанных моментов инерции следующим образом. При заданных углах поворота деталей ротора, после предварительной виртуальной балансировки, необходимо внести дополнительную корректирующую неуравновешенность на одну из деталей ротора, чтобы минимизировать динамический дисбаланс при ограничениях по массе и радиусу расположения этой неуравновешенности. В математической формулировке эта задача выглядит следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \arg \min_{\{\varphi_i\}, m_{N+1}, (x_{N+1}, y_{N+1}, z_{N+1})} (J_{xy}) \in \left\{ \varphi_i = \frac{2\pi}{k_i} n_i \mid \forall n_i : n_i = 1 \vee 2 \vee 3 \dots \vee k_i, i = 1 \dots N, \right. \\
 m_{N+1} \leq m, x_{N+1} \in \{x_i\}, y_{N+1}^2 + z_{N+1}^2 = r^2 \\
 \arg \min_{\{\varphi_i\}, m_{N+1}, (x_{N+1}, y_{N+1}, z_{N+1})} (J_{xz}) \in \left\{ \varphi_i = \frac{2\pi}{k_i} n_i \mid \forall n_i : n_i = 1 \vee 2 \vee 3 \dots \vee k_i, i = 1 \dots N, \right. \\
 m_{N+1} \leq m, x_{N+1} \in \{x_i\}, y_{N+1}^2 + z_{N+1}^2 = r^2 \\
 \arg \min_{\{\varphi_i\}, m_{N+1}, (x_{N+1}, y_{N+1}, z_{N+1})} (D_{xy}) \in \left\{ \varphi_i = \frac{2\pi}{k_i} n_i \mid \forall n_i : n_i = 1 \vee 2 \vee 3 \dots \vee k_i, i = 1 \dots N, \right. \\
 m_{N+1} \leq m, x_{N+1} \in \{x_i\}, y_{N+1}^2 + z_{N+1}^2 = r^2 \\
 \arg \min_{\{\varphi_i\}, m_{N+1}, (x_{N+1}, y_{N+1}, z_{N+1})} (D_{xz}) \in \left\{ \varphi_i = \frac{2\pi}{k_i} n_i \mid \forall n_i : n_i = 1 \vee 2 \vee 3 \dots \vee k_i, i = 1 \dots N, \right. \\
 m_{N+1} \leq m, x_{N+1} \in \{x_i\}, y_{N+1}^2 + z_{N+1}^2 = r^2
 \end{array} \right. \quad (4.31)$$

В выражении (4.31) $(x_{N+1}, y_{N+1}, z_{N+1})$ – координаты размещения корректирующей неуравновешенности массой m_{N+1} .

Возвращаясь к рассмотренному примеру для ротора из 5 деталей, введем ограничения:

$$m_{N+1} \leq 0,2 \text{ кг},$$

$$R = \{0,02 \ 0,05 \ 0,03 \ 0,06 \ 0,09\} \text{ м},$$
(4.32)

где R – радиусы возможного расположения корректирующего груза массой 0,2 кг на одной из деталей ротора.

Решение задачи (4.31) при предварительно рассчитанных углах поворота (4.30) и условии (4.32) для каждой детали ротора приведено на рисунке 4.10.

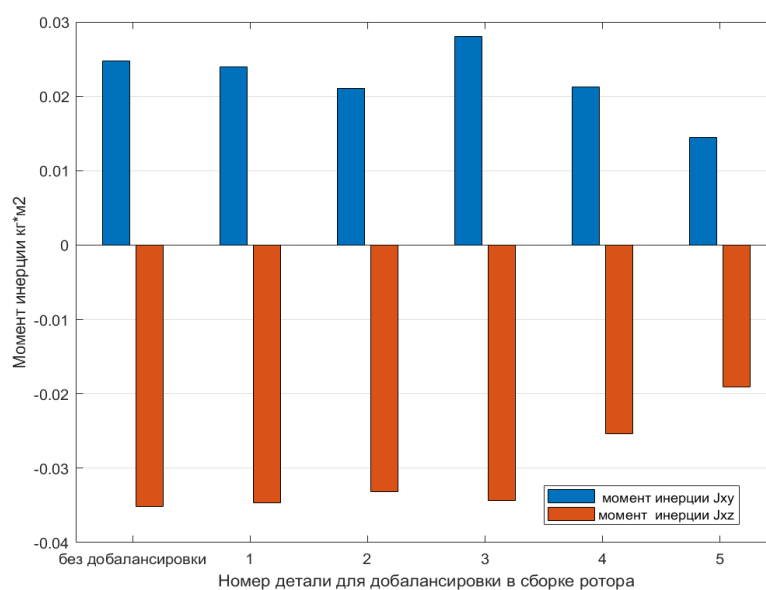


Рисунок 4.10 – Зависимость остаточной динамической неуравновешенности от добалансировки массой груза 0,2 кг одной из 5 деталей

Рисунок 4.10 иллюстрирует, как изменился бы момент инерции ротора, если бы дополнительная корректирующая неуравновешенность обеспечивалась грузиком, размещенным на одном из радиусов деталей ротора. Как показывает анализ рисунка 4.10, наиболее целесообразно при ограничениях (4.32) производить добалансировку 5-й детали ротора. Массовые моменты инерции ротора относительно оси вращения при этом уменьшаются более чем в 1,5 раза.

Подтверждение результативности использования модели виртуальной балансировки жёсткого ротора выполнялось расчетами в программном пакете ANSYS с использованием конечно-элементной модели ротора. Методом конечно-элементного анализа оценивалась виброскорость на опорах исследуемого ротора с рассмотрением двух вариантов значений угловых положений дисков: 1) исходных; 2) расчетных, выполненных с целью минимизации неуравновешенностей узла по разработанной модели.

Первый этап расчета заключался в том, что в САЕ пакет ANSYS подгружалась созданная 3D модель ротора с дисками. Затем задавались входные данные, которые были рассчитаны по разработанной модели для размеров созданной 3D модели. На втором этапе для имитации вращения ротора и получения вибрационных характеристик сборки использовались два модуля: Modal и Harmonic Response. Использование модуля Modal необходимо для определения критических частот и изгибных форм. Модуль Harmonic Response предназначен для определения амплитудно-частотных характеристик, деформаций, напряжений, скоростей модулируемого ротора. Получаемые характеристики представляются в виде ряда значений в определенном диапазоне частот. Диапазон берется в районе критической частоты.

На заключительном этапе, после расчета в модуле Harmonic Response, были получены данные по величинам виброскоростей на опорах ротора. Использование угловых положений, полученных с помощью предложенной модели, позволило снизить уровни виброскоростей на опорах ротора. Можно сделать вывод о том, что разработанная модель виртуального уравнивания жёстких роторов может быть использована для предварительной балансировки роторов за счёт оптимизации взаимного углового положения его деталей.

Предложенный метод снижения уровня вибраций роторов ГТД с помощью цифровой балансировки апробируется на примере турбины низкого давления. Предварительно в следующем подразделе выполняется анализ конструкции турбины низкого давления с целью выяснения причин возникновения первичных дисбалансов.

4.4 Анализ конструкции ротора турбины низкого давления и причин возникновения первичных дисбалансов

Анализ конструкции ротора турбины низкого давления проводится с целью выявления причин возникновения технологических неуравновешенностей. Неуравновешенности ротора могут быть снижены за счёт реализации следующих мероприятий:

- повышения точности балансировки деталей и сборочных единиц;
- повышения точности изготовления деталей и сборки узлов ротора;

– определения параметров сборки роторов, обеспечивающих распределение центров масс деталей, способствующих уменьшению вибраций в процессе эксплуатации при учёте погрешностей сборки и балансировки.

К параметрам сборки роторов, влияющим на технологические дисбалансы, можно отнести радиальное смещение и взаимное угловое положение его деталей относительно оси вращения, порядок расстановки лопаток в рабочих колёсах и др.

Определим перечень параметров, которые целесообразно учитывать при выполнении моделирования с целью снижения неуравновешенностей ротора на основе цифрового предсказательного моделирования вибрационного состояния ротора и определения оптимальных условий его сборки.

Укрупнённо турбина низкого давления включает в себя две (III и IV) ступени, статор и ротор НД. Статор турбины низкого давления содержит сопловый аппарат IV ступени и сегменты уплотнений.

В составе ротора присутствует вал, колеса III и IV ступеней, междисковая и силовая проставки. Вал служит для передачи крутящего момента от турбины к компрессору низкого давления. Диск IV ступени соединяется с валом и силовой проставкой болтами. Междисковая проставка предназначена для повышения осевой жёсткости ротора, что позволяет снизить уровень его вибраций в рабочем диапазоне частот. Для исключения перемещения в окружном и радиальном направлениях проставка фиксируется выступами диска III ступени. Силовая проставка выполняет функцию передачи крутящего момента от рабочих колес III и IV ступеней на вал через болты. В процессе работы турбина низкого давления воспринимает значительные температурные и силовые нагрузки.

Анализ конструкции турбины низкого давления выполняется с целью выявления наиболее значимых геометрических сборочных параметров, которые могут приводить к возникновению технологических дисбалансов и могут учитываться в параметрической модели ротора.

На рисунке 4.11 (на следующей странице) приведен эскиз ротора турбины низкого давления, содержащий сборочные параметры. Согласно рисунку, геометрическими сборочными параметрами ротора турбины низкого давления являются:

- 1) радиальное и торцевое биение 0,02 мм баз *Б* и *В* относительно базы *А*;
- 2) радиальное и торцевое биение 0,05 мм поверхностей *Д* и *Ж* относительно базы *А*;
- 3) концентричность 0,01 мм поверхности *Д* относительно поверхности *Е*;
- 4) концентричность 0,02 мм поверхности *Е* относительно поверхности *З*;
- 5) концентричность 0,04 мм поверхности *И* относительно базы *А*;

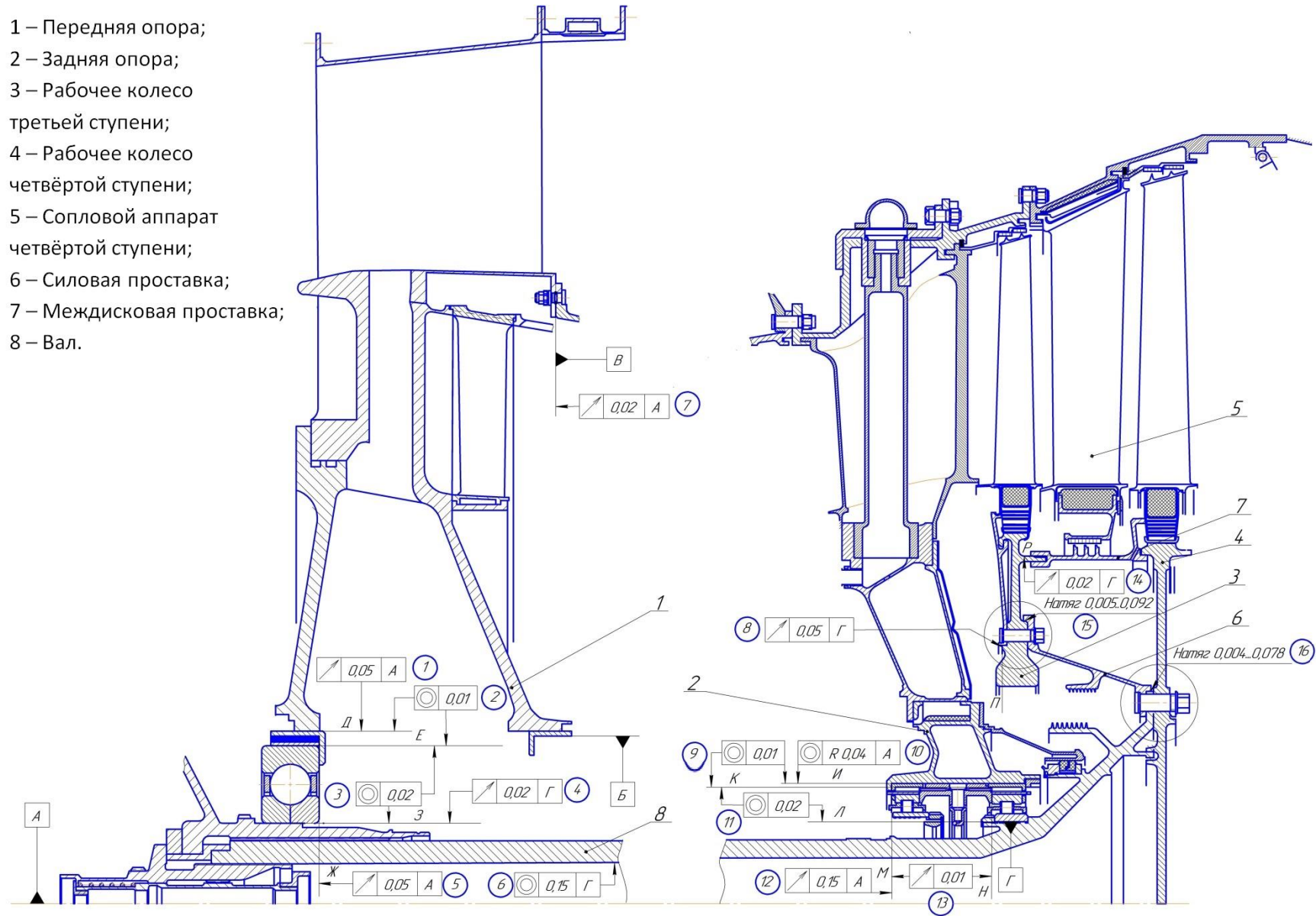


Рисунок 4.11 – Эскиз турбины низкого давления

- б) торцевое биение 0,15 мм поверхности *M* относительно базы *A*;
- 7) концентричность 0,01 мм поверхности *И* относительно поверхности *K*;
- 8) торцевое биение 0,01 мм поверхности *M* относительно поверхности *H*;
- 9) концентричность 0,02 мм поверхности *K* относительно поверхности *Л*;
- 10) радиальное и торцевое биение 0,05 мм поверхности *П* относительно базы *Г*;
- 11) радиальное и торцевое биение 0,02 мм поверхности *P* относительно базы *Г*;
- 12) соосность 0,15 мм поверхности внутреннего отверстия относительно базы *Г*;
- 13) радиальное биение 0,02 мм поверхности *З* относительно базы *Г*.

Относительно базовой оси *A* двигателя заданы радиальное и торцевое биения 0,02 мм к базам *B*, *B*, которые достигаются в операции центровки с правой стороны средней опоры. К поверхностям *Д* и *Ж* с правой стороны опоры заложены требования по радиальному и торцевому биениям величиной 0,05 мм. По поверхностям *Д* и *Е* производится установка демпфера под главный подшипник. К конструкции демпфера предъявляется требование по концентричности равное 0,01 мм. В демпфер устанавливается наружное кольцо подшипника по посадке с зазором, вследствие которого возникает отклонение от концентричности величиной 0,02 мм. Заданы требования по концентричности поверхности *И* величиной 0,04 мм и торцевому биению поверхности *M* равному 0,15 мм задней опоры относительно базы *A*. Заданные требования достигаются в процессе центровки опор. Для поверхности стакана подшипника предусмотрено требование по концентричности равное величине 0,01 мм. На поверхности *M* и *H* заданы требования по торцевому биению равному 0,01 мм. Подшипник задней опоры имеет внутренний зазор, который можно определить величиной отклонения по концентричности 0,02 мм. Заданы требования радиального и торцевого биений поверхностей *П* и *P* диска третьей ступени относительно базы *Г* вала турбины низкого давления величинами 0,05 мм и 0,02 мм соответственно. К внутреннему отверстию вала предъявляется требование по соосности 0,15 мм относительно базы *Г* вала. Биение посадочных мест вала поверхности *З* и базы *Г* составляет 0,02 мм.

Проанализируем влияние выявленных геометрических отклонений ротора ТНД на причины возникновения дисбалансов.

Одной из наиболее существенных причин возникновения дисбалансов рассматриваемого ротора является неконцентричность посадочных поверхностей средней и задней опор, которая образуется при выполнении операции центровки. Таким образом, происходит несовпадение осей посадочных диаметров с осями вращения дисков. Поскольку технология балансировки предполагает балансировку собранного ротора, то

несоосность опор не учитывается в процессе уравнивания ротора, что оказывает прямое влияние на дисбаланс ротора.

К демпферу, стакану подшипника и двум подшипникам, устанавливаемым в среднюю и заднюю опоры, предъявляются требования по радиальным и торцевым биениям наружной и внутренней поверхностей относительно оси вращения. Технология балансировки предполагает балансировку ротора в сборе с использованием технологического приспособления, которое фиксирует оси вращения с использованием технологического подшипника. Это приводит к тому, что биение технологического подшипника и подшипников, предусмотренных конструкцией, не учитывается при уравнивании ротора. Аналогично на дисбаланс ротора оказывают влияние зазоры и биения, вносимые демпфером и стаканом подшипника, которые не участвуют в процессе балансировки собранного ротора на технологическом приспособлении.

Радиальные и торцевые биения поверхностей диска *З* и *И* приводят к несоосности дисков и вала. В свою очередь влияние несоосности диска и вала на смещение центра масс ротора относительно оси вращения устраняются в процессе балансировки собранного ротора при использовании технологических баз. Однако при сборке уравновешенного ротора совместно со статором возникают дополнительные эксцентриситеты, вызванные несоосностью опор, демпфера и стакана под подшипник. Перечисленные несоосности приводят к появлению дополнительной величины дисбаланса, поскольку нарушается симметрия ротора относительно его оси вращения.

Посадки с натягом проставки и вала, а также диска и проставки влияют на возникновение дисбаланса. Чрезмерный натяг, приводящий к внутренним напряжениям, вызывает искривление проставки и диска ротора. Недостаточная величина натяга в посадках приводит к смещению деталей друг относительно друга. Смещение деталей друг относительно друга может проявляться уже в процессе эксплуатации, при возникновении эксплуатационных нагрузок, таких как центробежные и газовые силы. Также неравномерность температурного поля ротора, в совокупности с деформациями проставки и диска, которые вызваны чрезмерным натягом, приводит к относительному смещению названных деталей друг относительно друга в процессе работы двигателя. Относительное смещение деталей относительно друг друга является причиной дополнительного дисбаланса.

Смещение внутреннего отверстия вала относительно его посадочных баз *Г* приводит к возникновению дисбаланса вследствие несоосности демпфера и стакана под подшипник, а также зазора в подшипниках. Влияние несоосности внутреннего отверстия вала на смещение центра масс ротора устраняется в процессе балансировки собранного ротора с

использованием технологических баз. Однако при сборке уравновешенного ротора совместно со статором возникают дополнительные эксцентриситеты, вызванные несоосностью опор, демпфера и стакана под подшипник. Перечисленные несоосности приводят к появлению дополнительной величины дисбаланса, поскольку нарушается симметрия ротора относительно оси вращения.

Проведенный анализ сборочных параметров позволяет сформировать перечень тех из них, которые следует учитывать при разработке структурно-параметрической модели ротора, а именно:

- взаимные смещения деталей ротора относительно его оси вращения и оси вращения опор;
- смещение опор друг относительно друга.

Выявленные причины дисбалансов ротора являются наиболее существенными. В последующих подразделах будет рассмотрена реализация параметрической модели ротора, которая учитывает геометрические отклонения и позволяет моделировать первоначальный и устранимый дисбаланс. Параметрическая модель ротора включает геометрические отклонения, полученные различными способами их моделирования.

4.5 Численная модель для оценки дисбалансов с учётом отклонения расположения собираемых деталей в статической постановке

Разработка аналитических моделей, позволяющих оценивать параметры вибрационного состояния роторов, затруднена по причинам: большого количества влияющих факторов, сложного характера их влияния на параметры вибраций изделий, динамического характера рассматриваемого процесса, сложной конфигурацией сборочных узлов. Возможным решением указанной проблемы является симуляция процесса работы ротора для определения его дисбаланса с использованием численных моделей процесса. Настоящий подраздел содержит описание численной модели оценки дисбалансов роторов, учитывающих отклонение расположения сопрягаемых поверхностей в статической постановке.

Под статической постановкой понимается представление ротора в виде абсолютно жёсткого тела с целью оценки его суммарного дисбаланса на основе суммирования пространственно распределённых неуравновешенностей деталей.

Разработка численной модели выполнялась на основе рассмотренной ранее в подразделе 4.2. структурно-параметрической модели ротора. Детали ротора

рассматриваются как абсолютно жёсткие и имеют возможность смещения относительно их номинального положения для учета погрешностей сборочных параметров. Учёт дисбалансов деталей выполняется посредством добавления или вычитания масс, расположенных в предусмотренных местах. Численная модель позволит получать оценки возникающих дисбалансов вследствие погрешностей сборки роторов с учетом допусков на изготовление входящих в сборку деталей. Реализация численной модели выполнялась в программном комплексе для проведения расчетов возникающих дисбалансов при сборке ротора с учетом отклонения расположения поверхностей сопрягаемых деталей. Программный комплекс содержит программные модули в среде MATLAB и приложения для автоматизации работы в пакете NX, как показано в виде схемы, приведенной на рисунке 4.12.

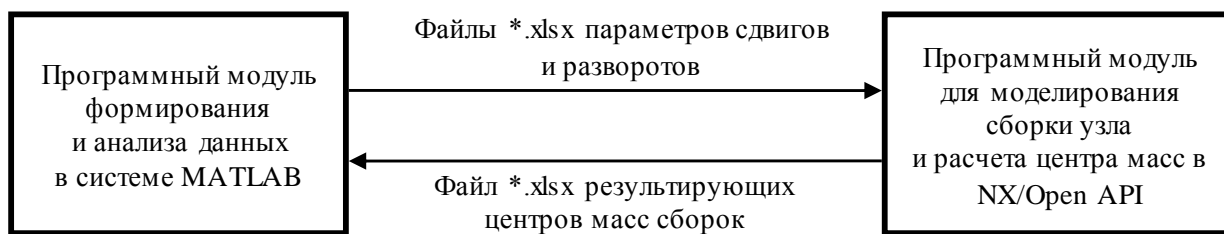


Рисунок 4.12 – Схема разработанного программного комплекса для исследования дисбаланса сборки

Программный модуль, разработанный в системе MATLAB, состоит из двух частей: 1) формирование массивов данных по смещениям деталей, входящим в рассматриваемый узел; 2) анализ данных, полученных в ходе выполнения расчётов.

В первой части в системе MATLAB формируются исходные данные. Смещения деталей друг относительно друга задаются тремя параметрами сдвига вдоль координатных осей и двумя углами поворота вокруг осей. Указываются углы поворота вокруг оси $Y - \alpha_y$ и вокруг оси $Z - \alpha_z$, кроме оси вращения ротора. Данные моделируются на основании выбранного закона распределения (равновероятностного, нормального) и экспортируются в файл формата *.xlsx. Таким образом, формируется файл плана эксперимента.

В таблице 4.1 представлен формат данных по параметрам сдвигов и разворотов деталей относительно их номинального расположения.

Таблица 4.1 – Файл плана экспериментов

Сдвиг по X (1)	Сдвиг по Y (1)	Сдвиг по Z (1)	Угол вокруг Y (1)	Угол вокруг Z (1)
Сдвиг по X (2)	Сдвиг по Y (2)	Сдвиг по Z (2)	Угол вокруг Y (2)	Угол вокруг Z (2)
...
Сдвиг по X (N)	Сдвиг по Y (N)	Сдвиг по Z (N)	Угол вокруг Y (N)	Угол вокруг Z (N)

Файлов плана экспериментов может быть несколько, если моделируются отклонения у разных деталей. Величины смещений и углов задаются, исходя из значения допусков на параметры отклонения расположения поверхностей деталей, к которым относятся параллельность, радиальное биение, перпендикулярность, позиционное смещение и др.

Для моделирования и расчета смещения центра масс рассматриваемого узла разработан алгоритм, реализованный в виде программного модуля в NX/Open API на языке программирования Visual Basic. Программный модуль работает как интегрированная в систему NX функция, модуль которой добавлен в библиотеку с расширением *.dll. На рисунке 4.13 приведена блок-схема алгоритма проведения расчетов.

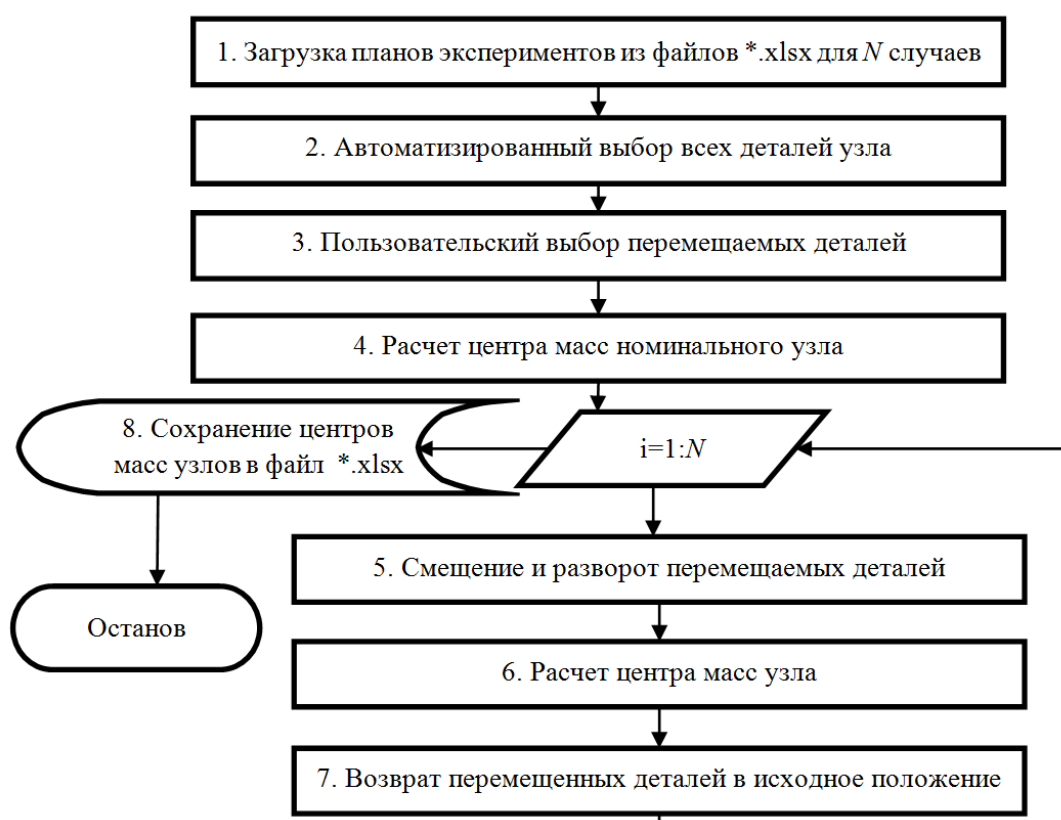


Рисунок 4.13 – Блок-схема алгоритма работы приложения в NX/ Open API
Рассмотрим подробно этапы представленного алгоритма.

На первом этапе производится импорт данных из файлов формата *.xlsx, сформированных программным модулем в системе MATLAB.

На втором этапе производится поиск в дереве построения объектов типа «тело» и сохранение их в массив объектов «Assembly».

На третьем этапе пользователем вручную выбираются детали, положение которых будет изменяться. Производится сохранение выбранных деталей в массив объектов «theBodies_transl».

На четвертом этапе выполняется расчёт и сохранение центра масс узла с использованием инструмента «MeasureBodyBuilder» библиотеки NX. Следующие три этапа выполняются в цикле по заданному количеству N случаев сборки в загруженном файле Excel.

На пятом этапе производится смещение и разворот выбранных на третьем этапе деталей. Изменение положения деталей выполняется с использованием вектора перемещения и матрицы транспонирования. Координаты точек перемещаемой детали определяются следующим выражением:

$$\vec{p}_{n_расч} = \begin{vmatrix} x_n & y_n & z_n \end{vmatrix} \cdot \mathbf{M}_y \cdot \mathbf{M}_z + \vec{t}, \quad (4.33)$$

где $\vec{p}_{n_расч}$ – вектор координат точки объекта после пересчета;

\mathbf{M}_y – матрица вращения вокруг оси y на угол α_y :

$$\mathbf{M}_y = \begin{vmatrix} \cos \alpha_y & 0 & \sin \alpha_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha_y & 0 & \cos \alpha_y \end{vmatrix}; \quad (4.34)$$

\mathbf{M}_z – матрица вращения вокруг оси z на угол α_z :

$$\mathbf{M}_z = \begin{vmatrix} \cos \alpha_z & -\sin \alpha_z & 0 \\ \sin \alpha_z & \cos \alpha_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (4.35)$$

$\vec{t} = \begin{vmatrix} t_x & t_y & t_z \end{vmatrix}$ – вектор перемещения детали или узла.

Центром вращения является центр масс одной из перемещаемых деталей. Детали перемещаются совместно, так же при необходимости производится дополнительное перемещение диска (объект «theBodies_transl1»).

На шестом этапе производится расчет координат центра масс узла и их запись в матрицу решений.

На седьмом этапе, при помощи обратных преобразований, производится возвращение перемещенных деталей в исходное положение.

На восьмом этапе, после окончания цикла, производится запись матрицы решений в файл формата *.xlsx.

Разработанный алгоритм реализован в программном приложении для расчета центра масс деталей турбины низкого давления. Экранная копия интерфейса представлена на рисунке 4.14.

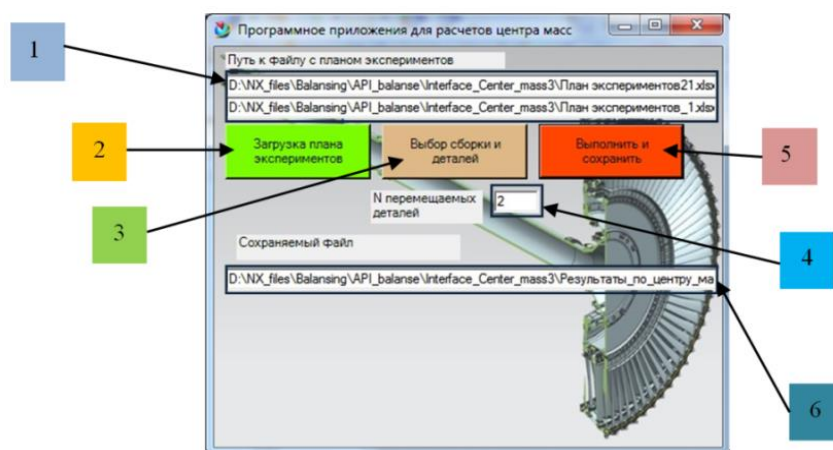


Рисунок 4.14 – Экранная копия интерфейса программного приложения для расчетов центров масс узлов в системе NX

На форме программного приложения предусмотрены следующие объекты: 1 – поле задания путей к файлам с планом экспериментов по погрешностям сборки диска и проставки; 2 – кнопка загрузки данных по погрешностям сборки; 3 – кнопка автоматического выбора всех деталей сборки и деталей, имеющих погрешности сборки; 4 – поле задания количества перемещаемых деталей; 5 – кнопка выполнения расчётов и сохранения результатов; 6 – путь к файлу для сохранения результатов.

Результаты расчетов центра масс импортируются в программный модуль в системе MATLAB, который выполняет обработку данных и вероятностных оценок дисбалансов. Дисбаланс узла рассчитывается по формуле:

$$D = m \cdot r, \quad (4.36)$$

где m — неуравновешенная масса, кг;

r – радиус от центра ротора до центра неуравновешенной массы, мм;

Модуль эксцентриситета центра масс находится по формуле:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad (4.37)$$

где x, y, z – координаты неуравновешенной массы, мм.

По произведенным расчетам строятся гистограммы распределения смещений центра масс и дисбаланса и определяются статистические характеристики распределения

(математические ожидания, среднеквадратические отклонения, доверительные интервалы рассматриваемых величин).

Разработанный программный комплекс использовался для выполнения исследований для узла ротора турбины низкого давления. В состав рассматриваемого узла входят детали «вал», «проставка» и «диск». Внешний вид рассматриваемого узла приведен на рисунке 4.15.

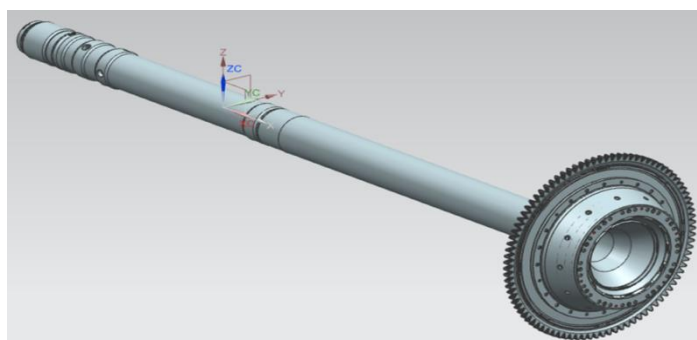


Рисунок 4.15 – Узел ротора турбины низкого давления

В ходе исследований изменялось положение деталей «проставка» и «диск» (эскиз детали «проставка» приведен во второй главе, рисунок 2.23). В соответствии с техническими требованиями для данных деталей задавались возможные векторы перемещения и углы поворота для формирования плана эксперимента (таблица 4.1). Для исследования возникающих дисбалансов рассматриваемого узла проведено моделирование 10000 сочетаний отклонений деталей «проставка» и «диск». На рисунке 4.16 приведены моделируемые распределения параметров перемещения деталей «проставка» и «диск».

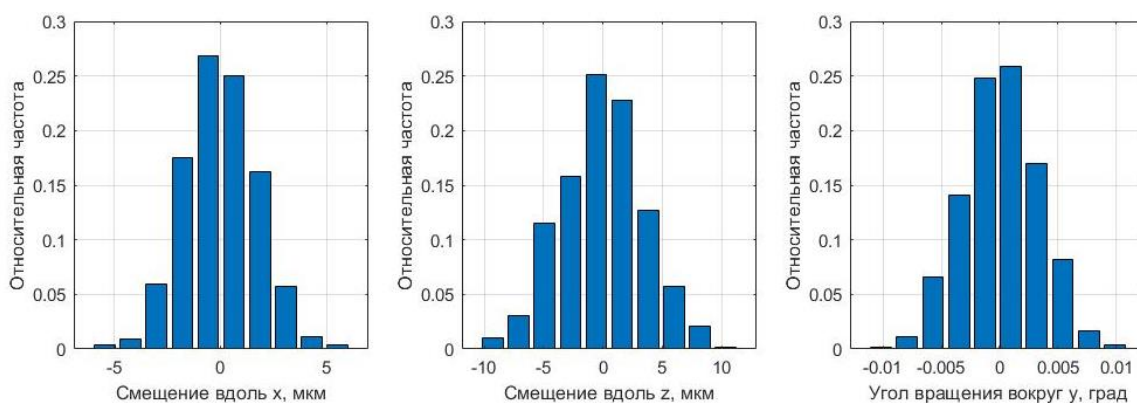


Рисунок 4.16 – Гистограммы параметров перемещения деталей «диск» и «проставка»

На рисунке 4.17 приведены некоторые гистограммы для моделирования перемещения «диска» относительно «проставки».

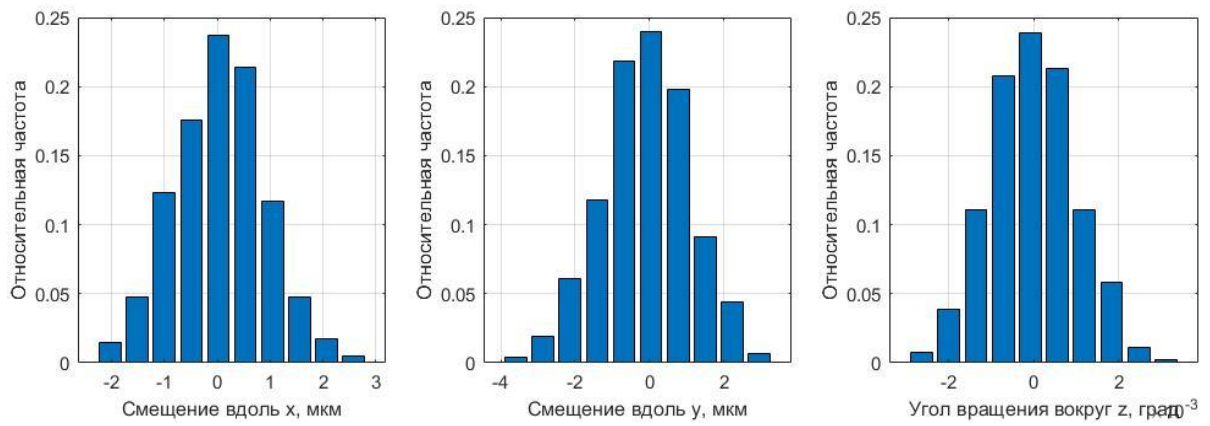


Рисунок 4.17 – Гистограммы параметров перемещения «диска»

После выполнения первой части вычислений данные экспортировались в программный модуль системы NX для расчета смещений центров масс узла. Полученные результаты проходили статистическое обобщение. На рисунке 4.18 приведены гистограммы распределения смещений центров масс вдоль координатных осей.

Как следует из гистограмм, представленных на рисунке 4.18, смещения вдоль координатных осей, сдвиги и углы деталей подчиняются нормальному закону распределения.

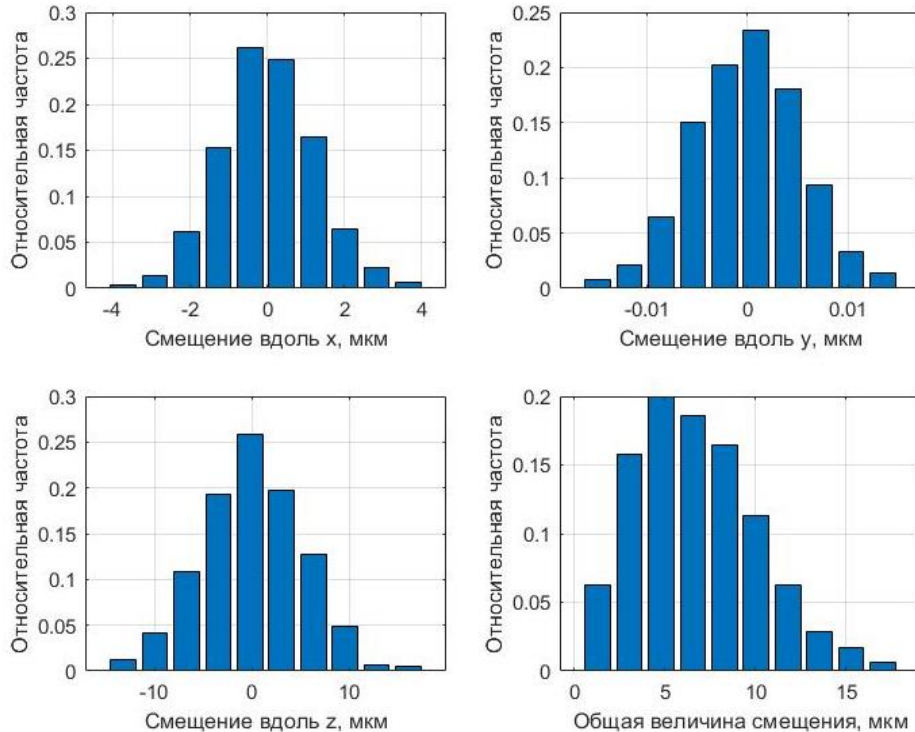


Рисунок 4.18 – Гистограммы распределения смещений центра масс

Проверка соответствия нормальному закону распределения выполнялась при помощи теста по критерию Лиллиефорса [157]. Величина $|\vec{r}|$ подчиняется законам распределения

Релея или β -распределения, которые пригодны для описания существенно-положительных величин.

На рисунке 4.19 приведено распределение результирующих дисбалансов, схожее по характеру с величиной $|\vec{r}|$.

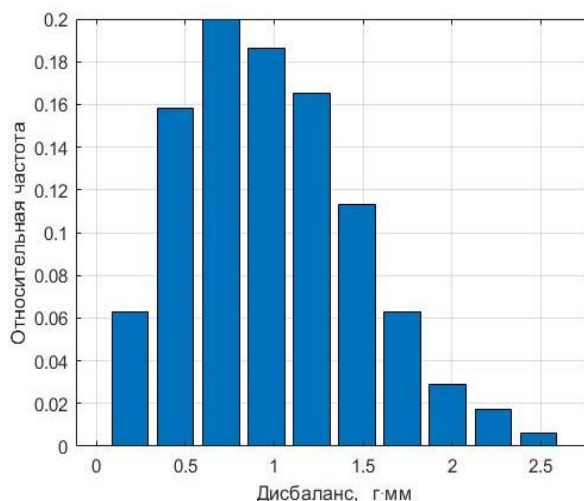


Рисунок 4.19 – Гистограмма распределения величины дисбаланса узла

Таблица 4.2 содержит математическое ожидание μ и среднеквадратическое отклонение σ параметров смещения центра масс и дисбаланса с доверительной вероятностью 99,73%. Минимальная величина дисбаланса составила 63,3 г·мм, максимальная – 2564 г·мм.

Таблица 4.2 – Параметры отклонений формы и расположения сборки «диск-проставка»

Параметр	μ	σ	Параметр	μ	σ
Смещение по y, мм	-0,0001	0,0053	$ \vec{r} $, мм	0,0064	0,0029
Смещение по z, мм	0,0001	0,0051	U , кг/мм	0,9416	0,4168

Приведенный пример показывает, что предложенная численная модель позволяет оценивать влияние отклонения расположения деталей и их статических дисбалансов на величины дисбалансов узлов.

В следующих подразделах будет приведена последовательность построения конечно-элементных моделей для оценки дисбалансов и вибраций роторов на основе их действительных моделей.

4.6 Построение конечно-элементных моделей для оценки дисбалансов и вибраций роторов на основе их действительных моделей

Возникающие в процессе работы роторов колебания и упругие деформации могут быть учтены при использовании метода конечных элементов. Вибрационное состояние роторов с использованием метода конечных элементов выполняется на основе уравнения роторной динамики в общем виде [154]:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [G + C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F\}, \quad (4.38)$$

где $[M], [C], [K]$ – матрицы масс, демпфирования и жёсткости конструкции соответственно;

$[G]$ – гироскопическая матрица;

$\{U\}, \{\dot{U}\}, \{\ddot{U}\}$ – матрицы перемещений, первых и вторых производных по ним;

$\{F\}$ – матрица усилий.

Задание необходимых параметров уравнения (4.38) возможно с применением комплекса твердотельных 3D моделей, в качестве которых могут выступать действительные модели. Достаточная точность параметров описания узлов роторов может быть достигнута при использовании параметрических моделей, в которых учитываются погрешности сборочных параметров и дисбалансы деталей. Построение конечно-элементных моделей для оценки вибраций роторов с использованием их действительных моделей выполняется в последовательности, указанной на блок-схеме (рисунок 4.20 на следующей странице).

На первом этапе формируется перечень изменяемых параметров, в который входят:

- сборочные параметры ротора;
- статические и моментные неуравновешенности деталей.

Исходной информацией для формирования перечня изменяемых параметров выступает техническая документация, содержащая описание конструкции и технологии сборки ротора. Выбор моделируемых неуравновешенностей деталей ротора осуществляется на основе анализа их геометрии для оценки значимости статических, моментных и динамических дисбалансов.

На втором этапе назначаются плоскости коррекций дисбалансов ротора и его деталей отдельными списками на основе анализа конструкторской и технологической документации. Плоскости коррекции предусмотрены в конструкции деталей ротора.

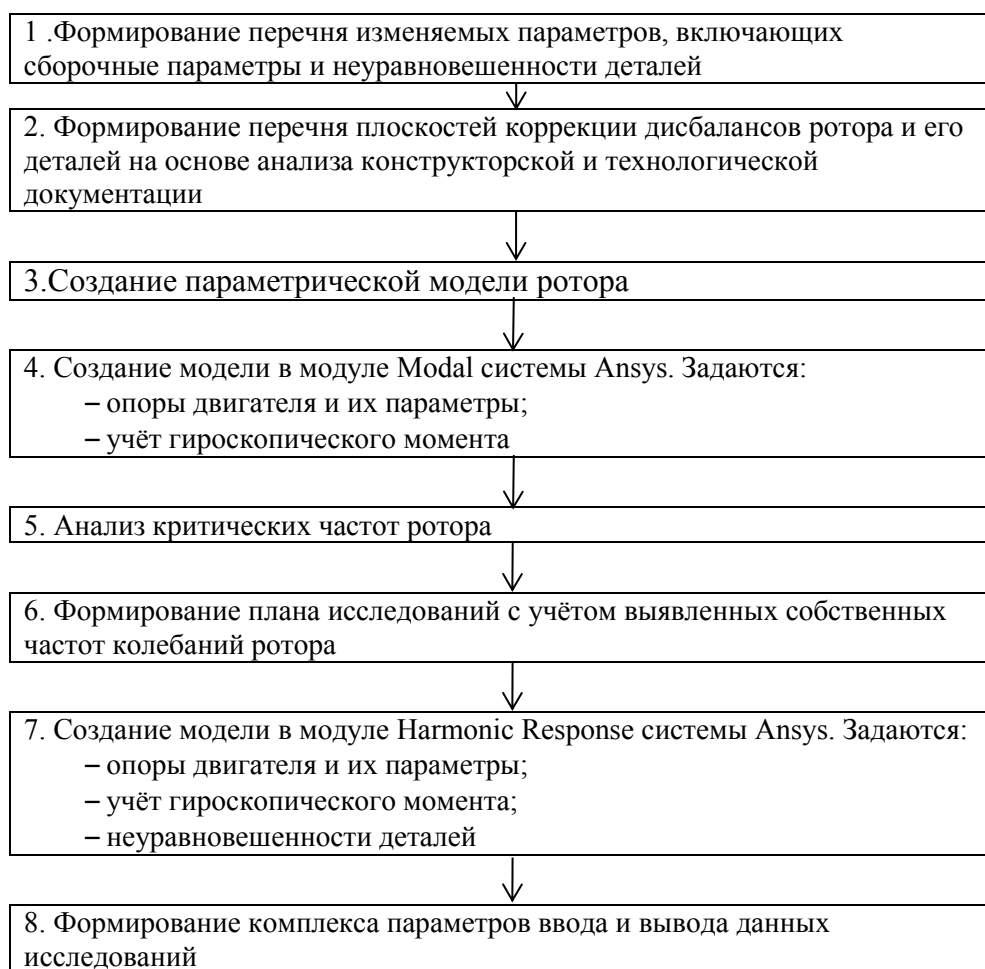


Рисунок 4.20 – Блок-схема алгоритма построения конечно-элементных моделей для оценки вибраций роторов с использованием их действительных моделей

Третий этап предусматривает создание структурно-параметрической модели ротора (в соответствии с подразделом 4.2), позволяющей учитывать сформированные на этапах 1 и 2 списки параметров. Формирование параметрической модели производится в соответствии с алгоритмами, приведенными в подразделе 4.2.

На четвертом этапе выполняется создание конечно-элементной модели в модуле Modal системы Ansys. Создаваемая модель предназначена для определения критических частот вращения ротора. В модели задаются и учитываются:

- опоры двигателя и их параметры, включая коэффициенты жёсткостей и демпфирования;
- гироскопический момент, действующий в процессе работы ротора.

На пятом этапе, на основе полученной конечно-элементной модели с наложенными ограничениями по перемещениям, приложенными усилиями и моментами, выполняется расчет и анализ критических частот ротора.

Полученная информация используется для дальнейших исследований, в которых динамика ротора рассматривается как динамика ряда характерных точек в частотной области.

Шестой этап включает разработку плана дальнейших исследований с учётом выявленных собственных частот колебаний ротора. План исследований может включать в себя учет следующих параметров в частотной области:

- отклонения расположения деталей от их номинального расположения;
- статические, моментные и динамические неуравновешенности деталей;
- отклонения от концентричности опор ротора.

На седьмом этапе выполняется формирование КЭ-модели в модуле Harmonic Response прикладного программного обеспечения Ansys. Создаваемая КЭ-модель предназначена для оценки величин виброскоростей, реакций, измеряемых на опорах двигателя и деформаций ротора. В ходе создания названной модели выполняется задание той же совокупности параметров, что и в модели, создаваемой в модуле Modal. Дополнительно задаются параметры неуравновешенности деталей, включающие расположение неуравновешенных масс и их величины.

Как было отмечено ранее, предлагается два варианта задания неуравновешенностей деталей и узлов роторов. Задание дисбалансов деталей выполняется на основе результатов их измерений, полученных с помощью балансировочного оборудования. Первый вариант используется при моделировании дисбалансов ротора в абсолютно жёсткой постановке и основан на задании масс (грузиков), учитываемых в структурно-параметрической модели ротора, описание которой приведено в подразделе 4.2. Второй вариант используется при моделировании гибких роторов и основан на задании возбуждающих ротор сил, имитирующих неуравновешенности.

Первый вариант задания неуравновешенностей на примере одной детали ротора представлен на рисунке 4.21.

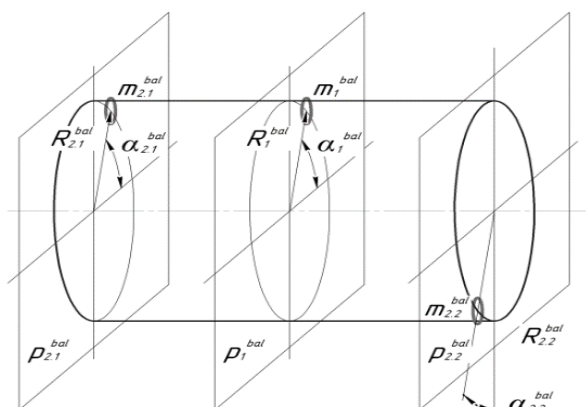


Рисунок 4.21 – Задание неуравновешенностей на детали ротора с помощью масс

Статическая неуравновешенность детали задаётся путём добавления или изъятия массы m_1^{bal} , расположенной в перпендикулярной оси вращения плоскости P_1^{bal} на радиусе R_1^{bal} с угловым расположением α_1^{bal} . Моментная неуравновешенность задаётся путём добавления или изъятия двух масс $m_{2,1}^{bal}$ и $m_{2,2}^{bal}$, соответственно расположенных в двух перпендикулярных оси вращения плоскостях $P_{2,1}^{bal}$ и $P_{2,2}^{bal}$ на радиусах $R_{2,1}^{bal}$ и $R_{2,2}^{bal}$ с угловым расположением $\alpha_{2,1}^{bal}$ и $\alpha_{2,2}^{bal}$. Углы $\alpha_{2,1}^{bal}$ и $\alpha_{2,2}^{bal}$ должны удовлетворять соотношению:

$$\alpha_{2,2}^{bal} = \alpha_{2,1}^{bal} + \pi . \quad (4.39)$$

Второй вариант задания неуравновешенностей отличается от первого использованием вращающихся сил F_1^{bal} , $F_{2,1}^{bal}$ и $F_{2,2}^{bal}$ вместо масс m_1^{bal} , $m_{2,1}^{bal}$ и $m_{2,2}^{bal}$ как показано на рисунке 4.22.

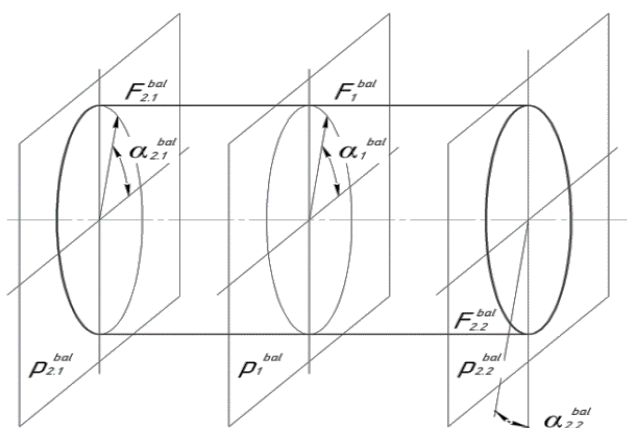


Рисунок 4.22 – Задание неуравновешенностей на детали ротора с помощью вращающихся сил

Величины модулей и угловое расположение масс или вращающихся сил задаются на основе результатов измерений дисбалансов.

В ходе восьмого этапа формируется комплекс параметров ввода и вывода данных исследований, позволяющий использовать созданную на седьмом этапе модель в составе разрабатываемой компьютерной системы, реализующей метод снижения уровня вибраций роторов ГТД с помощью балансировки на цифровой модели.

4.7 Исследования зависимостей вибраций ротора от неуравновешенностей его деталей и узлов

Исследования уровня вибраций ротора турбины низкого давления выполнялись в соответствии с алгоритмом, описанным в подразделе 4.5. Верификация моделей

выполнялась с использованием разработанного разгонно-балансировочного стенда на примере имитатора ротора турбины низкого давления. Имитатор ротора воспроизводит этапы технологии сборки и балансировки ТНД. Результаты верификации приведены в приложении Ж.

Разработана конечно-элементная модель турбины низкого давления, позволяющая определять уровень вибраций на опорах ГТД при учёте неуравновешенностей, остающихся после выполнения технологических операций балансировки и возникающих от смещения деталей и узлов. Внешний вид разработанной конечно-элементной модели приведен на рисунке 4.23.

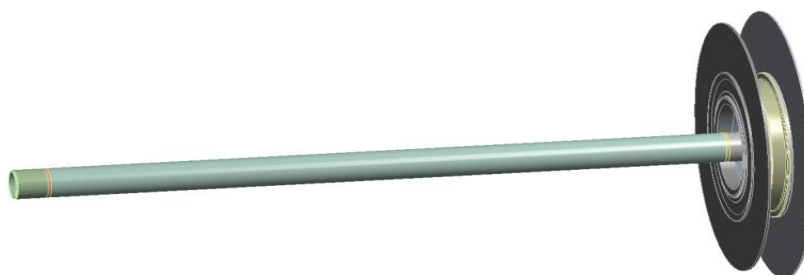


Рисунок 4.23 – Внешний вид конечно-элементной модели для определения уровня вибраций на опорах ротора ГТД

В модели присутствуют вал, рабочие колёса III и IV ступеней, проставка, промежуточное кольцо. Лопатки в 3D моделях рабочих колёс заменялись эквивалентным по массе, моменту инерции и размерам цилиндрическим ободом.

Параметры плана исследований приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Параметры плана исследований уровня вибраций на опорах ротора турбины низкого давления

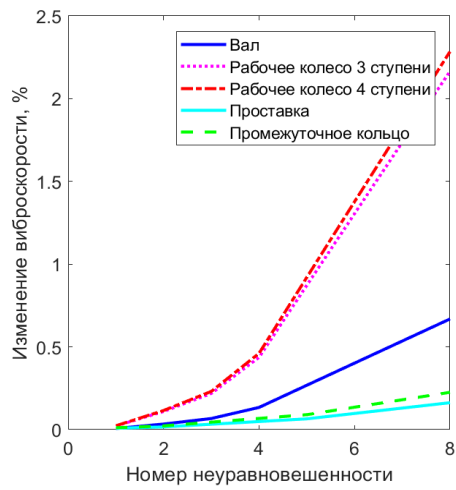
№	Наименование детали / узла	Допустимая неуравновешенность, г·см	Неуравновешенности, г·см (№1, 2...8)	Угловые положения узлов, град
1	Вал	100	2; 10; 20; 40; 80; 120; 160; 200	0; 45; 90; 135; 180; 225; 270; 315
2	Рабочее колесо III ступени	100	2; 10; 20; 40; 80; 120; 160; 200	0; 45; 90; 135; 180; 225; 270; 315
3	Проставка	10	1; 2; 4; 6; 8; 12; 16; 20	0; 45; 90; 135; 180; 225; 270; 315
4	Рабочее колесо IV ступени	100	2; 10; 20; 40; 80; 120; 160; 200	0; 45; 90; 135; 180; 225; 270; 315
5	Промежуточное кольцо	10	1; 2; 4; 6; 8; 12; 16; 20	0; 45; 90; 135; 180; 225; 270; 315

Исследования проводились для оценки влияния неуравновешенностей и углового положения деталей и узлов ротора на величины виброскоростей его опор в процентном отношении к принятому уровню вибраций. Принятый уровень вибраций определялся при отсутствии неуравновешенностей деталей и узлов ротора. Значения неуравновешенностей деталей и узлов обозначены соответствующими номерами 1, 2...8. Рассматриваемый ротор имеет три критические частоты: 50, 75, 110 Гц. Результаты исследований для угловых частот вращения 20, 100 и 160 Гц приведены в таблице 4.4.

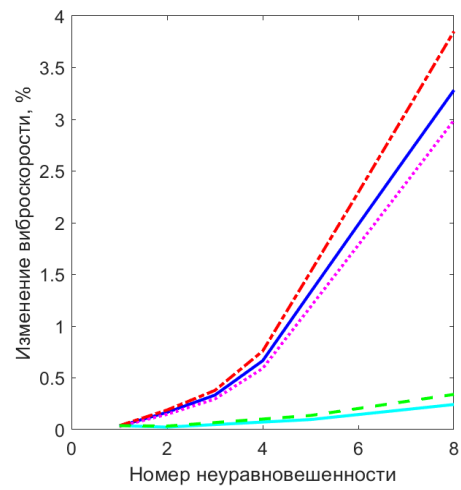
Таблица 4.4 – Влияние неуравновешенностей узлов на уровень виброскоростей опор ротора ТНД для угловых частот вращения 20, 100 и 160 Гц в % к принятому уровню вибраций

№	Наименование детали / узла, угловая частота вращения 20, 100, 160 Гц	1 опора					2 опора				
		Неуравновешенность, №					Неуравновешенность, №				
		2	4	5	6	7	2	4	5	6	7
1	Вал	0,03	0,13	0,27	0,40	0,54	0,17	0,67	1,33	1,98	2,64
		0,34	1,36	2,70	4,02	5,32	1,92	7,64	15,15	22,52	29,68
		1,73	5,90	8,89	8,69	5,32	6,43	37,08	92,03	153,48	217,67
2	Рабочее колесо III ступени	0,11	0,44	0,87	1,31	1,74	0,15	0,59	1,19	1,79	2,39
		2,12	8,15	15,32	21,24	25,62	1,31	5,25	10,54	15,86	21,21
		3,01	8,66	7,35	3,56	21,51	0,36	1,52	3,24	5,13	7,20
3	Проставка	0,02	0,05	0,07	0,10	0,13	0,02	0,07	0,10	0,15	0,19
		0,31	0,92	1,22	1,83	2,43	0,12	0,37	0,50	0,75	0,99
		0,64	1,85	2,43	3,52	4,52	0,41	1,28	1,74	2,70	3,72
4	Рабочее колесо IV ступени	0,12	0,46	0,92	1,38	1,83	0,19	0,76	1,52	2,30	3,07
		2,08	8,03	15,11	20,98	25,36	0,38	1,53	3,06	4,57	6,13
		4,96	8,20	13,91	53,76	101,07	6,71	38,67	95,68	159,19	225,41
5	Промежуточное кольцо	0,02	0,07	0,09	0,14	0,18	0,03	0,10	0,14	0,20	0,27
		0,42	1,27	1,69	2,52	3,34	0,16	0,49	0,65	0,97	1,30
		0,91	2,59	3,37	4,80	6,04	0,63	2,01	2,75	4,32	6,03

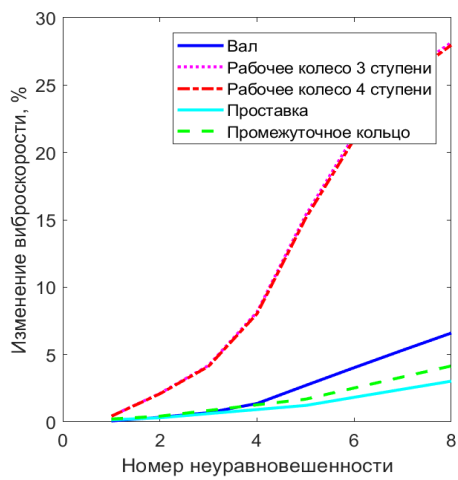
Результаты, представленные в таблице 4.4, приведены на рисунке 4.24.



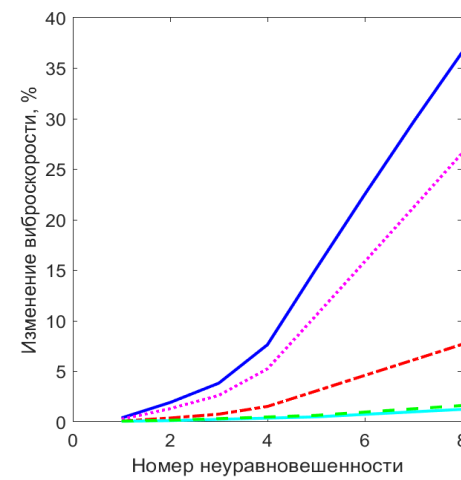
а)



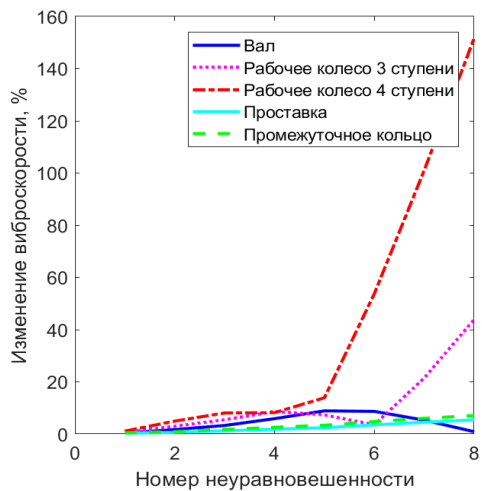
б)



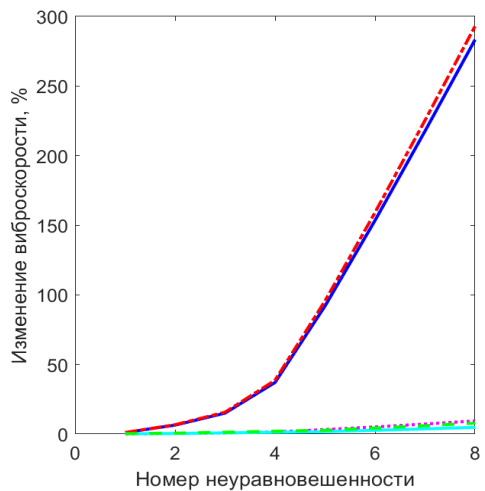
в)



г)



д)



е)

Рисунок 4.24 – Зависимость уровня виброскоростей ТНД в процентном отношении

к принятому уровню вибраций от неуравновешенностей для опор:

а) 20 Гц – первая опора; б) 20 Гц – вторая опора; в) 100 Гц – первая опора;

г) 100 Гц – вторая опора; д) 160 Гц – первая опора; е) 160 Гц – вторая опора

Влияние неуравновешенностей деталей и узлов на уровень виброскоростей опор ротора ГНД в процентном отношении к принятому уровню вибраций от угловых частот вращения приведено в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Влияние углового положения деталей на уровень виброскоростей опор ротора ГНД для угловых частот вращения 20, 100 и 160 Гц в % к принятому уровню вибраций

№	Наименование детали, угловая частота вращения 20, 100, 160 Гц	1 опора							
		Угловое положение, град.							
		0	45	90	135	180	225	270	315
1	Рабочее колесо III ступени	1,39	1,99	1,394	0,02	1,41	1,99	1,41	0,02
		22,28	39,12	22,83	7,10	30,47	39,13	30,79	7,67
		6,76	65,52	56,9	14,06	67,67	95,76	94,05	62,79
2	Проставка	-0,13	-0,19	-0,13	0,00	0,13	0,19	0,13	0,00
		2,46	3,55	2,50	0,03	2,52	3,55	2,56	0,09
		4,57	11,61	11,16	3,58	5,86	11,80	11,45	4,96
3	Рабочее колесо IV ступени	1,29	1,84	1,29	0,02	1,31	1,84	0,00	0,02
		19,97	33,81	20,51	5,27	26,03	33,82	0,00	5,85
		45,40	29,34	22,99	52,99	117,22	151,66	0,00	111,94
4	Промежуточное кольцо	0,21	0,30	0,21	0,00	0,21	0,30	0,21	0,00
		19,97	33,81	20,51	5,27	26,03	33,82	0,00	5,85
		6,74	18,94	18,15	5,09	10,20	19,47	18,93	8,79
		2 опора							
		Угловое положение, град.							
		0	45	90	135	180	225	270	315
1	Рабочее колесо III ступени	1,33	1,93	1,33	0,08	1,48	2,05	1,48	0,08
		68,71	75,49	68,93	56,89	47,48	43,99	47,35	56,66
		48,35	83,32	79,15	44,82	18,88	5,29	6,12	21,24
2	Проставка	0,20	0,28	0,20	0,01	0,20	0,28	0,20	0,01
		1,01	0,44	0,38	0,99	1,00	0,43	0,40	0,99
		3,77	4,38	10,07	9,35	2,75	5,28	10,18	9,58
3	Рабочее колесо IV ступени	1,23	1,78	1,23	0,08	1,37	1,90	0,00	0,08
		67,78	73,35	68,00	57,62	49,27	46,13	0,00	57,39
		29,65	65,82	62,74	25,98	5,09	21,76	0,00	2,54
4	Промежуточное кольцо	0,32	0,45	0,31	0,01	0,32	0,45	0,31	0,00
		1,51	0,67	0,57	1,47	1,50	0,64	0,60	1,48
		7,20	7,00	17,52	16,15	4,07	9,74	17,86	16,88

Зависимости уровня виброскоростей на опорах ГТД от угловых положений узлов для угловых частот вращения ротора 50 и 110 Гц приведены на рисунке 4.25.

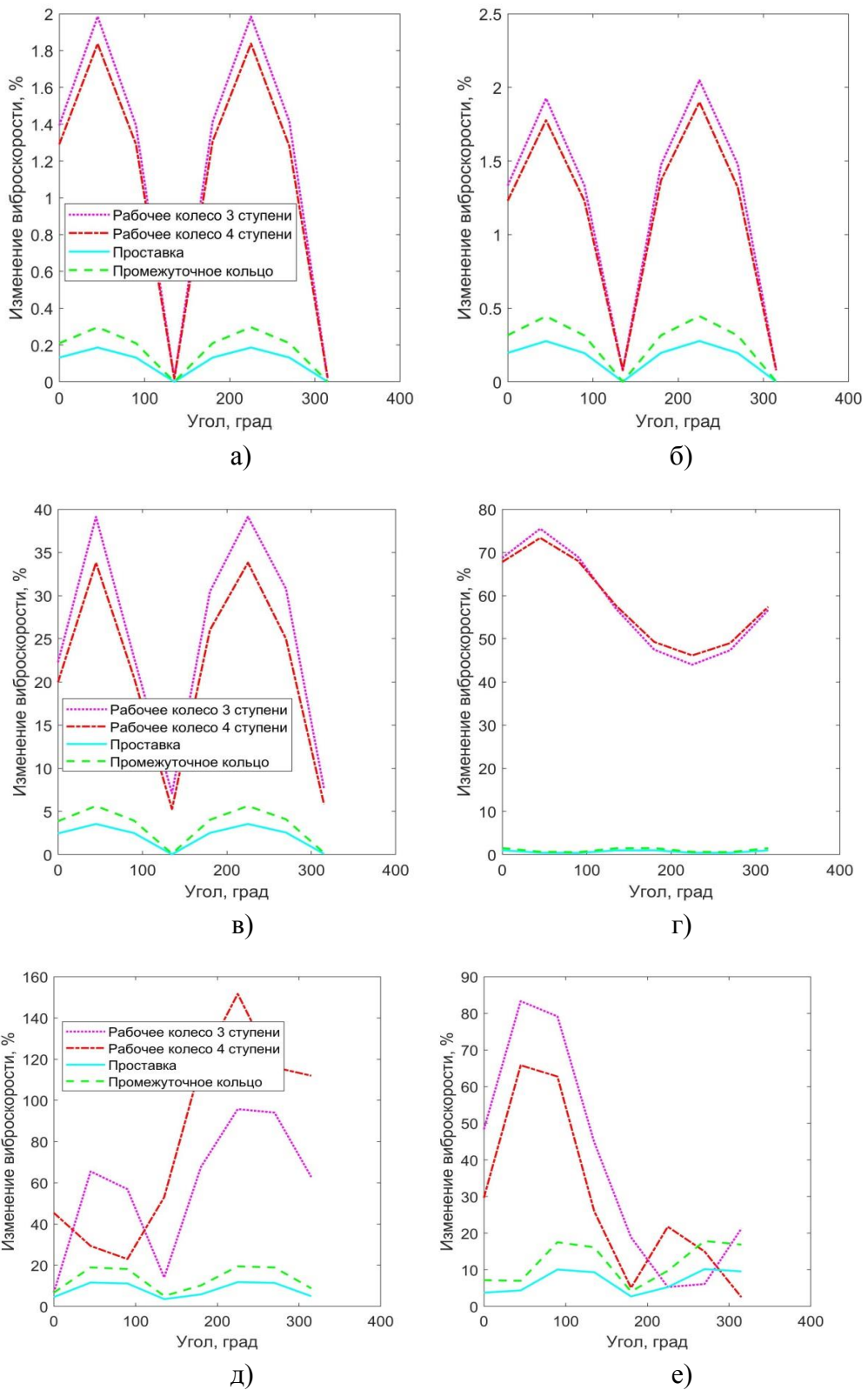


Рисунок 4.25 – Зависимость уровня виброскоростей ТНД в процентном отношении к принятому уровню вибраций от угловых положений узлов для опор:
 а) 20 Гц – первая опора; б) 20 Гц – вторая опора; в) 100 Гц – первая опора;
 г) 100 Гц – вторая опора; д) 160 Гц – первая опора; е) 160 Гц – вторая опора

Анализируя данные таблицы 4.5 можно отметить, что во всём диапазоне частот вращения ротора на величины виброскоростей его опор наибольшее влияние оказывают: вал, рабочие колёса III и IV ступеней. Наблюдается повышение возмущающей способности деталей и узлов ротора при увеличении частоты его вращения с единиц процентов при 20 Гц до десятков процентов при 100 Гц и около ста процентов при 160 Гц по отношению к принятому уровню вибраций.

Существенное влияние на величины вибраций оказывают: вал, рабочие колёса III и IV ступеней. Наибольшее влияние дисбалансов вала на уровень вибраций опор ротора можно объяснить его значительной протяжённостью и весом. Существенное влияние дисбалансов рабочих колёс III и IV ступеней на уровень вибраций опор ротора можно объяснить их значительной массой, моментом инерции и расположением вблизи 2-й опоры.

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что наибольшую результативность могут дать мероприятия по обеспечению и повышению точности балансировки рабочих колёс III и IV ступени, а также вала. Результаты исследований (см. рисунок 4.25) показывают, что выбор рационального углового положения позволяет уменьшить уровень вибраций на опорах ГТД на 25...30% по сравнению со сборкой ротора по нулевым меткам, поставленным в цехе.

Снижение уровня вибраций ГТД за счёт определения рационального относительного углового положения деталей и узлов роторов требует использования высокопроизводительных моделей. Сравнительно малая трудоёмкость прогнозирования уровня вибраций возможна за счёт использования регрессионных моделей, в том числе нейронных сетей. В последующем подразделе будет показано использование нейронных сетей для оценки уровня вибрации на опорах ГТД.

4.8 Разработка модели прогнозирования параметров вибрационного состояния ротора ГТД на основе использования технологий машинного обучения

Результаты моделирования, полученные в подразделе 4.5, использовались для обучения нейронной сети, позволяющей решать задачу регрессии. Входными данными нейронной сети являются дисбалансы и радиальные смещения деталей и узлов, входящих в рассматриваемый ротор. Выходными данными нейронной сети являются виброскорости на опорах ГТД.

Выполнялось обучение нейронных сетей и оценка погрешностей с помощью тестовых выборок, объём которых составлял 10% от общего количества элементов общей

выборки. Подбирались параметры нейронных сетей, при которых достигается лучшая точность, которые приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Погрешности прогнозирования нейронных сетей для опор ГТД

Параметр	Значения
P_{spread}	0,001; 0,005; 0,01; 0,05; 0,1; 0,5; 1; 2; 3
$N_{\text{н}_c}$	5; 10; 15; 20; 25; 30; 50; 70; 100
$N_{\text{э}}$	10; 15; 20; 25; 30; 50; 100

В таблице 4.7 приведены результаты рассчитанных параметров $\delta_{\text{доп}}$ и RSME для параметров виброскоростей на второй опоре для тестовой выборки. Рассматривалось два типа сетей: GRNN обобщённо-регрессионная нейронная сеть, имеющая два слоя – скрытый радиальный базисный слой и выходной линейный слой; DLP двухслойный перцептрон с сигмоидной функцией активации.

Таблица 4.7 – Погрешности прогноза для опор ГТД

Эксперимент	Тип сети	1 группа		Оптимальные параметры сети		
		$\delta_{\text{доп}}$	RSME	P_{spread}	$N_{\text{н}_c}$	$N_{\text{э}}$
1. Смещение диска и проставки	GRNN	0,51	8,607	0,1	–	–
	DLP	0,66	7,578	–	50	20
2. Остаточный дисбаланс на диске	GRNN	0,97	1,1181	0,001	–	–

Анализируя результаты, представленные в таблице 4.7, можно заключить, что сеть GRNN позволяет прогнозировать с меньшими ошибками по сравнению с сетью DLP. Следует отметить, что снизить погрешности прогнозирования нейронных сетей можно за счёт увеличения объёма обучающей выборки и подбора их альтернативных архитектур.

Полученные результаты позволяют говорить о возможности прогнозирования параметров вибрационного состояния посредством рассмотренного подхода. Погрешности прогноза напрямую связаны с величиной обучающей выборки и достоверностью моделирования. Обученная нейронная сеть, позволит применять результаты моделирования в производстве, за счет существенно (доли секунды) быстрой работы по сравнению с расчетами в САЕ-пакетах.

4.7 Выводы по главе 4

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

2. Для реализации предложенного метода разработана структурно-параметрическая модель ротора, которая служит для оценки дисбалансов и уровня вибраций роторов при учёте неуравновешенностей деталей.

3. Разработана численная модель оценки дисбалансов роторов в статической постановке, учитывающая отклонения расположения собираемых деталей относительно оси ротора.

4. С использованием разработанной модели проведено исследование влияния погрешностей расположения деталей и узлов ротора на величину его дисбаланса. Получены статистические характеристики дисбаланса ротора турбины низкого давления при учёте погрешностей расположения его деталей и узлов.

5. На экспериментальном стенде выполнена верификация разработанного метода снижения вибраций роторов. Разработан разгонно-балансирующий стенд и имитатор рассматриваемого ротора турбины низкого давления, позволяющий воспроизводить последовательность выполнения его балансировки и сборки. Проведены теоретико-экспериментальные исследования, показывающие удовлетворительную сходимость с погрешностью 27% теоретических и экспериментальных исследований. Исследования подтвердили возможность снижения уровня вибраций роторов разработанным методом.

6. Разработан алгоритм конечно-элементного моделирования ротора турбины низкого давления для оценки вибраций на опорах ГТД с использованием действительных моделей комплектующих деталей и узлов. Выполнены теоретические исследования зависимостей вибрационного состояния ротора, геометрической точности его сборочных параметров и неуравновешенностей деталей.

ГЛАВА 5 ПРАКТИКА СОЗДАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОБЛЕМНО–ОРИЕНТИРОВАННЫХ ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ СБОРКИ КОМПРЕССОРА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ГТД

Глава посвящена описанию практики использования действительных моделей для совершенствования процесса сборки компрессора низкого давления ГТД. Выполнены экспериментальные исследования по анализу геометрической точности деталей ротора низкого давления. Исследования включали измерения геометрии поверхностей деталей и обработку их результатов с целью функционально-статистического обобщения величин отклонений формы исследуемых деталей. Результаты экспериментальных исследований использовались при моделировании сборки роторов из комплектов деталей.

Приведено описание модели, предназначенной для определения оптимальных условий сборки узлов роторов ГТД. Оптимизации при сборке роторов подвергают относительные угловые положения деталей ротора. Определение оптимальных условий сборки роторов выполняется с использованием трёх критериев, характеризующих:

- соответствие заданным техническим показателям качества сборки узла;
- соответствие заданным требованиям к рабочим и эксплуатационным параметрам изделия;
- компромиссное решение по двум упомянутым критериям.

Производились теоретические исследования зависимостей торцевых и радиальных биений деталей от влияния отклонений формы их сопрягаемых поверхностей для ротора компрессора низкого давления. Выполнялись теоретико-экспериментальные исследования геометрической точности ротора компрессора низкого давления, включающие: измерение и создание действительных моделей комплекта деталей ротора, его сборку при разных угловых положениях деталей, измерение сборочных параметров, моделирование процесса сборки. Оценивалась точность сборочных параметров ротора, полученных по результатам моделирования с использованием комплекта действительных моделей деталей в сравнении с их измеренными значениями. Определялись рациональные угловые положения деталей ротора компрессора низкого давления с использованием модели определения оптимальных условий сборки. Описаны две инженерные методики, базирующиеся на разработанных теоретических положениях исследования:

- создание элементов цифрового производства ГТД на операциях сборки;
- технологические решения на рабочих местах контролеров деталей и сборщиков роторов.

5.1 Теоретико-экспериментальные исследования геометрической точности деталей каскада низкого давления газотурбинного двигателя

Основными решаемыми задачами в настоящем разделе являются:

- разработка методики статистической оценки отклонений формы;
- выявление характерных параметров отклонений для прогнозирования их наиболее вероятных и предельных значений в пределах партии деталей для данных технологических условий.

Информация об отклонениях формы поверхностей может использоваться для определения зависимостей геометрических сборочных параметров ротора при учёте отклонений формы поверхностей его деталей и отладке математических моделей сопряжений, а также для определения рациональных условий выполнения сборки.

Анализировались отклонения формы поверхностей сопряжения у деталей роторов турбины и компрессора низкого давления ГТД. Для этой цели проводились измерения следующих деталей: проставок, валов, промежуточных колец. Использовались координатно-измерительные машины DEA Global, имеющие паспортные характеристики погрешности, не хуже:

$$MPE_L = 1,7 + L/333 \text{ мкм}, \quad (5.1)$$

где MPE_L – предельно допускаемая погрешность измерения длины, мкм;

L – габарит измеряемой детали или узла, мм.

Информация об отклонениях формы поверхностей применялась для решения следующих задач:

- выбор минимальной достаточности объёма измеряемых точек на поверхностях деталей;
- уточнение математической модели для определения оптимальных условий выполнения сборки узлов;
- определения топологии зависимостей геометрических сборочных параметров ротора от угловых положений деталей при учёте отклонений формы их поверхностей.

Обработка результатов измерений выполнялась по методике, блок-схема которой приведена на рисунке 5.1.

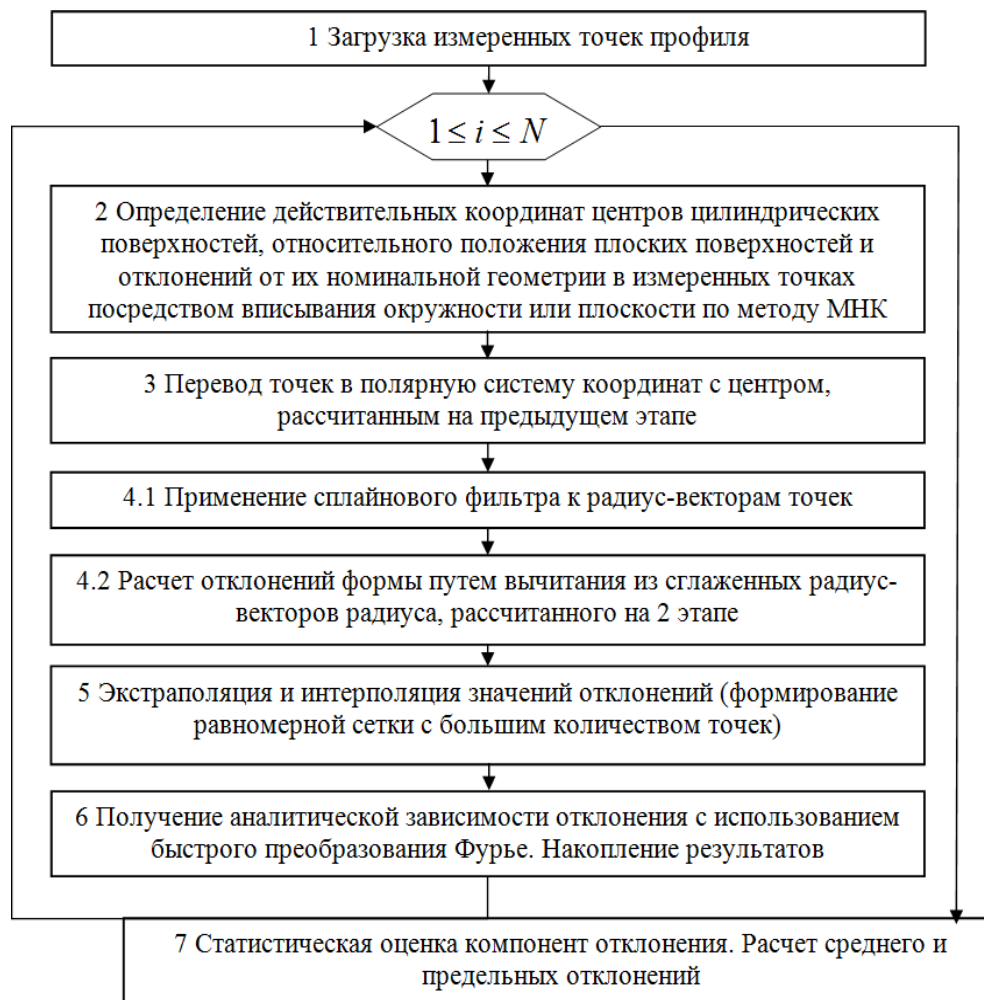


Рисунок 5.1 – Блок-схема методики анализа отклонений формы поверхностей ДСЕ

Сопряжение деталей роторов турбины и компрессора низкого давления ГТД осуществляется по цилиндрическим и торцевым поверхностям. Кратко опишем содержание этапов методики выполнения обработки статистических данных.

На первом этапе производится загрузка массивов точек, относящихся к исследуемым поверхностям. Измеренные данные для деталей типа тел вращения могут представляться в виде плоских и круговых сечений соответственно цилиндрических и торцевых поверхностей. Анализ отклонений формы поверхностей выполняется посредством N итераций, каждая из которых обозначается буквой i .

На втором этапе массив измеренных точек соответствующего элемента аппроксимируется заменяющим элементом «окружность» (для отверстий и валов) или «плоскость» (для торцевых поверхностей) по методу наименьших квадратов. Сохраняются параметры заменяющих элементов. Отклонение формы поверхностей определяется путём нахождения разности между точками номинального и реального профиля, соответственно заменяющего элемента и измеренной точки поверхности.

На третьем этапе производится преобразование координат точек измеренных поверхностей из декартовой в полярную систему координат с уточненным по методу МНК центром при сохранении плоскости измерений.

На четвертом этапе производится аппроксимация дискретных значений отклонений формы в точках поверхности с использованием сплайновых фильтров. Для отверстий сначала производится сглаживание радиус-векторов точек, а затем рассчитываются отклонения радиус-векторов точек от среднего значения радиуса. Для исследования необходимо измерение выборки деталей одного типоразмера в одних и тех же точках. Однако ввиду того, что реальная геометрия деталей отлична одна от другой, измеряемые координаты точек (полярный угол) варьируются в пределах выборки. По этой причине использовалась технология сглаживающих сплайновых фильтров [139]. Сглаживающий сплайн $\hat{\varepsilon}$ множества отклонений ε минимизирует выражение:

$$p_c \sum_{i=1}^n w_i (\varepsilon(u_i) - \hat{\varepsilon}(u_i))^2 + (1 - p_c) \int \left(\frac{\partial^2 \hat{\varepsilon}(u)}{\partial u^2} \right)^2 du \rightarrow \min, \quad (5.2)$$

где (u, ε) – аппроксимируемые данные, включающие угловое положение рассматриваемой точки и величина отклонения в ней, также представляемые радиус-вектором;

p_c – параметр сглаживания $p_c \in [0,1]$;

\bar{w}_i – вектор весов, по умолчанию принят равным единичному вектору.

На пятом этапе производится кусочно-полиномиальная интерполяция отклонений. Необходимость выполнения данного этапа обуславливается тем, что измеренные координаты точек расположены не с равномерным шагом по поверхности. Равномерное расположение точек может быть получено посредством использования кусочно-полиномиального сплайна, описывающего измеренные данные. Используемая формула сплайна идентичная формуле, применяемой для фильтрации на четвертом этапе. Использовалась интерполяция кубическими сплайнами. Между любыми двумя соседними точками с координатами (u, ε) функция отклонений интерполируется кубическим полиномом $f(x)$, его коэффициенты на каждом интервале определяются из условий сопряжения в точках:

$$\begin{cases} f_i = \varepsilon_i, \\ f'(x_i - 0) = f'(x_i + 0), \\ f''(x_i - 0) = f''(x_i + 0), i = 1, 2, \dots, n - 1. \end{cases} \quad (5.3)$$

где n – число измеренных точек.

На границе участка задаются условия:

$$\begin{cases} f'''(x_0) = 0, \\ f'''(x_n) = 0. \end{cases} \quad (5.4)$$

Определяются параметры кубического полинома вида:

$$f(x) = a_i + b_i \cdot (x - u_i) + c_i \cdot (x - u_i)^2 + d_i \cdot (x - u_i)^3. \quad (5.5)$$

Общее число неизвестных коэффициентов равно $4n$.

На основании тех же кубических уравнений производится экстраполяция функции. Последовательность выполнения сплайн-экстраполяции описана в работе [63] на примере кривых в плоскости. На рисунке 5.2 представлены результаты выполнения предыдущих этапов методики анализа отклонения формы центрального посадочного отверстия детали «Вал задний» диаметром 240 мм и допуском 0,029 мм.

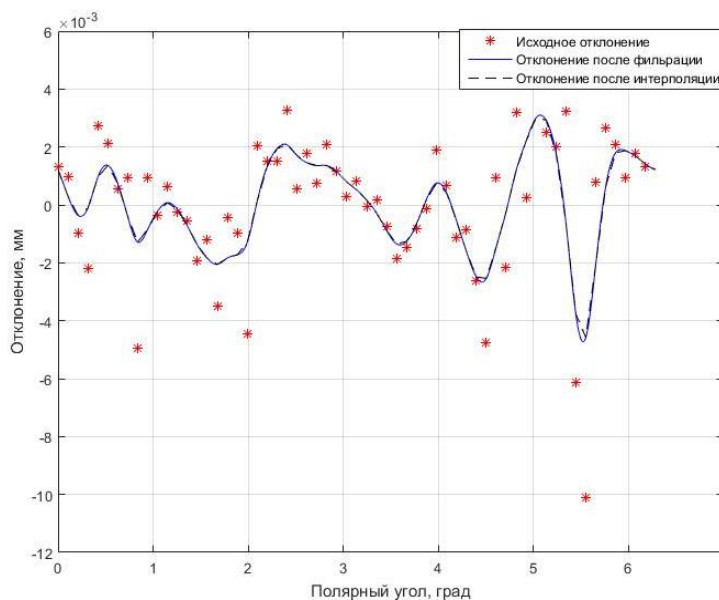


Рисунок 5.2 – Отклонение формы центрального отверстия детали «Вал задний»

На шестом этапе подбирался гармонический ряд, при помощи которого можно с достаточной точностью описать дискретный ряд данных отклонения формы, полученный на предыдущих этапах. Гармонический ряд имеет следующий вид:

$$\delta_n(x) = \sum_{k=1}^{+\infty} A_k \sin(k \cdot (2 \cdot \pi \cdot x / \tau + \theta_k)) + (1 + (-1)^k) \cdot \pi / 2, \quad (5.6)$$

где A_k – набор амплитуд членов гармонического ряда;

θ_k – фазы членов гармонического ряда;

τ – длина кривой;

x – текущая длина кривой, описанной полиномом (5.5), от начальной до текущей точки.

В случае использования полярной системы координат для представления кривых параметр x является полярным углом, а τ периодом в представленной формуле (5.6).

Получение параметров ряда выполнялось с использованием дискретного преобразования Фурье функции $f(x)$. Используя разложение (5.6), можно определить амплитуды и фазы длин волн, отвечающих за различные виды погрешностей, имеющих периодический характер. На основе полученной информации с помощью разложения Фурье рассчитывалась спектральная плотность мощности, задающая распределение мощности дискретного ряда сигнала по частотам:

$$PSD(f) = \frac{\Delta x}{n} \cdot |zf(f)|^2, \quad (5.7)$$

где $zf(f)$ – дискретное преобразование Фурье функции (5.5).

В результате вычислений формируется график с всплесками по оси энергии, как показано на рисунке 5.3.

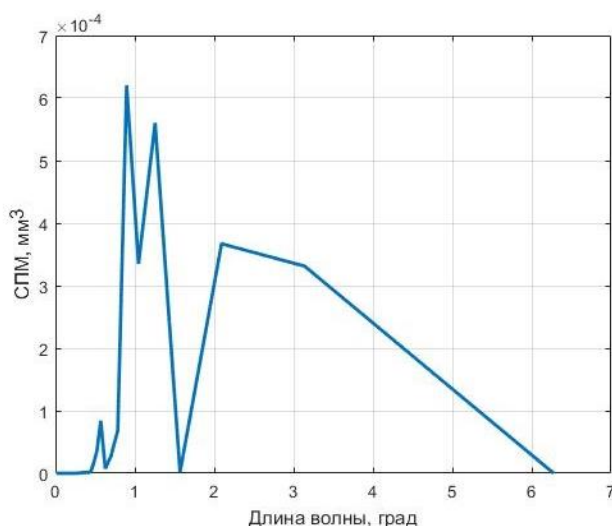


Рисунок 5.3 – Спектральная плотность мощности для цилиндрической поверхности вала

Параметры спектральной плотности мощности могут использоваться для оценки значимости гармонических составляющих в отклонении формы. Минимальное количество значимых членов гармонического ряда выбиралось с использованием критерия Фишера [234]. При этом погрешность описания систематического отклонения формы поверхностей при помощи гармонического ряда не превышала величину $\xi = 0,004$ мм. Первые восемь членов ряда оказались необходимым и достаточным количеством для выполнения данного условия. Выполнение анализа и получение амплитуд, фаз и частот производилось в пакете MATLAB. На рисунке 5.4 представлено отклонение формы центрального посадочного отверстия детали «Вал задний» и это же отклонение, представляемое при помощи гармонической функции (5.6).

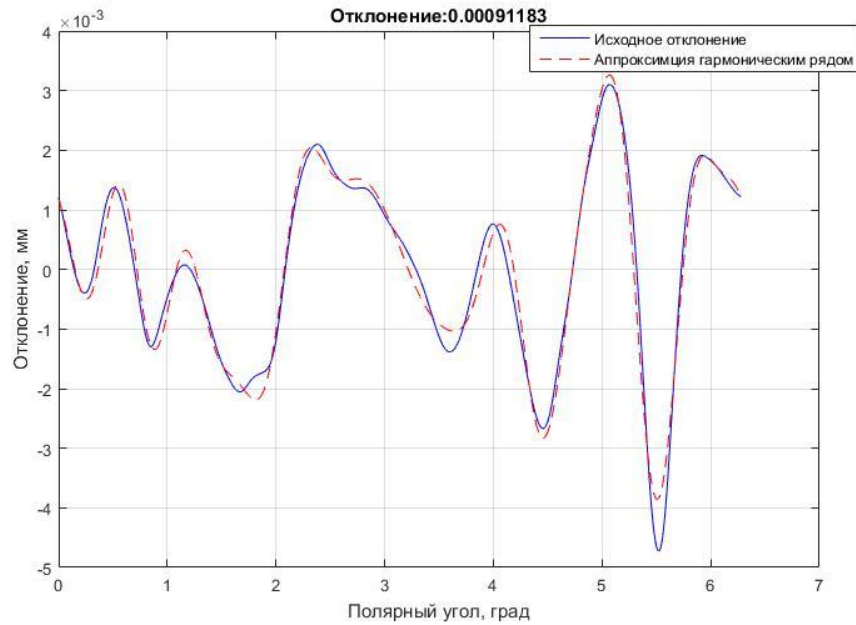


Рисунок 5.4 – Отклонение формы и его аппроксимация гармоническим рядом

Этапы методики со второго по шестой повторяются для всех поверхностей одного типа. Производится сохранение результатов параметров Фурье-разложения.

На седьмом этапе производится статистическая оценка величин амплитуд A_k гармонического ряда (5.6), определение вида законов распределения. Проверка соответствия генеральной совокупности значений отклонения формы поверхности нормальному закону производится с использованием теста Лиллиефорса [157]. Если распределение соответствовало нормальному закону, то определялись числовые характеристики математического ожидания μ_{A_k} и дисперсии D_{A_k} величины амплитуд для нормального закона. Если нулевая гипотеза о соответствии нормальному закону по тесту Лиллиефорса отвергалась, то производилось нормирование значений выборки величины амплитуд в диапазоне $[0,1]$ и рассчитывались параметры бета-распределения. Верхняя A_{k_max} и нижняя A_{k_min} оценки величин амплитуд с доверительной вероятностью 99,73% рассчитывались по правилу трёх σ по формулам:

$$\begin{aligned} A_{k_max} &= \mu_{A_k} + 3 \cdot \sqrt{D_{A_k}}, \\ A_{k_min} &= \mu_{A_k} - 3 \cdot \sqrt{D_{A_k}}. \end{aligned} \quad (5.8)$$

Если величина A_{k_min} при расчете получалась отрицательной, то она приравнивалась к 0. Значения частот k ряда (5.6) для формирования средней, верхней и нижней оценок отклонений формы выбирались из наиболее часто встречающихся при разложении измеренных данных с помощью быстрого преобразования Фурье.

В результате применения методики формируются выражения в виде гармонических рядов (5.6), позволяющих описать ожидаемые величины средних, минимальных и максимальных отклонений формы в виде соответствующих функций для поверхностей деталей одного типа. Результаты исследований приведены в приложении 3 и включают в себя средние и предельные отклонения формы геометрических параметров деталей.

В ходе выполнения анализа результатов получено обобщение о геометрических отклонениях формы выборки исследуемых деталей. Для одноимённых поверхностей выборки деталей определены характер и топология отклонений на основе выявления доминирующих гармоник (частот, фаз) гармонического ряда, описывающего отклонения в тригонометрическом базисе. На основании результатов исследований отклонений формы определены интервальные оценки погрешностей с доверительной вероятностью 99,73%. Полученные результаты описывают статистические характеристики геометрических отклонений технологических процессов изготовления серийных деталей и позволяют прогнозировать наиболее вероятную величину отклонения и его предельные значения для изготовления партии деталей для данных технологических условий. Анализ характера отклонений позволяет выявлять причины существенных геометрических отклонений, а также предлагать мероприятия по их снижению. Результаты исследований будут использованы для моделирования сборочных процессов комплектов деталей изделий и для решения последующих задач.

Следующий подраздел содержит описание модели для определения оптимальных условий сборки роторов.

5.2 Модель для определения оптимальных условий сборки роторов

Геометрические отклонения деталей и их неуравновешенность оказывают значительное влияние на сборочные параметры собираемых роторов. Сборка роторов ГТД зачастую выполняется на условиях неполной взаимозаменяемости. Одним из способов достижения требуемых сборочных параметров является использование различных вариантов комплектации деталей из имеющегося запаса, компенсации погрешностей сборки посредством выбора размеров деталей компенсаторов, а также определения относительных угловых положений деталей, обеспечивающих взаимную компенсацию их геометрических погрешностей и неуравновешенностей. Определение оптимальных условий выполнения сборки роторов посредством перебора вариантов на практике не представляется возможным, поскольку количество комбинаций может составлять миллионы вариантов. Актуальной является задача определения оптимальных условий

выполнения сборочных операций. В данном подразделе описывается математическая модель для определения оптимальных условий выполнения операции сборки узлов роторов ГТД.

Определим множество параметров операции сборки:

$$PP = \{\alpha p_1, \alpha p_2, \alpha p_3, \dots, \alpha p_i, rp_1, rp_2, \dots, rp_j\}, \quad (5.9)$$

где αp_i – относительное угловое положение i -й детали;

rp_j – j -й размерный параметр деталей-компенсаторов.

Каждый вариант сборки описывается множеством S , компоненты которого содержат значения указанных параметров:

$$s = (\alpha P_1, \alpha P_2, \alpha P_3, \dots, \alpha P_i, rP_1, rP_2, \dots, rP_j). \quad (5.10)$$

Необходимо отметить, что набор возможных значений параметров процесса сборки ограничен конструкторской документацией. Например, для параметров, характеризующих относительное угловое положение деталей, указываются их допустимые значения, определяемые конструктивными особенностями деталей, включающих число равномерно расположенных крепёжных отверстий. Таким образом, формируется множество возможных состояний сборки:

$$\begin{aligned} S &= \{s : \alpha P_i \in V_{\alpha p_i}, rP_j \in V_{rp_j}\}; \\ V_{\alpha p_i} &= \{\alpha P_i^1, \alpha P_i^2, \dots, \alpha P_i^{n_i}\}; \\ V_{rp_j} &= [rP_j^{\min}, rP_j^{\max}]. \end{aligned} \quad (5.11)$$

Очевидно, что даже при фиксированных значениях размерных параметров количество элементов в данном множестве очень велико и перебор всех различных вариантов сборки на практике неосуществим.

После выполнения сборки ротора низкого давления производится измерение его контактирующих поверхностей и определяется множество параметров качества сборки:

$$QP = \{qp_1, qp_2, \dots, qp_n\}. \quad (5.12)$$

Качество сборки изделия описывается вектором, содержащим вычисленные значения указанных параметров:

$$q = (qP_1, qP_2, \dots, qP_n). \quad (5.13)$$

Во время стендовых испытаний изделия и его эксплуатации фиксируются значения эксплуатационных параметров:

$$EP = \{ep_1, ep_2, \dots, ep_k\}, \quad (5.14)$$

$$r = (eP_1, eP_2, \dots, eP_k). \quad (5.15)$$

В качестве рабочих и эксплуатационных параметров могут выступать такие параметры как суммарный дисбаланс, виброскорости на опорах, ожидаемые перемещения ротора в различных сечениях (в случае гибкого ротора), реакции сил на опорах ротора.

Нахождение оптимального варианта сборки предлагается выполнять исходя из трёх вариантов, представленных критериями.

Первый вариант предполагает наилучшее соответствие заданным параметрам качества сборки, для его нахождения минимизируется критерий:

$$K_q = \sum_{j=1}^n w_j \frac{|qP_j - qP_j^*|}{T_{qp_j}} \rightarrow \min, \quad (5.16)$$

где qP_j^* – номинальное значение параметра qp_j ;

T_{qp_j} и w_j – соответственно допуск и вес важности на j -й параметр качества сборки.

Весовые коэффициенты задаются конструктором и технологом.

Второй вариант определяет степень соответствия эксплуатационных параметров заданным требованиям изделия:

$$K_r = \sum_{j=1}^k v_j \frac{|eP_j - eP_j^*|}{T_{ep_j}} \rightarrow \min, \quad (5.17)$$

где eP_j^* – номинальное значение параметра ep_j ;

T_{ep_j} и v_j – соответственно допуск и вес важности на j -й эксплуатационный параметр ротора.

Третий вариант является смешанным и предусматривает компромиссное решение по достижению наиболее значимых параметров качества и эксплуатационных параметров. Используется сводный критерий:

$$K_\Sigma = \nu_q K_q + \nu_r K_r \rightarrow \min, \quad (5.18)$$

где ν_q и ν_r – соответственно коэффициент значимости представленных критериев.

Значимыми геометрическими параметрами качества сборки могут являться радиальные биения дисков, оказывающие существенное влияние на неравномерность радиального зазора между торцами лопаток и статором. Для более значимых геометрических параметров устанавливаются большие величины коэффициентов значимости. Одним из показателей качества может служить оценка неравномерности площади проходного сечения межлопаточных каналов турбин и компрессоров, которая оказывает существенное влияние на газодинамическую эффективность лопаточных машин

и газотурбинного двигателя. Могут быть сформулированы формальные условия, обеспечивающие достижение наилучших значений показателей качества изделий.

Определение оптимальных параметров сборки роторов выполняется с применением методов и моделей прогнозирования геометрических размерных связей, а также оценивания величин дисбалансов и виброскоростей, предложенных в главах 2, 3 и 4 диссертационного исследования. Определение оптимальных условий выполнения сборочных операций формулируется как задача нелинейной оптимизации, для решения которой могут использоваться различные методы оптимизации. Выбор метода оптимизации определяется априорной информацией о топологии функций, которые устанавливают взаимосвязь между изменяемыми условиями выполнения сборки и критериями оптимизации. Получение априорной информации о топологии названных функций требует выполнения исследований зависимостей между погрешностями комплекта деталей ротора и его сборочными параметрами. Следующий подраздел посвящён теоретико-экспериментальным исследованиям геометрической точности сборочных параметров ротора низкого давления ГТД. Применение модели будет рассмотрено в другом подразделе.

5.3 Теоретико-экспериментальные исследования геометрической точности сборочных параметров компрессора низкого давления

В текущем подразделе приведены последовательность и результаты исследований геометрической точности сборочных параметров компрессора низкого давления. Выполняются теоретические исследования влияния величин геометрических отклонений деталей на сборочные параметры ротора компрессора низкого давления. Приводятся последовательность и результаты теоретико-экспериментальных исследований зависимости сборочных параметров рассматриваемого ротора от относительных угловых положений комплекта деталей. Исследования выполняются посредством разработки и использования комплекта действительных моделей. Формирование действительных моделей выполняется на основе результатов статистических исследований, проведенных в подразделе 5.1, а также с использованием результатов геометрических измерений деталей ротора компрессора низкого давления. Моделирование сборочных размерных связей и оценка значений сборочных параметров выполнялось с использованием методов и моделей, приведенных в главах 2 и 3. Заключительная часть подраздела содержит изложение последовательности и результатов определения оптимальных условий сборки компрессора низкого давления, включающих взаимные угловые положения деталей. Оптимальные

условия сборки компрессора низкого давления определяются с использованием модели, приведенной в подразделе 5.2. Рассматривается применение трёх вариантов критериев: 1) исходя из наилучшего соответствия заданным геометрическим сборочным параметрам; 2) исходя из достижения наилучшего распределения дисбалансов ротора; 3) в соответствии с компромиссным решением по достижению наиболее значимых геометрических сборочных параметров и требований к вибрационному состоянию ротора.

Последующий подраздел содержит описание конструкции и технологического процесса сборки рассматриваемого ротора.

5.3.1 Конструкция и технологический процесс сборки ротора

Рассматриваемый ротор компрессора низкого давления является барабанно-дисковым, трёхступенчатым и включает следующие основные детали и узлы: передний и задний валы, рабочие колеса первой, второй и третьей ступеней, по два внутренних и наружных промежуточных кольца, соответственно между первой и второй, а также второй и третьей ступенями. Эскиз ротора компрессора низкого давления приведен на рисунке 5.5.

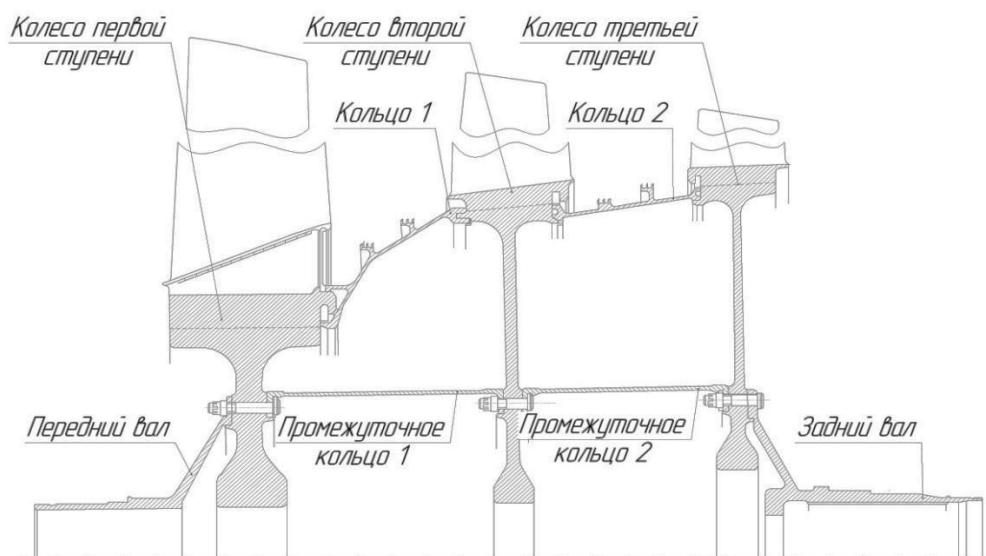


Рисунок 5.5 – Эскиз ротора компрессора низкого давления

Детали ротора соединяются болтами, центрируются радиальными посадочными поверхностями. Соединения сопрягаемых поверхностей беззазорное, у торцевых поверхностей достигается за счет силового воздействия болтовых соединений, а радиальных за счет гарантированного натяга равного 0,03...0,15 мм. Посадочные поверхности имеют узко-кольцевую форму. Радиальные поверхности имеют номинальную цилиндрическую форму, торцевые – номинальные плоскости. Контролируемыми

сборочными параметрами ротора компрессора низкого давления являются радиальные и торцевые биения дисков и валов.

Для достижения требуемых сборочных параметров используют метод неполной взаимозаменяемости. В роторах барабанно-дисковой конструкции несоосность каждого из дисков зависит от несоосности всех других дисков (звеньев роторного пакета), то есть является накопленной, поэтому ко всем деталям предъявляются жёсткие требования по размерам и формам. Перед сборкой все детали осматриваются для выявления загрязнений и наличия механических повреждений, но при этом допускаются мелкие риски, забоины, заусенцы. Сборку ротора компрессора низкого давления можно условно разделить на три основных этапа.

Первым этапом сборки является соединение следующих деталей: задний вал, диск третьей ступени и промежуточное кольцо. Для этого промежуточное кольцо 6 устанавливают на технологическую подставку поверхностью T_3 . Затем поочередно запрессовывают колесо третьей ступени 8 и задний вал 9 . Детали стягивают болтами. После вышесказанных операций выполняется контроль фактического размера l_3 , торцевого и радиального биений поверхностей промежуточного кольца $6T_3$ и R_3 соответственно.

На втором этапе собранные детали устанавливают на технологическую оснастку по базам B и $Ж$. Следующие операции включают установку кольца 7 , колеса второй ступени 5 , промежуточного кольца 3 . Затем выполняется контроль торцевых и радиальных биений промежуточного кольца.

На третьем этапе сборки выполняется установка кольца 4 , колеса первой ступени 2 и переднего вала 1 . Контролируются линейные размеры l , l_1 , l_2 , торцевые и радиальные биения.

Затяжку болтовых соединений проводят методом «крест-накрест» в 3 перехода:

– предварительная затяжка с моментами $2,5_{-0,5}$, $4_{-0,5}$, $5,4_{-0,5}$, $2,5_{-0,5}$ кгс·м;

– проверочная затяжка на страгивание с моментом $5,4_{-0,5}$ кгс·м;

– окончательная затяжка проводится после выдержки собираемого узла в течение 30...40 минут с моментом $4,5_{-0,5}$ кгс·м.

Данные мероприятия необходимы для обеспечения равномерной затяжки и компенсации самовольного ослабления, так как в процессе наворачивания гаек и после его завершения происходит пластическая деформация и перемещение всех элементов сборного пакета.

Во время сборки для достижения требуемых значений сборочных параметров, допускается производить разворот сборочных единиц и деталей вокруг оси, при этом

сборщики могут производить как частичную, так и неполную разборку собираемого ротора. Для облегчения монтажа детали могут нагреваться до 100 °С.

После сборки основных элементов роторного пакета выполняется его балансировка путём добавления балансировочных грузов в предусмотренных плоскостях коррекции.

Существующая технология предусматривает выбор наилучшего взаимного положения за счёт выполнения множества пробных ложных сборок, что приводит к существенному возрастанию трудоёмкости. В производственных условиях выполнение достаточного количества ложных сборок не производится, соответственно собираемый ротор не характеризуется наилучшим качеством сборки при имеющихся деталях и сборочных единицах. Таким образом, существует резерв повышения точности за счёт цифрового выбора наилучшего взаимного углового положения деталей ротора, при котором достигаются наименьшие погрешности сборочных параметров и наилучшее распределение дисбалансов.

5.3.2 Теоретические исследования влияния геометрической точности деталей на точность сборочных параметров

Теоретические исследования выполнялись с целью выявления зависимостей между геометрическими погрешностями деталей ротора компрессора низкого давления и его сборочными параметрами. Результаты исследований позволят определить допустимые величины геометрических отклонений формы поверхностей деталей, при которых сборочные параметры ротора будут находиться в пределах заданных требований. Исследования производились в порядке выполнения основных этапов технологического процесса сборки компрессора низкого давления ГТД.

На первом этапе проводились теоретические исследования со сборкой действительных моделей трёх деталей, построенных по результатам теоретико-экспериментальных исследований, выполненных в пункте 5.1. С целью изучения влияния интересующих факторов и уменьшения ресурсоёмкости вычислений геометрия поверхностей действительных моделей деталей, не участвующих в сопряжениях и не используемых в качестве контрольных, упрощалась. Создание упрощённой номинальной модели диска первой ступени показано на рисунке 5.6.

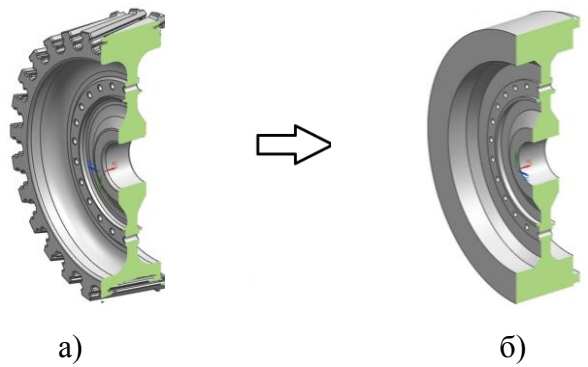


Рисунок 5.6 – Номинальная (а) и упрощённая (б) модели диска первой ступени компрессора низкого давления

Поверхности R_2 , T_1 модели промежуточного кольца 2, показанные на рисунке 5.7, перестраивались в соответствии с исследуемыми отклонениями формы. Форма отклонения представляет собой эллипс с его малой фиксированной $F_1 = \text{const} = 250$ мм и большой изменяемой $F_2 = \text{var} = \Delta_{\uparrow p} + 250$ мм полуосями. Рассматривались следующие величины отклонений поверхности R_2 промежуточного кольца 2, измеряемые в мм: 0,01, 0,02, 0,04, 0,06, 0,1. При заданных значениях полуосей эллипса в соединении ожидается посадка с натягом. На рисунке 5.7, а приведено отклонение формы цилиндрической поверхности R_2 .

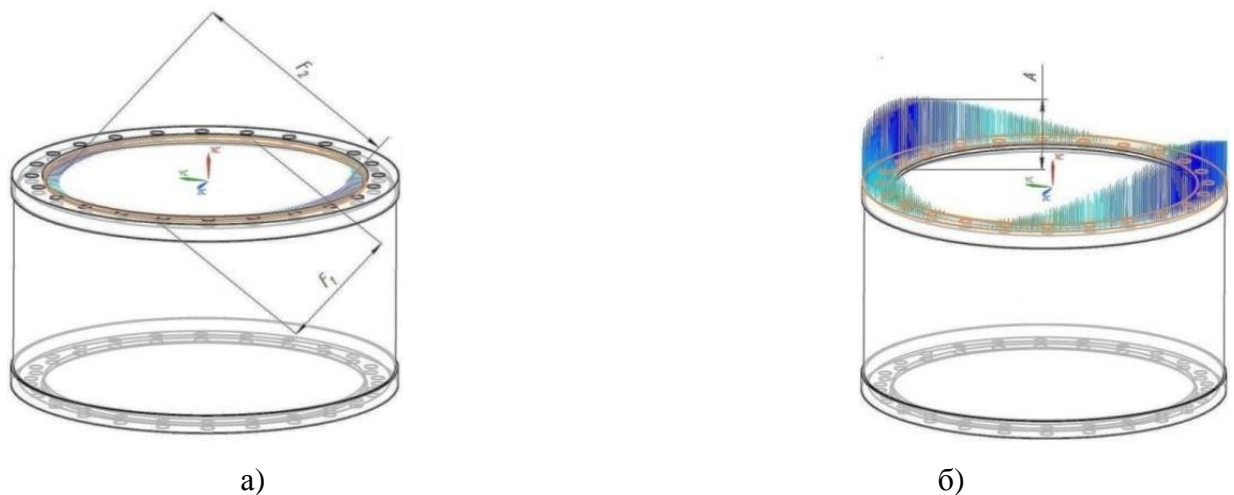


Рисунок 5.7 – Отклонение формы цилиндрической R_2 (а) и торцевой T_1 (б) поверхностей промежуточного кольца 2

Торцевая поверхность T_1 промежуточного кольца 2 задавалась в соответствии с формой, представленной на рисунке 5.7, б. Рассматривались следующие амплитуды отклонений формы торцевой поверхности кольца 2 в мм: 0,01, 0,02, 0,04, 0,06, 0,1.

Исследование выполнялось для моментов затяжки болтовых соединений 25, 40, 45, 50, 55 Н·м, которые выдерживаются в ходе затяжки ротора компрессора низкого давления. Использование нескольких усилий затяжки болтовых соединений рассматриваемого ротора может дать понимание того, как изменяются сборочные параметры детали в процессе затяжки. Контролируемыми сборочными параметрами являются величины торцевого $\Delta_{\uparrow T_3}$ и радиального $\Delta_{\uparrow R_3}$ биений поверхностей T_3 и R_3 соответственно. В результате моделирования получен следующий вид деформаций деталей первого этапа сборки ротора компрессора низкого давления и промежуточного кольца 2, соответственно приведенных на рисунках 5.8 и 5.9.

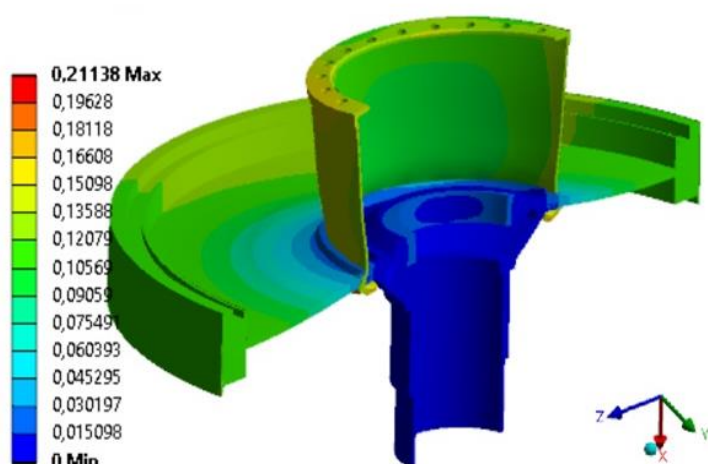


Рисунок 5.8 – Деформации деталей в первом этапе сборки ротора КНД

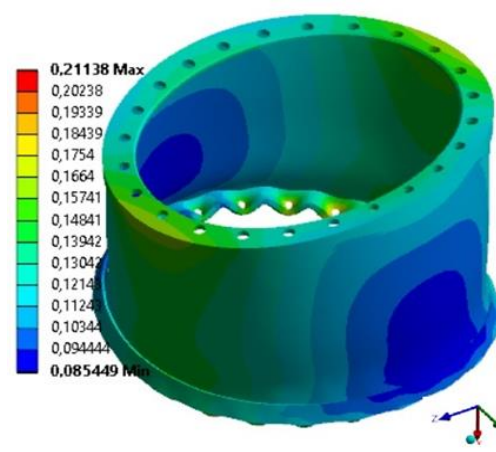


Рисунок 5.9 – Деформации промежуточного кольца 2

Деформации на рисунках 5.8 и 5.9 увеличены в 200 раз для наглядности. Результаты, приведенные на рисунках 5.8 и 5.9, соответствуют значениям отклонений формы поверхностей T_1 и R_2 равным 0,1 мм и моменту затяжки болтовых соединений 45 Н·м. В процессе моделирования учитывался материал деталей, указанный в чертежах деталей. Выявлено, что усилие затяжки болтовых соединений в пределах рассматриваемого ряда моментов не оказывает существенного влияния на величины торцевого $\Delta_{\uparrow T_3}$ и радиального $\Delta_{\uparrow R_3}$ биений поверхностей T_3 и R_3 соответственно. Выполнялись исследования влияния величин отклонения формы торцевой и радиальной поверхностей при моменте затяжки болтовых соединений равном 45 Н·м, результаты которых представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Влияние отклонения формы на погрешность сборочных параметров

№	Заданные отклонения поверхности, мм		Величина биения, мм	
	Торцевой T_1 , мм	Радиальной R_2 , мм	$\Delta_{\uparrow T_3}$	$\Delta_{\uparrow R_3}$
1	0	0,01	0,0003	0,0051
2	0	0,02	0,0013	0,0109
3	0	0,04	0,0017	0,0157
4	0	0,06	0,0023	0,0204
5	0	0,1	0,0041	0,0291
6	0,01	0	0,0057	0,0451
7	0,02	0	0,0131	0,0635
8	0,04	0	0,0233	0,1061
9	0,06	0	0,0325	0,1428
10	0,1	0	0,0548	0,2269

Из таблицы 5.1 видно, что величины моделируемых отклонений формы торцевой поверхности приводят к существенному увеличению радиального и торцевого биений. Можно сделать вывод о том, что особое внимание следует уделять выдерживанию требований к торцевым биениям сопрягаемых поверхностей промежуточных колец.

Выполнены исследования по оценке влияния углового расположения промежуточного кольца 2 на сборочные параметры ротора. В ходе исследований отклонение формы торцевой поверхности промежуточного кольца 2 было повернуто относительно диска на 90 градусов, как показано на рисунке 5.10.

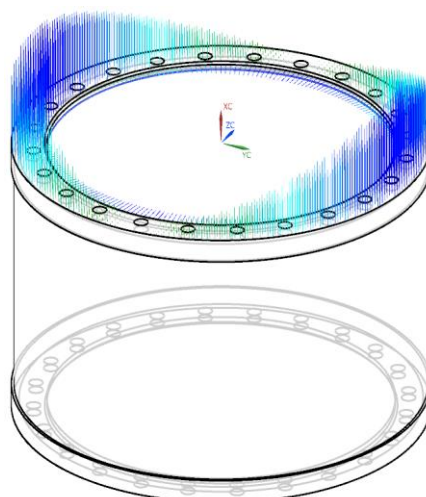


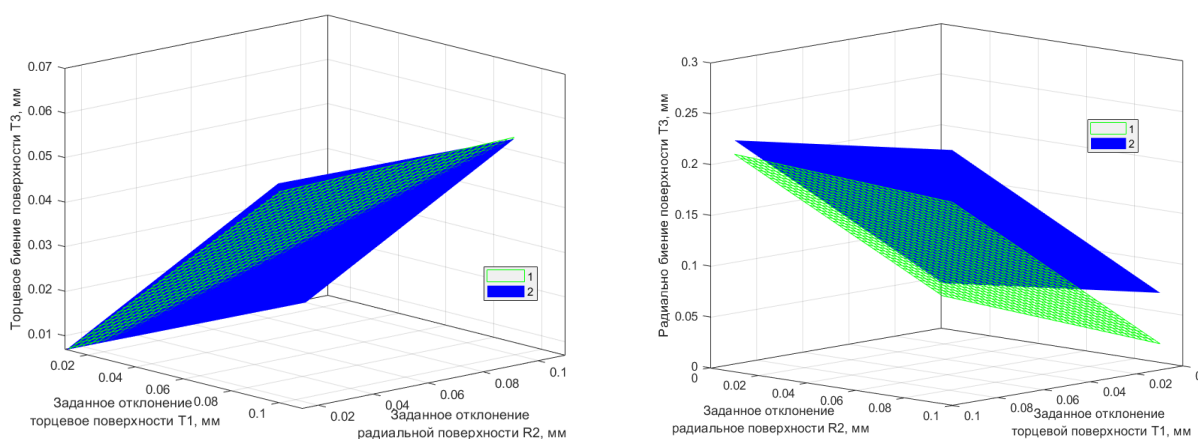
Рисунок 5.10 – Второе рассматриваемое взаимное угловое положение отклонения формы торцевой поверхностей промежуточного кольца 2

В таблице 5.2 приведены результаты моделирования для взаимного углового положения 0 и 90 градусов, а также их сравнение.

Таблица 5.2 – Сравнение биений контрольных поверхностей промежуточного кольца 2 для двух взаимных угловых положений моделируемых отклонений торцевой поверхности

Взаимные угловые положения отклонения, град		0		90		Абсолютные отклонения, $\Delta_{\uparrow i_{390}} - \Delta_{\uparrow i_{30}}$, мм		Относительные отклонения $\frac{\Delta_{ai_3}}{\Delta_{\uparrow i_{390}}} \cdot 100\%$	
Заданные отклонения, поверхности, мм		Величина биения, мм							
Торц. T_1	Радиал. R_2	$\Delta_{\uparrow T_3}$	$\Delta_{\uparrow R_3}$	$\Delta_{\uparrow T_3}$	$\Delta_{\uparrow R_3}$	Δ_{aT_3}	Δ_{aR_3}	Δ_{oT_3}	Δ_{oR_3}
0,01	0,01	0,0058	0,0424	0,0066	0,0521	0,0008	0,0097	12,1	18,6
0,01	0,02	0,0056	0,0382	0,0064	0,0536	0,0008	0,0154	12,5	28,7
0,02	0,01	0,0144	0,0591	0,0148	0,0684	0,0004	0,0093	2,7	13,6
0,02	0,02	0,0104	0,0555	0,0109	0,0719	0,0005	0,0164	4,6	22,8
0,02	0,04	0,0103	0,0486	0,0116	0,0805	0,0013	0,0319	11,2	39,6
0,04	0,02	0,0212	0,0954	0,0218	0,1121	0,0006	0,0167	2,8	14,9
0,04	0,04	0,0212	0,0891	0,0226	0,1211	0,0014	0,032	6,2	26,4
0,04	0,06	0,0216	0,0803	0,0219	0,1259	0,0003	0,0456	1,4	36,2
0,06	0,04	0,0328	0,1314	0,0331	0,1595	0,0003	0,0281	0,9	17,6
0,06	0,06	0,0324	0,1229	0,0325	0,1647	0,0001	0,0418	0,3	25,4
0,06	0,1	0,0331	0,1118	0,0314	0,1749	-0,0017	0,0631	-5,4	36,1
0,1	0,06	0,0543	0,2031	0,0539	0,2439	-0,0004	0,0408	-0,7	16,7
0,1	0,1	0,0586	0,2022	0,0595	0,2446	0,0009	0,0424	1,5	17,3

По результатам моделирования, приведенным в таблице 5.3, построены зависимости радиальных и торцевых биений от рассматриваемых величин отклонений поверхностей T_1 и R_2 промежуточного кольца 2 для двух взаимных угловых положений, которые представлены на рисунке 5.11.



а)

б)

- 1 – первый этап сборки 3 деталей с угловым положением 0° ;
- 2 – первый этап сборки 3 деталей с угловым положением 90° ;

Рисунок 5.11 – Зависимости биений от величин отклонений формы торцевой T_1

и радиальной R_2 поверхностей: а) $\Delta_{\uparrow T_3}$; б) $\Delta_{\uparrow R_3}$

Анализ таблицы 5.2 и рисунка 5.11 позволяет сделать следующие заключения. Второе взаимное угловое положение промежуточного кольца 2 (90°) привело к увеличению торцевого биения до 12,5%. Для рассмотренных вариантов величин отклонений формы поверхностей торцевой T_1 и радиальной R_2 торцевое биение по поверхности T_3 не превысило допуск 0,1 мм, предусмотренный в технологии сборки ротора компрессора низкого давления. Поворот промежуточного кольца на 90° вызвал увеличение радиального биения в среднем на 24%, что привело к увеличению случаев, в которых контролируемое биение по поверхности T_3 превышает допуск в 0,1 мм.

На втором этапе проводилось исследование погрешностей сборочных параметров 5 деталей. Созданная модель промежуточного кольца 1 имела такую же форму и угловое расположение, что и промежуточное кольцо 2 на первом этапе исследований.

Перестроению подвергались поверхности T_4 и R_6 промежуточного кольца 1. Все остальные модели деталей имели упрощенно-номинальную геометрию. Расчет проводился для величин моментов в болтовых соединениях равных 45 Н·м. В результате расчета были получены картины деформаций сборки 5 деталей, которые показаны на рисунке 5.12.

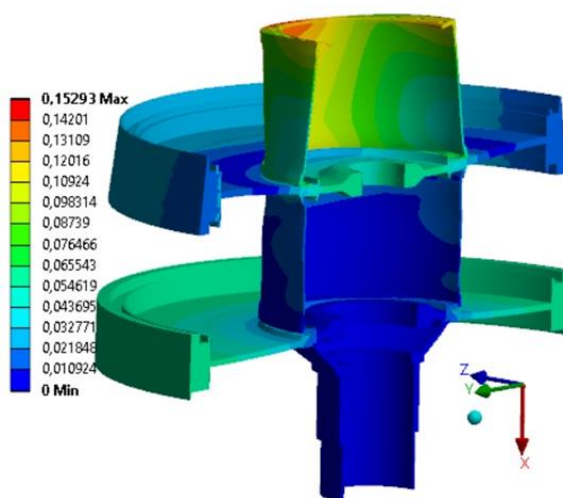


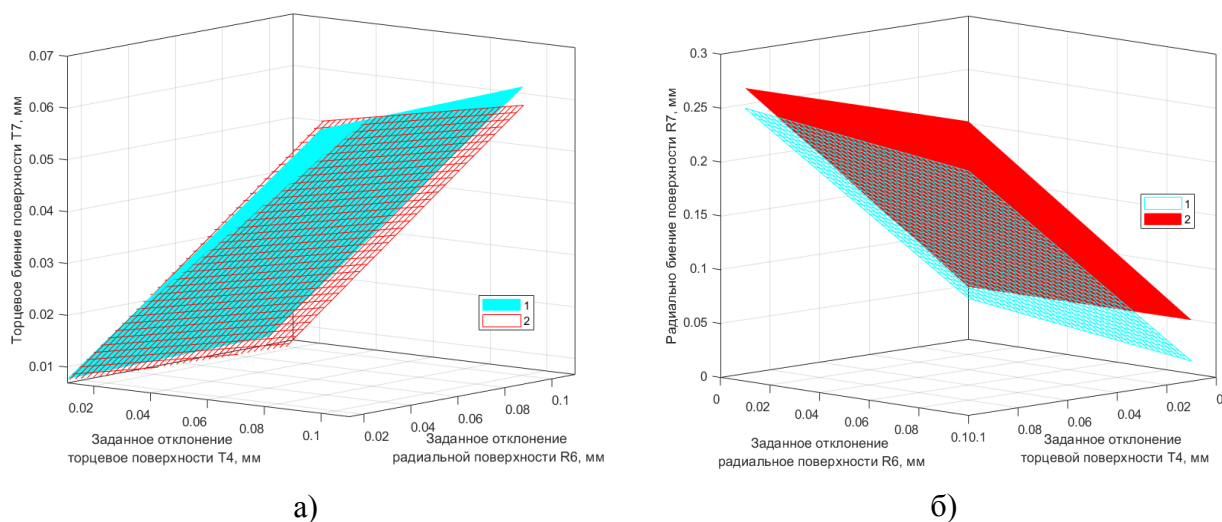
Рисунок 5.12 – Деформации деталей для второго этапа сборки КНД

Величины торцевого $\Delta_{\uparrow T_7}$ и радиального $\Delta_{\uparrow R_7}$ биений поверхностей T_7 и R_7 промежуточного кольца 1 приведены в таблице 5.3 (на следующей странице).

По данным таблицы 5.3 построены зависимости биений от заданных величин отклонений торцевой T_4 и радиальной R_6 поверхностей промежуточного кольца 1 для двух взаимных угловых положений, представленные на рисунке 5.13.

Таблица 5.3 – Результаты исследований для второго этапа сборки ротора компрессора низкого давления

№	Этапы сборки ротора КНД		I (3 детали)		II (5 деталей)		Абсолютные отклонения, $\Delta_{\uparrow i_{70}} - \Delta_{\uparrow i_{30}}$, мм		Относительные отклонения, $\frac{\Delta_{oi}}{\Delta_{\uparrow i_{70}}} \cdot 100\%$, %		II (5 деталей)		Абсолютные отклонения, $\Delta_{\uparrow i_{70}} - \Delta_{\uparrow i_{90}}$, мм		Относит. отклонения, $\frac{\Delta_{oi2}}{\Delta_{\uparrow i_{70}}} \cdot 100\%$, %	
	Взаимные угловые положения отклонения, град		0								90					
	Заданные отклонения поверхностей, мм		Величина биений, мм				Величина биений, мм									
	Торцевой T_4	Радиальной R_6	$\Delta_{\uparrow T_3}$	$\Delta_{\uparrow R_3}$	$\Delta_{\uparrow T_7}$	$\Delta_{\uparrow R_7}$	Δ_{aT}	Δ_{aR}	Δ_{oT}	Δ_{oR}	$\Delta_{\uparrow T_7}$	$\Delta_{\uparrow R_7}$	Δ_{aT2}	Δ_{aR2}	Δ_{oT2}	Δ_{aT2}
1	0,01	0,01	0,0058	0,0424	0,0071	0,0469	0,0013	0,0045	18,3	9,6	0,0074	0,0556	0,0003	0,0087	4,2	18,6
2	0,01	0,02	0,0064	0,0382	0,0074	0,0421	0,0010	0,0039	13,5	9,3	0,0069	0,0557	-0,0005	0,0136	-6,8	32,3
3	0,02	0,01	0,0144	0,0591	0,0149	0,0679	0,0005	0,0088	3,4	13,0	0,0136	0,0796	-0,0013	0,0117	-8,4	17,2
4	0,02	0,02	0,0104	0,0555	0,0131	0,0651	0,0027	0,0096	20,6	14,7	0,0131	0,0798	0,0000	0,0147	0,3	22,6
5	0,02	0,04	0,0103	0,0486	0,0134	0,0595	0,0031	0,0109	23,1	18,3	0,0121	0,0800	-0,0013	0,0205	-9,4	34,5
6	0,04	0,02	0,0212	0,0954	0,0252	0,1112	0,0040	0,0158	15,9	14,2	0,0256	0,1279	0,0004	0,0167	1,7	15,0
7	0,04	0,04	0,0212	0,0891	0,0255	0,1056	0,0043	0,0165	16,9	15,6	0,0246	0,1281	-0,0009	0,0225	-3,4	21,3
8	0,04	0,06	0,0216	0,0803	0,0259	0,1001	0,0043	0,0198	16,6	19,8	0,0236	0,1284	-0,0023	0,0283	-8,8	28,3
9	0,06	0,04	0,0327	0,1307	0,0377	0,1517	0,0050	0,0210	13,3	13,8	0,0371	0,1762	-0,0006	0,0245	-1,5	16,2
10	0,06	0,06	0,0323	0,1221	0,0375	0,1411	0,0052	0,0190	13,9	13,5	0,0361	0,1765	-0,0014	0,0354	-3,7	25,1
11	0,06	0,1	0,0329	0,1108	0,0387	0,1353	0,0058	0,0245	15,0	18,1	0,0341	0,1770	-0,0046	0,0417	-11	30,8
12	0,1	0,06	0,0543	0,2034	0,0623	0,2402	0,0080	0,0368	12,8	15,3	0,0611	0,2727	-0,0012	0,0325	-1,9	13,5
13	0,1	0,1	0,0551	0,1921	0,0632	0,2283	0,0081	0,0362	12,8	15,9	0,0591	0,2732	-0,0041	0,0449	-6,5	19,7



1 – второй этап сборки (5 деталей) 0° ; 2 – второй этап сборки (5 деталей) 90°

Рисунок 5.13 – Зависимости биений от заданных величин отклонений торцевой T_4 и радиальной R_6 поверхностей: а) $\Delta_{\uparrow T} T_7$; б) $\Delta_{\uparrow R} R_7$

Анализ таблицы 5.3 и рисунков 5.13 а, б показал, что на втором этапе сборки зависимости биений промежуточного кольца 1 и промежуточного кольца 2 от их угловых положений имеют схожий характер. Проанализировав таблицы 5.2 и 5.3, а также рисунки 5.13 и 5.14 для нулевого углового взаимного положения деталей первого и второго рассматриваемых этапов сборки ротора компрессора низкого давления, можно сказать, что значения биений в среднем на 15% больше для сборки, включающей 5 деталей. Анализируемые отклонения и их величины в зависимости от взаимного расположения могут увеличивать или уменьшать биения контролируемых поверхностей.

5.3.3 Теоретико-экспериментальные исследования точности сборочных параметров

На первом этапе исследований выполнялись измерения сопрягаемых и контрольных поверхностей деталей с использованием координатно-измерительной машины DEA Global с допустимой погрешностью, описываемой формулой (5.1).

На втором этапе производилась обработка полученных данных, построение действительных моделей и конечно-элементных моделей деталей. На рисунке 5.14, а показан процесс измерения заднего вала 2 и на рисунке 5.14, б – построенная по результатам измерений действительная модель.

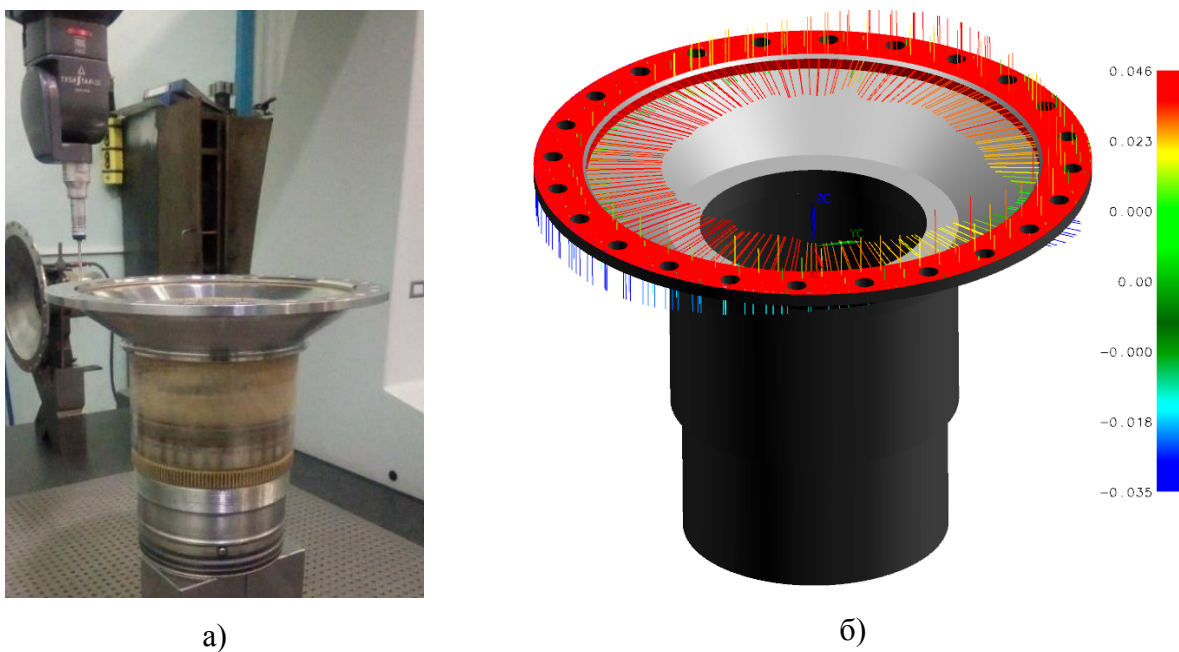


Рисунок 5.14 – Процесс измерения (а) и действительная модель (б) детали задний вал

На рисунке 5.15, а показан процесс измерения промежуточного кольца *1* и на рисунке 5.15, б – построенная по результатам измерений действительная модель.

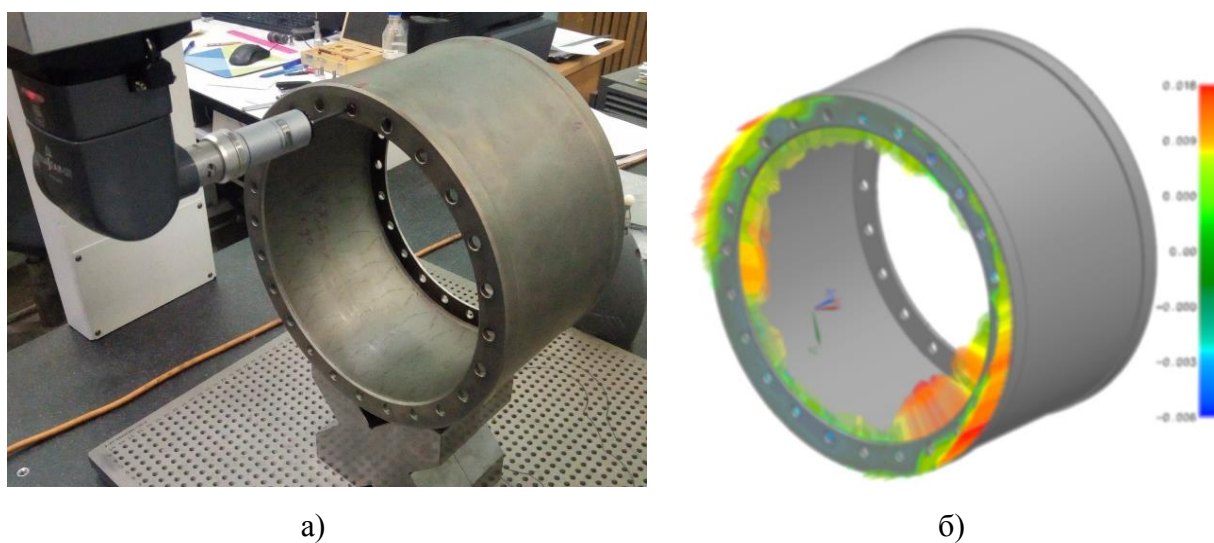


Рисунок 5.15 – Процесс измерения (а) и действительная модель (б) детали промежуточное кольцо *1*

Задаваемые граничные условия для первого и второго этапа сборки показаны соответственно на рисунках 5.16, а и 5.16, б.

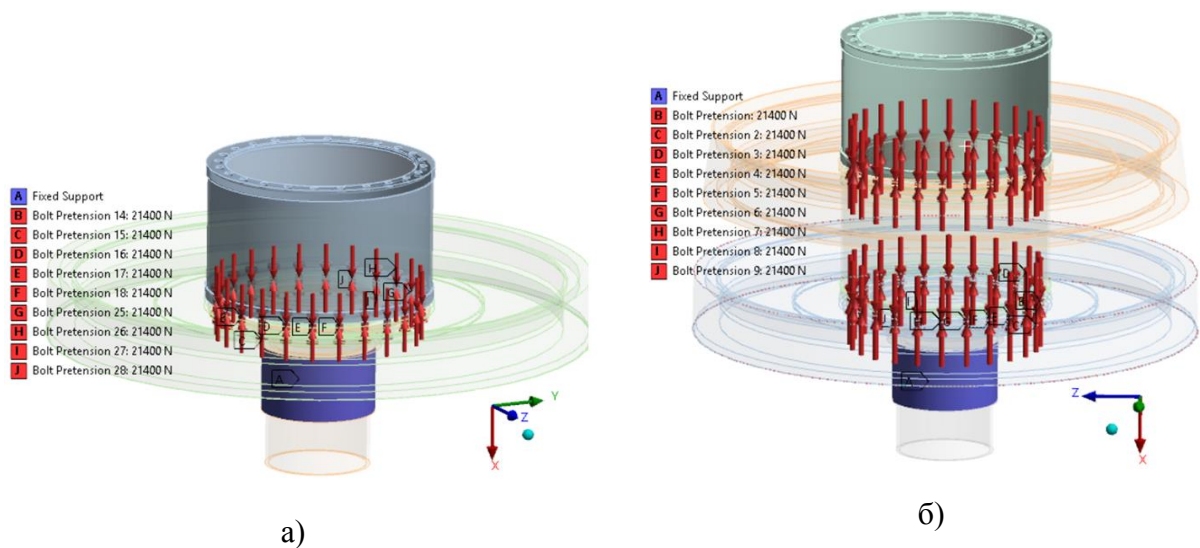


Рисунок 5.16 – Задаваемые граничные условия в модели для первого (а) и второго (б) этапов сборки узла

Деформации деталей и узлов приведены на рисунках 5.17, а–в соответственно для первого, второго и третьего этапов сборки рассматриваемого ротора.

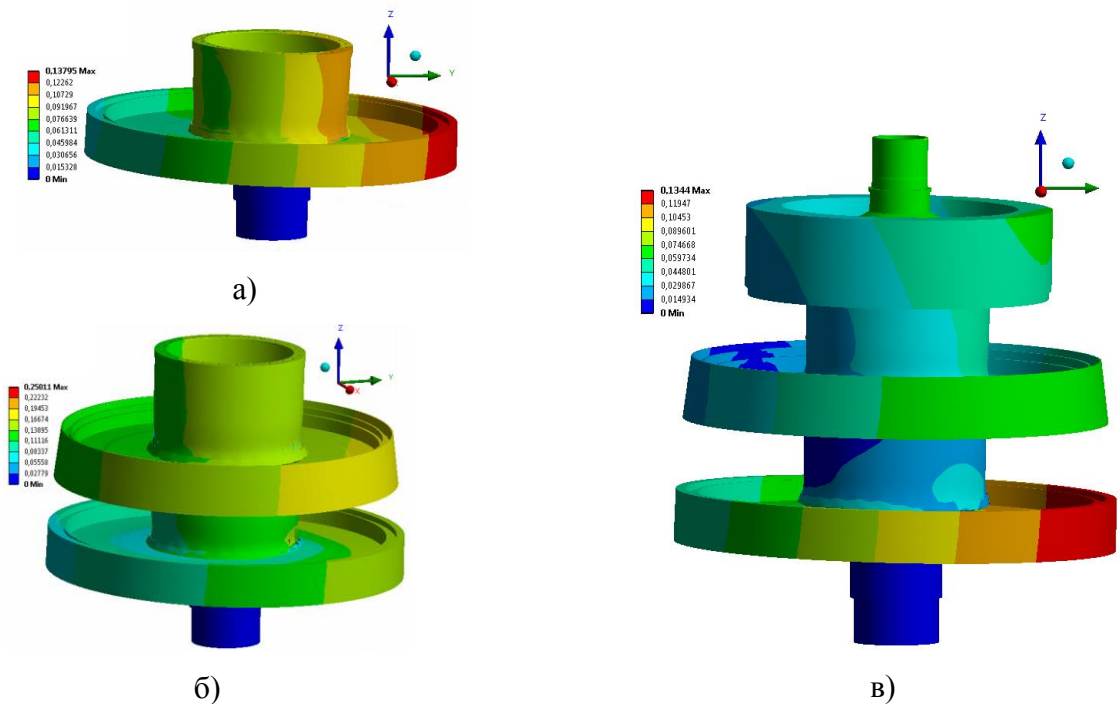


Рисунок 5.17 – Деформации при нулевом взаимном положении деталей для первого (а), второго (б) и третьего (в) этапов сборки

Для наглядности деформации на рисунке 5.17 увеличены в 200 раз. Результаты теоретико-экспериментальных исследований по первому этапу сборки ротора КНД представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Результаты теоретико-экспериментальных исследований для трёх этапов сборки ротора компрессора низкого давления

Деталь	Сборочный параметр, поверхность	Угол	Величина параметра, мм			Отклонения					
						Жёст. пост. – эксп.		Учёт жёст. – эксп.		Жёст. – учёт жёст.	
			Жёсткая постанов.	Учёт жёсткости	Эксперимент	абс., мм	отн., %	абс., мм	отн., %	абс., мм	отн., %
Диск 3	Радиальное биение R_6	0	0,034	0,051	0,043	0,009	20,78	-0,009	-20,42	0,018	34,22
		90	0,046	0,053	0,063	0,017	26,97	0,010	15,96	0,007	13,10
		180	0,050	0,061	0,067	0,018	26,08	0,007	9,93	0,011	17,93
		270	0,048	0,039	0,043	-0,005	-11,08	0,004	8,48	-0,008	-21,36
	Торцевое биение T_5	0	0,107	0,160	0,134	0,028	20,54	-0,026	-19,37	0,054	33,43
		90	0,134	0,182	0,173	0,039	22,36	-0,010	-5,63	0,048	26,50
		180	0,148	0,150	0,144	-0,004	-2,70	-0,006	-4,10	0,002	1,35
		270	0,134	0,204	0,161	0,027	16,54	-0,044	-27,36	0,070	34,47
Кольцо 2	Радиальное биение R_3	0	0,052	0,054	0,044	-0,008	-17,26	-0,010	-22,97	0,003	4,64
		90	0,065	0,056	0,070	0,004	6,00	0,014	19,76	-0,010	-17,15
		180	0,094	0,072	0,070	-0,024	-34,34	-0,002	-3,28	-0,022	-30,07
		270	0,071	0,062	0,054	-0,018	-32,98	-0,008	-15,35	-0,009	-15,28
	Торцевое биение T_3	0	0,025	0,019	0,018	-0,006	-35,70	-0,001	-4,98	-0,006	-29,27
		90	0,026	0,020	0,021	-0,005	-22,77	0,001	5,58	-0,006	-30,03
		180	0,017	0,023	0,018	0,000	2,42	-0,005	-29,91	0,006	24,89
		270	0,024	0,028	0,023	-0,001	-4,10	-0,005	-19,83	0,004	13,13
Диск 2	Радиальное биение R_8	0	0,044	0,055	0,057	0,013	23,67	0,002	3,11	0,012	21,22
	Торцевое биение T_6	0	0,035	0,043	0,038	0,003	7,96	-0,005	-13,60	0,008	18,98

Деталь	Сборочный параметр, поверхность	Угол	Величина параметра, мм			Отклонения					
						Жёст. пост. – эксп.		Учёт жёст. – эксп.		Жёст. – учёт жёст.	
			Жёсткая постанов.	Учёт жёсткости	Эксперимент	абс., мм	отн., %	абс., мм	отн., %	абс., мм	отн., %
Кольцо 1	Радиальное биение R_7	0	0,029	0,036	0,031	0,003	8,41	-0,005	-16,45	0,008	21,34
		90	0,047	0,042	0,046	0,000	-0,84	0,004	9,39	-0,005	-11,30
		180	0,068	0,061	0,058	-0,010	-16,36	-0,003	-4,43	-0,007	-11,43
		270	0,044	0,055	0,040	-0,005	-11,41	-0,016	-39,66	0,011	20,23
	Торцевое биение T_7	0	0,019	0,019	0,016	-0,003	-18,10	-0,003	-18,60	0,000	0,43
		90	0,019	0,019	0,028	0,009	33,07	0,009	32,00	0,000	1,58
		180	0,023	0,018	0,020	-0,003	-13,96	0,002	9,90	-0,005	-26,49
		270	0,021	0,019	0,019	-0,002	-11,85	0,000	0,73	-0,002	-12,67
Диск 1	Радиальное биение R_9	0	0,037	0,051	–	–	–	–	–	0,014	27,22
	Торцевое биение T_9	0	0,036	0,030	–	–	–	–	–	-0,006	-19,89
Вал передний	Радиальное биение E	0	0,050	0,058	0,047	-0,003	-6,74	-0,011	-23,69	0,008	13,70
		90	0,047	0,041	0,037	-0,010	-27,13	-0,005	-12,80	-0,005	-12,71
		180	0,040	0,027	0,031	-0,009	-27,72	0,005	14,46	-0,013	-49,32
		270	0,047	0,037	0,041	-0,005	-12,97	0,004	9,91	-0,009	-25,40
	Торцевое биение T_{11}	0	0,012	0,010	0,014	0,002	11,40	0,004	31,53	-0,003	-29,40
		90	0,014	0,009	0,011	-0,003	-27,64	0,002	17,38	-0,005	-54,49
		180	0,013	0,010	0,010	-0,003	-33,08	0,000	-0,27	-0,003	-32,73
		270	0,011	0,010	0,012	0,001	7,82	0,002	13,27	-0,001	-6,29

На рисунке 5.18 приведены расчетные и измеренные радиальные и торцевые биения диска третьей ступени и кольца 2.

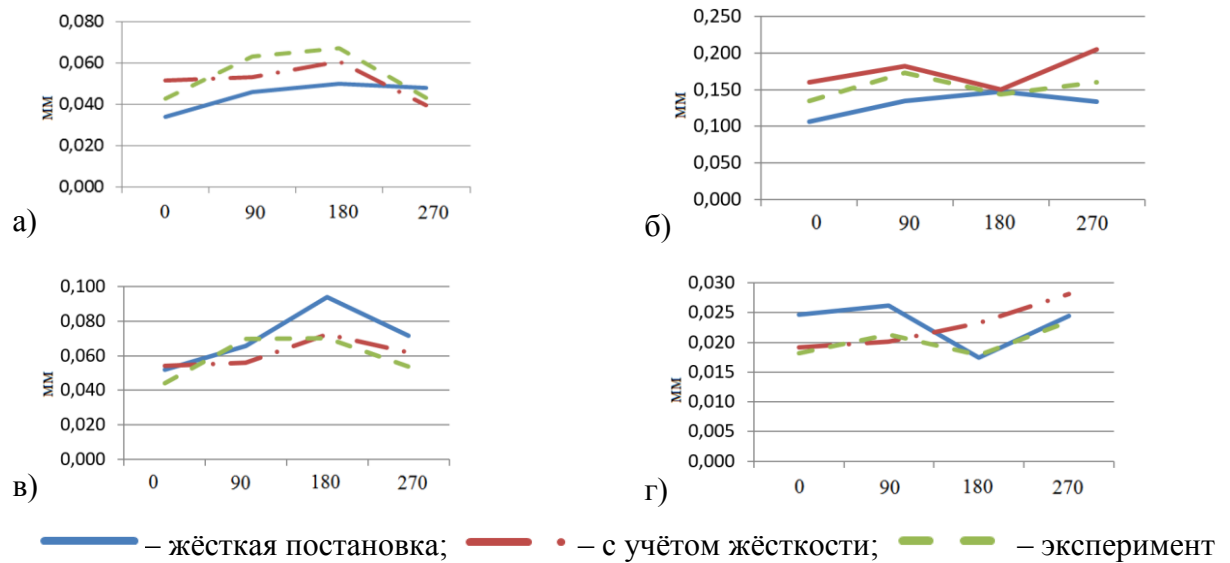


Рисунок 5.18 – Сборочные параметры ротора компрессора низкого давления:
 а) радиальные биения диска третьей ступени; б) торцевые биения диска третьей ступени;
 в) радиальные биения детали кольцо 2; г) торцевые биения детали кольцо 2

На рисунке 5.19 приведены расчетные и измеренные радиальные и торцевые биения кольца 1 и вала переднего.

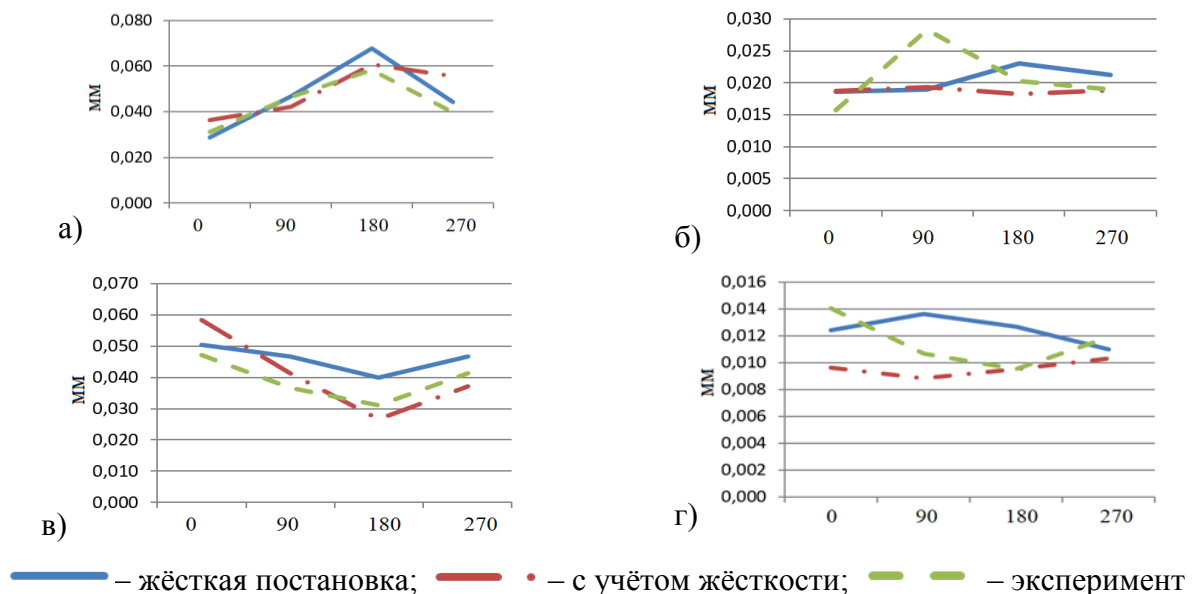


Рисунок 5.19 – Сборочные параметры ротора компрессора низкого давления:
 а) радиальные биения детали кольцо 1; б) торцевые биения детали кольцо 1;
 в) радиальные биения вала переднего; г) торцевые биения вала переднего

Анализ таблиц 5.1–5.4, а также рисунков 5.11, 5.13, 5.18 и 5.19 позволяет сделать следующие выводы:

1. Среднее расхождение между результатами моделирования и экспериментальных исследований, без учета двух выпадающих случаев, количество которых составляет не более 3% от всех вариантов, по всем ступеням составило:

а) для абсолютно твердых тел в области контакта 19, 15, 19%;

б) с учётом жёсткости для всех случаев составило 15%.

2. Количество случаев максимально наблюдаемых расхождений между результатами моделирования и экспериментальных исследований по трём ступеням составляет не более 10%:

а) для абсолютно твердых тел в области контакта 36, 33, 33%;

б) с учётом жёсткости для всех случаев составило 27, 32, 31%.

3. Зависимости сборочных параметров имеют схожий характер (синусоидальный вид), при учете влияния взаимного угла поворота деталей.

4. Существенное влияние оказывает отклонение формы сопрягаемых поверхностей деталей.

5. Влияние жёсткости деталей при их номинальной геометрии незначимо.

6. Влияние жёсткости деталей оказывается существенным при рассмотрении случаев, включающих геометрические отклонения сопрягаемых поверхностей.

7. Взаимное угловое положение оказывает существенное влияние на величину сборочных параметров, которые изменяются в пределах 76%.

В экспериментальных данных были исключены два выпадающих значения.

Можно предположить, что расхождения между теоретическими и экспериментальными исследованиями объясняются:

– влиянием физико-механических свойств материала деталей;

– возникающим наклёпом на сопрягаемых поверхностях, вследствие многократных сборок и разборок, в процессе выполнения экспериментальных исследований;

– необходимостью учёта в разработанной модели влияния геометрических отклонений периферийных отверстий и стягивающих болтовых соединений.

Несмотря на то, что центрирование деталей выполняется за счёт центрирующих буртиков, можно предположить, что периферийные отверстия оказывают небольшое, но заметное влияние на сборочные параметры исследуемого ротора. Дальнейшее повышение сходимости результатов теоретико-экспериментальных исследований возможно за счёт учёта в модели большего количества факторов. Результаты исследований показывают удовлетворительную сходимость.

5.3.4 Определение рациональных условий выполнения сборки

Рациональные условия выполнения сборки ротора компрессора низкого давления определялись, исходя из параметров комплекта деталей, участвующего в экспериментальных исследованиях, рассмотренных в подразделе 5.3.3. В качестве рациональных условий сборки выступают относительные угловые положения комплекта деталей ротора. Нахождение оптимальных условий сборки, предполагающих определение глобального минимума критериев K_q (5.16), K_r (5.17), K_Σ (5.18), может являться трудоёмкой задачей. Практическую значимость имеет нахождение локальных минимумов указанных критериев при приемлемых значениях сборочных параметров ротора и трудоёмкости решения поставленной задачи. Таким образом, практически значимым является определение рациональных условий сборки ротора компрессора низкого давления.

На первом этапе выполнялся предварительный поиск рациональных угловых положений сопрягаемых деталей. Рассматривались четыре угловых положения: 0° , 90° , 180° и 270° для каждой детали ротора. Выполнено моделирование 4096 случаев сборок в системе MATLAB с использованием модели сопряжения поверхностей деталей на основе метода их совмещения в жёсткой постановке. Расчёты производилось на компьютере с процессором AMD Ryzen 7 2700 Eight-Core, с тактовой частотой 3,2 ГГц, объёмом ОЗУ в 32 Гб в течение 16,5 ч. После сохранения всех результатов были использованы три, рассмотренные в подразделе 5.2, критерия оптимизации. Решение задачи выполнялось при следующих значениях параметров: $qP_1^* = 0$ мм, $T_{qp_1} = 0,1$ мм, $eP_1^* = 0$ мм, $T_{ep_1} = 600$ г·мм; веса значимости w_j , v_j , v_q , v_r в критериях (5.16), (5.17) и (5.18) равны 1. Сравнение полученных результатов для разных критериев выполнялось по отношению к «нулевому» угловому положению деталей по каждому параметру по формуле:

$$\Delta_{\text{отн}} = (P_{\text{опт}} - P_0) / P_0 \cdot 100\% , \quad (5.19)$$

где $P_{\text{опт}}$ – параметр, вычисленный в результате оптимизации;

P_0 – измеренный при «нулевой» сборке параметр.

Так называемое «нулевое» угловое положение деталей найдено в ходе сборки рассматриваемого ротора по заводской технологии при ограниченном ручном переборе вариантов. В таблице 5.5 приведены значения рассматриваемых в подразделах 5.3.3 сборочных геометрических параметров и суммарных дисбалансов при «нулевом» угловом положении деталей, а так же при использовании трёх вариантов критериев, приведенных в подразделе 5.3.2.

Таблица 5.5 Значения параметров и их отклонений по отношению к «нулевому» сборочному положению деталей

Параметр	Положение Π_0	Целевые критерии			$\Delta_{\text{отн}}, \%$		
		K_q	K_r	K_Σ	K_q	K_r	K_Σ
Рад. биен. T_6 , мм	0,031	0,031	0,041	0,031	0,00	33,97	0,00
Горц. биен. T_5 , мм	0,106	0,106	0,130	0,106	0,00	22,93	0,00
Рад. биен. R_3 , мм	0,045	0,029	0,073	0,029	-35,13	64,38	-35,13
Горц. биен. T_6 , мм	0,015	0,023	0,029	0,023	50,54	91,99	50,54
Рад. биен. R_8 , мм	0,057	0,050	0,098	0,046	-12,36	71,90	-19,50
Горц. биен. T_8 , мм	0,074	0,033	0,061	0,055	-54,86	-17,59	-25,61
Рад. биен. R_7 , мм	0,050	0,011	0,096	0,010	-77,49	90,71	-80,56
Горц. биен. T_9 , мм	0,027	0,018	0,034	0,017	-34,69	23,63	-36,99
Рад. биен. R_9 , мм	0,084	0,029	0,097	0,033	-64,94	16,44	-60,93
Горц. биен. T_{10} , мм	0,039	0,028	0,045	0,025	-30,06	13,90	-37,16
Рад. биен. E , мм	0,010	0,012	0,016	0,011	12,61	49,98	2,43
Горц. биен. T_{11} , мм	0,073	0,032	0,160	0,049	-56,26	117,74	-33,52
D_Σ , г·мм	5771,421	2193,878	59,397	1124,776	-61,99	-98,97	-80,51

В таблице 5.5 приведены значения относительных отклонений между вариантами сборки ротора. Первый критерий K_q оценивает качество сборки ротора с использованием параметров, характеризующих его геометрическую точность в собранном состоянии. Второй критерий K_r характеризует рабочие и эксплуатационные параметры изделия, зависящие от дисбаланса рассматриваемого ротора, который определяется в ходе его сборки. Третий критерий K_Σ является смешанным и предусматривает компромиссное решение по двум указанным критериям.

Согласно полученным результатам, приведенным в таблице 5.5, можно сделать следующие заключения. Применение критерия K_q позволяет уменьшить геометрические отклонения сборочных параметров ротора по некоторым параметрам до 76% (в среднем на 23%) и величины его общего дисбаланса на 62%, по сравнению со сборкой по «нулевым» угловым положениям. Использование критерия K_r приводит к увеличению геометрических отклонений ротора, однако существенно снижается величина его суммарного дисбаланса, почти на 100%. Применение критерия K_Σ приводит к уменьшению геометрических отклонений сборочных параметров ротора на сравнимую величину, как при использовании критерия K_q , при этом величина дисбаланса снижается на 80%.

Параметры радиальных и торцевых биений ротора оказывают влияние на газодинамические характеристики двигателя через величину неравномерности радиального зазора между статором и ротором. В связи с этим определение рациональных условий сборки ротора целесообразно выполнять с учётом его формируемых геометрических сборочных параметров. По этой причине целесообразно использование интегрального критерия K_{Σ} .

Как отмечалось ранее, для рассматриваемой сборки количество возможных случаев с дискретностью поворота 90 градусов составляет 4096. Если рассматривать все возможные положения деталей при дискретности поворота каждой детали на 15 градусов, количество рассматриваемых случаев составит 191 102 976 случаев. Для расчета всех этих значений на используемом компьютере при используемых алгоритмах потребуется около 609 406 часов. Для решения оптимизационной задачи в приемлемые сроки существует два пути: распараллеливание расчетов на несколько вычислительных машин или применение более совершенных методов оптимизационного поиска. Одним из наиболее простых и стабильных методов является модификация метода равномерного поиска [237, 238].

Определение рационального углового положения деталей ротора компрессора низкого давления включало шесть итераций с использованием компромиссного критерия K_{Σ} (5.18). Полученные результаты приведены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 Сборочные параметры ротора КНД, полученные при использовании компромиссного критерия при кумулятивном поиске

Параметр	Порядковый номер итерации					
	1	2	3	4	5	6
Рад. биен. T_6 , мм	0,031	0,024	0,027	0,033	0,032	0,022
Торц. биен. T_5 , мм	0,106	0,099	0,101	0,110	0,111	0,098
Рад. биен. R_3 , мм	0,029	0,038	0,032	0,032	0,030	0,041
Торц. биен. T_6 , мм	0,023	0,018	0,027	0,023	0,017	0,029
Рад. биен. R_8 , мм	0,046	0,040	0,044	0,046	0,047	0,048
Торц. биен. T_8 , мм	0,055	0,035	0,038	0,039	0,035	0,038
Рад. биен. R_7 , мм	0,010	0,021	0,021	0,010	0,008	0,008
Торц. биен. T_9 , мм	0,017	0,021	0,025	0,021	0,015	0,020
Рад. биен. R_9 , мм	0,033	0,028	0,057	0,035	0,045	0,029
Торц. биен. T_{10} , мм	0,025	0,024	0,026	0,029	0,027	0,022
Рад. биен. E , мм	0,011	0,013	0,011	0,010	0,011	0,011
Торц. биен. T_{11} , мм	0,049	0,055	0,045	0,038	0,052	0,037
D_{Σ} , г·мм	1124,776	613,879	342,822	409,595	169,025	453,712

Рассматривая средние значения можно отметить, что после пятой итерации уменьшения погрешностей целевых параметров в целом не наблюдается. Использование метода кумулятивного поиска позволило уменьшить величину дисбаланса на 92,14%, а общую величину геометрических отклонений сборочных параметров на 26,11%.

В то же время, в сравнении с первой итерацией алгоритма на пятой дисбаланс снижается на 84,97%, величины геометрических отклонений на 2,25%. Результаты определения рациональных условий сборки ротора компрессора низкого давления представлены на рисунке 5.20.

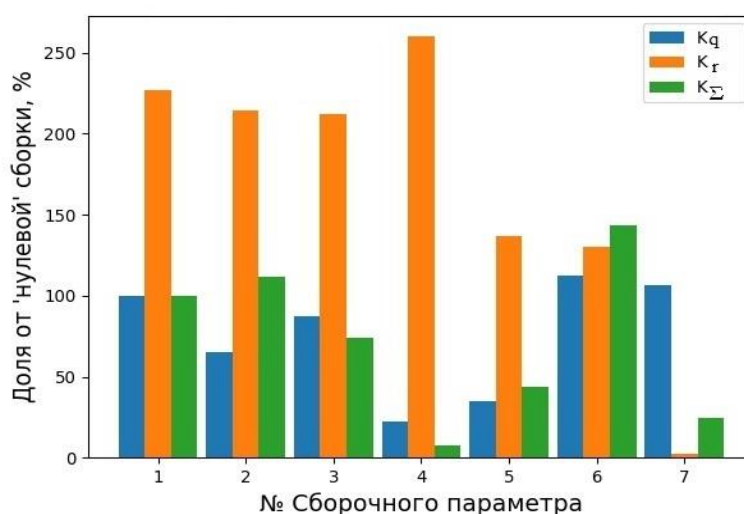


Рисунок 5.20 – Результаты определения оптимальных условий сборки ротора компрессора низкого давления

По оси абсцисс цифрами обозначены сборочные параметры: 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. Сплошной линией обозначены результаты оптимизации для первого варианта, исходя из условия наилучшего соответствия заданным геометрическим сборочным параметрам. Прерывистой линией обозначены результаты оптимизации для второго варианта, исходя из достижения наилучшего соответствия заданным требованиям дисбаланса ротора. Штрихпунктирной линией отмечены результаты оптимизации для третьего варианта, предусматривающего компромиссное решение по достижению геометрических сборочных параметров и требований к дисбалансу ротора.

Достигнутое повышение точности сборочных параметров невозможно получить экспериментальным подбором, поскольку возможное количество вариантов сборки рассматриваемых роторов более 191 млн.

Снижение трудоёмкости определения оптимальных условий сборки роторов возможно достичь за счёт использования:

- более совершенных методов оптимизации, в том числе метода, реализованного в программном комплексе IOSO [235, 236];
- многопроцессорных систем;
- предложенного в работе метода оценки параметров сопряжений поверхностей деталей с использованием технологий машинного обучения.

Порядок внедрения и использования предложенного технологического решения описан в инженерных методиках, приведенных в следующем подразделе.

5.4 Разработка рекомендаций по использованию полученных результатов на производстве

Инженерная методика определения рациональных условий сборки роторов в производстве ГТД приведена на рисунке 5.21.

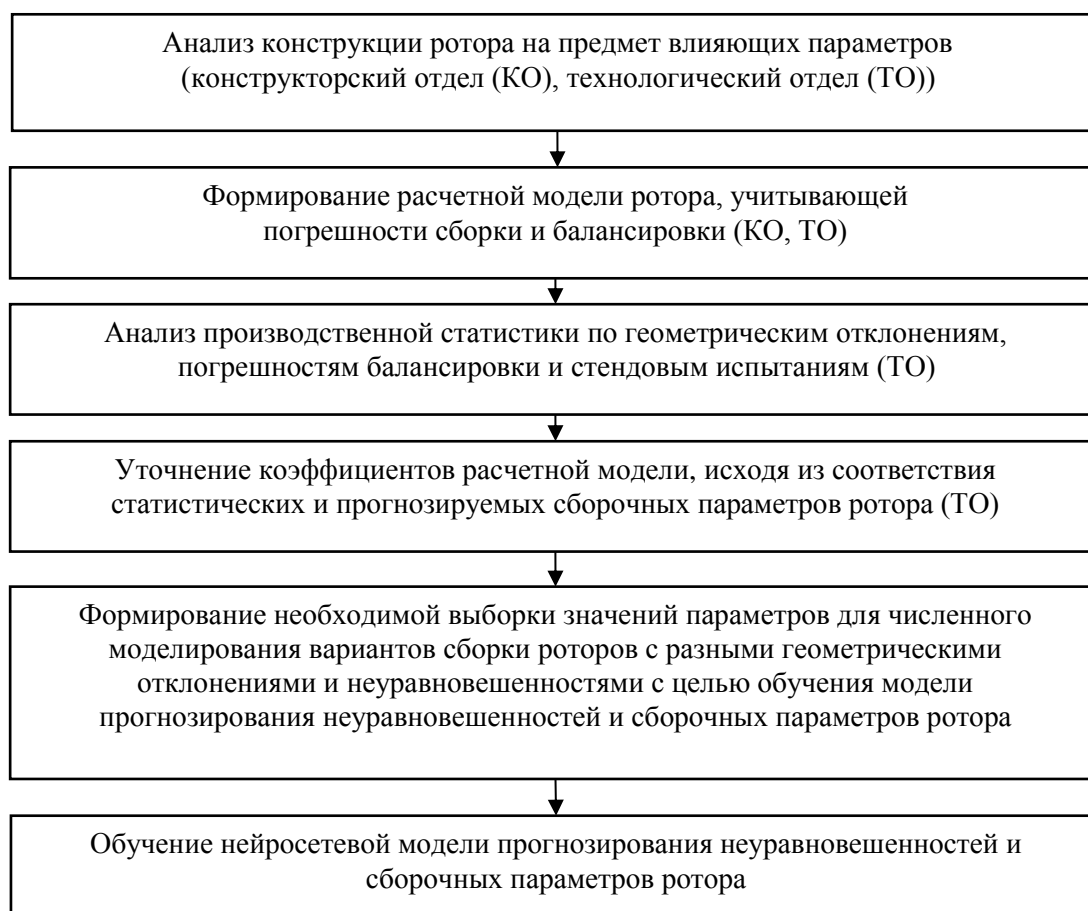


Рисунок 5.21 – Инженерная методика определения оптимальных условий сборки роторов
Приведём краткое содержание основных этапов предложенной методики.

На первом этапе производится анализ условий производства и эксплуатации ротора с целью выявления значимых факторов, влияющих на эксплуатационные характеристики, точность сборки и балансировки ротора. В основе анализа лежат данные конструкторской документации и производственная статистика по причинам отказов и/или несоответствию значений эксплуатационных параметров требованиям нормативной документации.

Для выбора значимых факторов следует использовать методы экспертных оценок и данные по статистике выбора значимых факторов у прототипов. Ранжирование факторов по степени значимости возможно с использованием цифровых двойников, описывающих динамику роторов. Для выбора и анализа значимости факторов привлекаются сотрудники конструкторского и технологического отделов предприятий.

Следующий этап предусматривает формирование расчётной модели ротора, учитывающей выявленные значимые факторы, погрешности сборки и балансировки деталей и узлов, параметры геометрической точности и вибрационного состояния.

Значимые факторы включаются в модель в виде функций, связывающих эти факторы с количественными оценками показателей качества роторов. Для построения расчётной модели привлекаются сотрудники конструкторских отделов.

Для выявления граничных значений и вариаций геометрических отклонений, а также неуравновешенностей деталей и узлов роторов выполняется анализ производственной статистики на основе данных по изготовлению и балансировке деталей и узлов роторов. Статистические данные собираются службами технического контроля на участках цехов, центральной измерительной и центральной заводской лабораториях предприятия.

Производственная статистика используется для уточнения коэффициентов расчётной модели, исходя из условия достижения наилучшего соответствия измеренных (статистических) и рассчитанных по модели сборочных параметров.

Разработанная модель с уточнёнными коэффициентами применяется для численного моделирования вариантов сборки роторов с целью формирования обучающей выборки нейронной сети по прогнозированию сборочных параметров роторов. Обработка сведений по производственной статистике и уточнение коэффициентов модели выполняется технологическими службами предприятий.

Для реализации разработанной методики необходимы следующие организационные мероприятия:

- анализ технологического процесса сборки ротора и выявление рабочих мест для модернизации процесса сборки;

- оснащение рабочих мест сборщиков специализированными программными модулями для прогнозирования сборочных параметров роторов и определения оптимальных способов их сборки;
- оснащение рабочих мест контролеров в цехах и центральной измерительной лаборатории специализированными программными модулями для автоматизированной обработки данных измерений и формирования действительных моделей деталей, заготовок и узлов;
- формирование сетевой и информационной инфраструктуры для реализации предложенных технологических решений;
- обучение персонала выполнению работы в условиях использования информационной системы для прогнозирования сборочных параметров и определения оптимальных способов сборки роторов;
- запуск пилотного проекта по сборке ротора с применением предложенных технологических решений.

Выполнение работ по формированию действительных моделей деталей, заготовок и узлов может производиться в автоматизированном режиме с применением специализированных модулей без предъявления дополнительных квалификационных требований к контролёрам, инженерам и метрологическим работникам.

Стейхолдерами (англ. stakeholder, заинтересованная сторона, причастная сторона, участник работ, роль в проекте – лицо или организация, имеющая права, долю, требования или интересы относительно системы или её свойств, удовлетворяющих их потребностям и ожиданиям [242]) – проекта по внедрению цифровых технологий сборки роторов являются руководители технологических служб и службы качества предприятия. Внедрение осуществляется по проектному принципу.

Методика использования технологических решений на рабочих местах контролеров деталей и сборщиков роторов приведена на рисунке 5.22 (на следующей странице). Рассмотрим содержание этапов методики. На первом этапе формируются исходные данные, среди которых наиболее важными являются действительная геометрия и неуравновешенность деталей и сборочных единиц. Данные получают на основе измерений действительной геометрии и остаточных дисбалансов деталей. Возможна селективная комплектация сборочных единиц на рабочих местах контролеров. Результаты измерений заносятся в информационную систему. По результатам измерений создаются действительные модели деталей и сборочных единиц. При условии автоматизации этого процесса возможно создание действительных моделей на рабочих местах контролеров или сборщиков с использованием специализированного программного обеспечения.

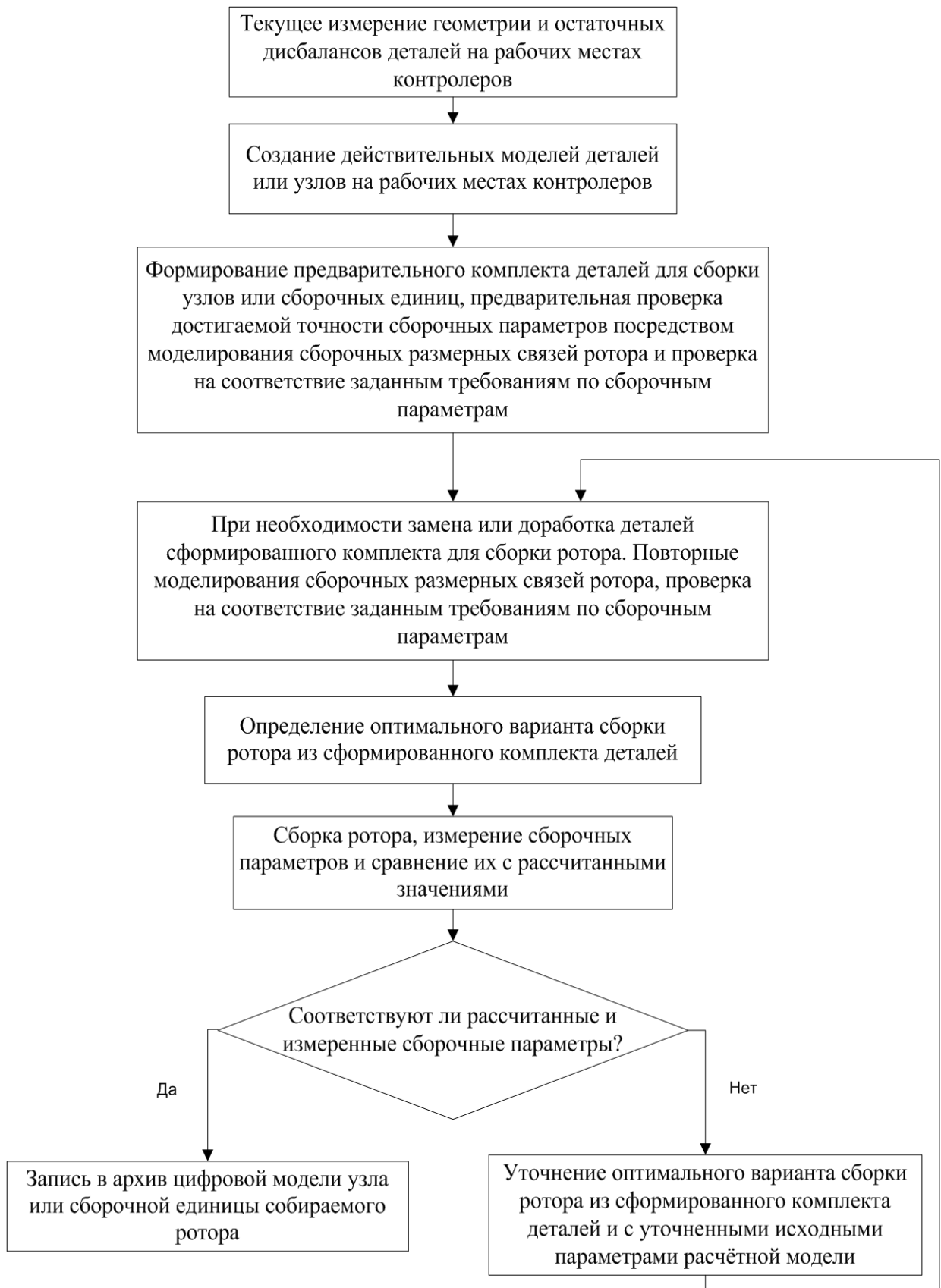


Рисунок 5.22 – Инженерная методика использования технологических решений на рабочих местах контролеров деталей и сборщиков роторов

Далее формируют комплекты деталей и сборочных единиц ротора с помощью модели сборочных размерных связей ротора и проверки результатов анализа расчетных размеров на соответствие требованиям по сборочным параметрам. Комплекты деталей из произведенного задела, для которых расчетные сборочные параметры роторов удовлетворяют заданным требованиям, принимаются в качестве предварительных претендентов на сборку.

Моделирование сборочных размерных связей ротора производится с использованием специализированных программных модулей информационной системы на рабочих местах технологов и производственных рабочих.

Возможна доработка деталей сформированного комплекта для сборки ротора с целью удовлетворения требованиям по сборочным параметрам. Замена деталей в комплекте производится при условии их наличия в заделе или при возможности их изготовления. Механическая доработка деталей может производиться по данным цифрового моделирования, определяющим места и требуемую точность обработки. После замены деталей или их доработки выполняется повторное моделирование сборочных размерных связей, с целью проверки расчетных значений на соответствие заданным требованиям по сборочным параметрам.

Из всех сформированных комплектов деталей и сборочных единиц роторов выбирается наилучший комплект по уровню соответствия сборочных параметров установленным требованиям, заложенным в технологии сборки и балансировки роторов, либо в конструкторской документации.

Далее выполняется натурная сборка отобранного комплекта в цехе. Для собранного ротора измеряются его фактические сборочные параметры и сравниваются с их рассчитанными значениями. Полученные результаты заносятся в информационную систему.

При несоответствии рассчитанных и измеренных сборочных параметров роторов выясняются причины расхождений. Предварительно производится анализ на предмет нарушения выполнения требований, описанных в технологии сборки и балансировки роторов. Если последовательность и требования технологии сборки не нарушались и отсутствуют грубые ошибки при создании действительных моделей, то в процессе формирования сборочных комплектов выполняется уточнение исходных параметров расчётной модели прогнозирования неуравновешенностей и сборочных параметров роторов. Процесс повышения точности осуществляется итерационно. Если на предыдущем этапе уточнялись исходные параметры расчётной модели, то производится повторное

определение оптимального варианта сборки ротора из сформированного комплекта деталей.

Результаты комплектации роторов и параметры их оптимальной сборки записываются в архив цифровой модели сборочной единицы собираемого ротора.

Важным этапом в технологии сборки ГТД является выполнение центровки узлов и сборочных единиц друг относительно друга с требуемой точностью до 0,01 мм. Операции центровки статоров авиационных двигателей выполняются с использованием специализированной технологической оснастки либо на токарно-карусельных станках. С целью автоматизации процесса центровки узлов, сохранения результатов в цифровом виде разработана схема технологического устройства для контроля геометрических параметров и выполнения центровки статорных деталей, приведенная в изобретении № 2639993 от 25.12.2017 [241]. Приведено описание последовательности выполнения работ по сборке статора с использованием предложенного устройства.

Укрупнённая последовательность управления технологическими процессами изготовления деталей и сборки узлов с использованием действительных моделей представлена на рисунке 5.23 (на следующей странице).

Изготовление деталей предусматривает корректировку снимаемого припуска на черновых и получистовых этапах обработки заготовки для его выравнивания перед чистой обработкой, что позволяет повысить геометрическую точность изготовления деталей [88, 101]. После изготовления деталей выполняется измерение их геометрии и дисбалансов. На основе измеренной информации формируются действительные модели деталей, которые используются на этапе сборки ротора.

Сборка узлов предусматривает их виртуальную комплектацию с использованием действительных моделей деталей. На основе действительных моделей деталей формируется действительная модель ротора, которая используется для определения виброскоростей на его опорах в зависимости от величин неуравновешенностей и погрешностей сборки. Затем производится определение рациональных угловых положений деталей, при которых достигается заданная точность сборочных параметров ротора. Выполняется сборка и последующая балансировка ротора. Производится контроль сборочных параметров ротора. В случае значительных отклонений между оценочными и измеренными сборочными параметрами производится уточнение угловых положений деталей ротора и выясняются причины расхождений. По описанному алгоритму может также производиться сборка отдельных узлов ротора.

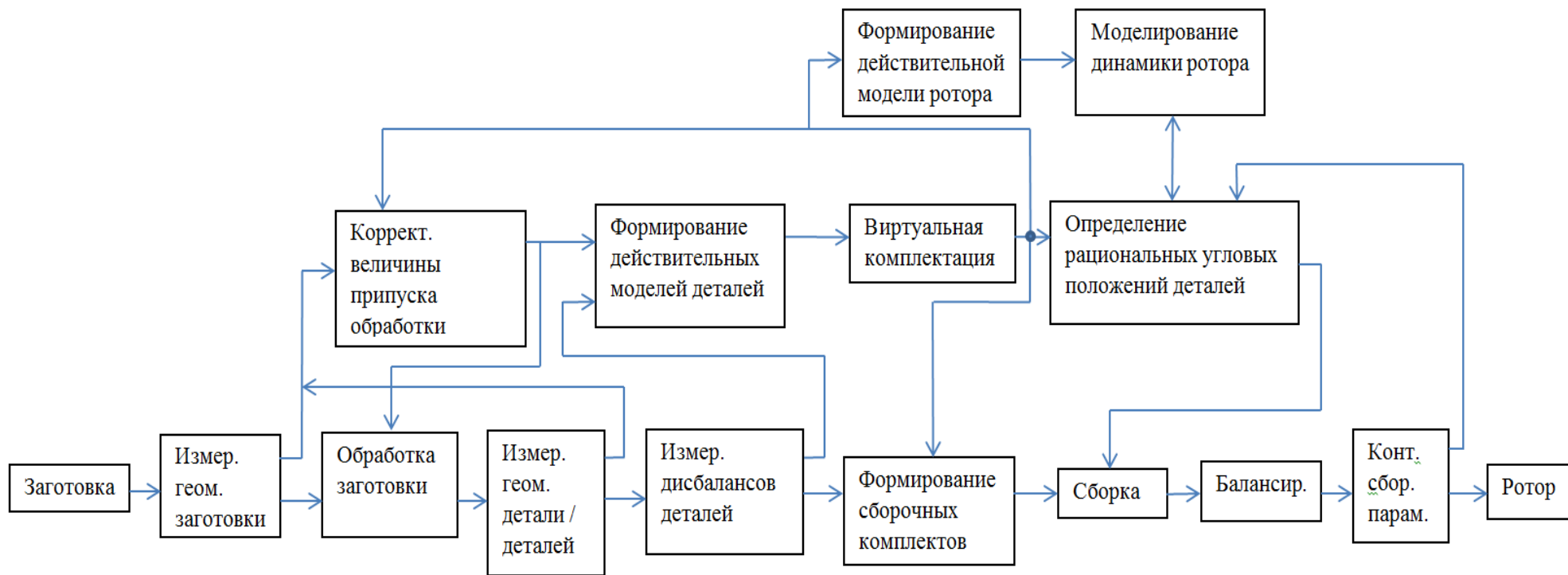


Рисунок 5.23 – Последовательность управления технологическими процессами изготовления деталей и сборки узлов с использованием действительных моделей

5.5 Оценка эффекта от внедрения предложенных теоретических решений

Ротор КНД включает в себя три рабочих колеса, две проставки и два вала. Каждая деталь содержит 24 отверстия. Общее количество комбинаций сборки ротора при возможных взаимных угловых положениях $n_{\text{отв}}$ всех деталей $n_{\text{дет}}$ составляет:

$$K_{n_{\text{дет}}} = n_{\text{отв}}^{n_{\text{дет}}-1} 24^{7-1} = 191\ 102\ 976. \quad (5.20)$$

Трудоёмкость сборки ротора КНД в цеховых условиях составляет 1-3 рабочих смен. При сборке новых изделий предусмотрена возможность изменения угловых положений деталей с дискретностью, равной количеству отверстий в деталях с последующей фиксацией их взаимного положения посредством развёртывания отверстия и установкой призонного болта. В ходе сборки ремонтных изделий, может производиться растачивание отверстий деталей для снижения отклонений от круглости их поверхностей. Данное обстоятельство позволяет изменять угловые положения деталей с дискретностью, равной количеству отверстий в деталях. Для каждого нового углового положения рабочего колеса длительность сборки ротора составляет не менее 0,5 рабочей смены. В среднем может выполняться $k = 2...4$ предварительные сборки ротора. Таким образом, трудоёмкость сборки ротора может составлять до 3 рабочих смен. Найденные угловые положения далеки от рациональных положений. Вероятность нахождения оптимального положения посредством экспериментального перебора вариантов составит:

$$P = \frac{k}{K_7} = \frac{4}{191\ 102\ 976} = 2 \cdot 10^{-8}. \quad (5.21)$$

Нахождение оптимального положения экспериментальным поиском является маловероятным. Определим годовой эффект снижения производственной себестоимости \mathcal{E}_T от использования предложенных решений. Эффект снижения технологической себестоимости составит:

$$\mathcal{E}_T = C_{\text{ч}_{\text{сб}}} \cdot t_{\text{сб}} \cdot k_{t_{\text{сб}}} + C_{\text{ч}_{\text{бал}}} \cdot t_{\text{бал}} \cdot k_{t_{\text{бал}}} - n_{\text{дет}} \cdot C_{\text{ч}_{\text{изм}}} \cdot t_{\text{из}} \cdot k_{t_{\text{из}}}, \quad (5.22)$$

где $C_{\text{ч}_{\text{сб}}}$ – стоимость часа работ бригады сборщиков (включая затраты на ЗПЛ, амортизацию оснастки и инструмента, затраты на содержание занимаемой площади в цехе), руб./час;

$t_{\text{сб}}, t_{\text{бал}}$ – трудоёмкость сборки и балансировки узла по существующей технологии, час;

$k_{t_{\text{сб}}}, k_{t_{\text{бал}}}$ – коэффициенты, показывающие снижение трудоёмкости сборки и балансировки по сравнению с существующей технологией;

$C_{ч_бал}$ – стоимость часа работ рабочего места, на котором выполняется балансировка узлов (включая затраты на ЗПЛ, амортизацию оборудования и оснастки, расходы на энергоносители, затраты на содержание занимаемой площади в цехе), руб./час;

$n_{дет}$ – количество деталей и узлов, требующих измерения на КИМ;

$C_{ч_изм}$ – стоимость часа работ рабочего места, на котором выполняется измерение деталей и узлов (включая затраты на ЗПЛ, амортизацию оборудования и оснастки, расходы на энергоносители, затраты на содержание занимаемой площади в цехе), руб./час;

$t_{изм}$ – средняя трудоёмкость измерения детали узла по существующей методике, час;

$k_{t_изм}$ – коэффициент, показывающий повышение трудоёмкости измерения по сравнению с существующей методикой.

Знак минус в формуле (5.22) перед членом $n_{дет} \cdot C_{ч_изм} \cdot t_{изм} \cdot k_{t_изм}$ указывает на увеличение затрат, связанных с выполнением измерений деталей и узлов. Величина производственной себестоимости может быть определена составляющей 200...300% от технологической себестоимости. Условная годовая программа выпуска или ремонта изделий составляет 30 единиц. Снижение технологической себестоимости составит:

$$\mathcal{E}_T = 4000 \cdot 16 \cdot 0,5 + 5000 \cdot 1 \cdot 0,75 - 7 \cdot 5000 \cdot 0,25 \cdot 0,5 = 35\,125 \text{ руб.}$$

Экономия производственных затрат на условную годовую программу выпуска из 30 изделий составит – $\mathcal{E}_{п_год} = 3\,161\,250 \text{ руб.}$

Выполненный расчёт не учитывает технико-экономического эффекта, заключающегося в минимизации риска снятий изделий с испытаний по причине повышенных вибраций. Результаты расчётов показывают положительный эффект, полученный при внедрении положений диссертации.

5.6 Выводы по главе 5

1. Анализ результатов исследований по геометрической точности серии деталей ротора низкого давления позволил обобщить данные о геометрических отклонениях формы исследуемых деталей. Для одноимённых поверхностей деталей определена топология отклонений, представленная через доминирующие гармоники гармонического ряда. Получены статистические зависимости для интервальных оценок погрешностей с доверительной вероятностью 99,73 %. Результаты описывают вероятностные характеристики геометрических отклонений существующих технологических процессов изготовления серийных деталей и позволяют прогнозировать величину наиболее вероятных

и предельных значений, которые можно ожидать при изготовлении серии деталей в существующих технологических условиях. Полученные статистические зависимости использовались при моделировании сборки роторов на основе их комплектов деталей, а также для решения различных задач.

2. Разработана модель определения рациональных угловых положений деталей ротора ГТД на основе использования трёх вариантов критериев оптимизации (целевой функции).

3. По результатам численных исследований зависимости торцевых и радиальных биений деталей от отклонений формы сопрягаемых поверхностей для ротора компрессора низкого давления выявлено:

- радиальные и торцевые биения дисков первой, второй и третьей ступеней пропорциональны отклонениям формы радиальных и торцевых сопрягаемых поверхностей;
- наибольшее влияние на указанные биения оказывает точность выполнения торцевых поверхностей сопрягаемых поверхностей деталей;
- наибольшее влияние на геометрическую точность рассматриваемого ротора оказывают отклонения формы сопрягаемых поверхностей более жёстких деталей, поэтому контролируемые биения поверхностей промежуточных колец второй и третьей ступеней на первом и втором этапах сборки в среднем больше на 15%, по сравнению с собранным состоянием ротора, ввиду их малой жёсткости.

4. Выполнена верификация модель определения рациональных угловых положений деталей ротора ГТД. Результаты сравнения измеренных значений сборочных параметров ротора и значений параметров, полученных моделированием с использованием комплекта действительных моделей деталей, показали:

- среднее расхождение между результатами моделирования и экспериментальными данными составило 19% при моделировании деталей как абсолютно твердых тел и 15% при учёте их жёсткости;
- максимальные расхождения составили 36% и 32% соответственно;
- сборочные параметры изменяются в зависимости взаимного угла поворота деталей по гармоническому закону, при этом взаимное угловое положение деталей оказывает значительное влияние на величины сборочных параметров в пределах 76% их значений;
- наблюдается суммирование погрешностей, возникающих от сопряжения поверхностей деталей, т.е. относительно малые величины погрешностей сопряжений поверхностей с величиной до 0,01...0,02 мм на одну ступень ротора суммируются и составляют в сумме значимую величину до 0,05...0,15 мм.

Изменение относительных угловых положений деталей является эффективным инструментом повышения геометрической точности ротора без дополнительного снижения погрешностей формы и расположения сопрягаемых поверхностей деталей.

5. По модели определения оптимальных условий сборки находились рациональные угловые положения деталей ротора компрессора низкого давления. В результате получено:

– применение критерия соответствия заданным техническим показателям качества сборки узла K_q позволяет уменьшить некоторые геометрические погрешности ротора до 76% (в среднем на 23%) и величины его общего дисбаланса на 62%;

– применение критерия соответствия заданным требованиям к рабочим и эксплуатационным параметрам изделия K_r приводит к повышению геометрических отклонений ротора, однако существенно снижается его суммарный дисбаланс, до 100%.

– при применении компромиссного критерия K_Σ , наблюдается уменьшение геометрических отклонений сборочных параметров ротора на сравнимую величину с критерием K_q , при этом величина дисбаланса рассматриваемого узла снижается на 80%.

Таким образом, определённые в ходе исследований относительные угловые положения деталей ротора компрессора низкого давления позволяют снизить погрешности сборочных параметров в среднем на 23% и уменьшить величину дисбаланса на 80% в ходе его сборки. Использование результатов моделирования позволит снизить трудоемкость сборки за счёт сокращения количества предварительных сборок с 4 до 2.

6. Разработана инженерная методика, регламентирующая процесс цифровой сборки с применением действительных моделей деталей роторов для оптимизации технологических условий сборочных и контрольных операций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

1. Предложена научная идея, сформулированы основные принципы, предусматривающие 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.

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 определения действительных геометрических параметров деталей и сборочных параметров узлов с помощью ВМ и КВС, учитывающий сопряжения контактирующих поверхностей объектов. Метод позволяет повысить точность оценки действительных размеров деталей и сборочных параметров узлов на 20% по сравнению с существующими технологиями. Использование метода при создании действительных моделей деталей и узлов позволит учитывать особенности формируемых размерных связей, определяемых возможными сопряжениями контактирующих поверхностей измеряемых объектов.

4. Разработан метод, включающий комплекс моделей для оценки параметров сопряжений деталей и узлов при учёте контактного взаимодействия их поверхностей с использованием действительных моделей, основанный на создании и использовании действительных моделей объектов, обеспечивающий повышение точности расчётов сборочных параметров. Метод позволяет определять геометрические параметры

сопряжений деталей при допущении их абсолютной жёсткости 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, что точность расчёта биений ротора в сборе при применении метода увеличилась на 25% по сравнению с методом размерных цепей.

5. Предложен метод повышения точности сборки узлов за счёт расчета параметров операции пригонки деталей с использованием их действительных моделей. Повышение точности сборки узлов достигается расчётом оптимального взаимного расположения деталей и микрообъемов удаляемого металла при пригонке поверхностей. Применение метода на операциях доводки при сборке узлов ГТД позволяет обеспечивать требуемую площадь контакта поверхностей.

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

7. Разработана и верифицирована модель определения рациональных угловых положений деталей ротора ГТД. Результативность применения модели оценивалась по сравнению с технологиями, включающими предварительные сборки узлов. Определённые относительные угловые положения деталей ротора компрессора низкого давления позволяют снизить погрешности сборочных параметров (торцевых и радиальных биений рабочих колес) в среднем на 23% и уменьшить величину дисбаланса на 80% по сравнению со сборкой ротора с произвольным положением ДСЕ в окружном направлении. Использование результатов моделирования позволит снизить трудоемкость сборки за счёт сокращения количества предварительныхборок с 4 до 2.

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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЧХ	– амплитудно-частотная характеристика;
БД	– база данных;
БС	– болтовое соединение;
ВКИМ	– виртуальная координатно-измерительная машина;
ВМ	– виртуальная мера;
ГП	– геометрический параметр;
ГТД	– газотурбинный двигатель;
ДСЕ	– детали и сборочные единицы;
КВС	– комплексная виртуальная сборка;
КВД	– компрессор высокого давления;
КИМ	– координатно-измерительная машина;
КО	– конструкторский отдел;
КСД	– компрессор среднего давления;
КЭ	– конечно-элементная;
МНК	– метод наименьших квадратов;
НД, СД, ВД	– роторная машина, соответственно низкого, среднего и высокого давлений;
НК	– Николай Кузнецов, сокращённое название изделий, выпускаемых фирмой Николая Дмитриевича Кузнецова, на текущий момент предприятием ПАО «ОДК-Кузнецов»;
ПКИ	– показатели качества изделия;
ПСПМ (APSD)	– поверхностная спектральная плотность мощности (Area power spectral density);
СА	– сопловой аппарат;
СК	– система координат;
СКО	– среднеквадратическое отклонение;
СП	– сборочный параметр;
ТВД	– турбина высокого давления;
ТНД	– турбина низкого давления;
ТО	– термическая обработка;
ТП	– технологический процесс;
ТУ	– технические условия;
ФЗП	– федеральная целевая программа;

ЧПУ	– устройство числового управления;
ASME	– American Society of Mechanical Engineers, Американская общественная организация в области инженерии;
CAD	– computer-aided design (автоматизированное проектирование);
CAE	– computer-aided engineering (компьютерная поддержка для решения различных инженерных задач);
CAM	– computer aided manufacturing (компьютерная поддержка производства);
DLP	– double linear perceptron, двухслойный персептрон с сигмоидной функцией активации;
GRNN	– General regression neural network, обобщённо-регрессионная нейронная сеть, имеющая два слоя – скрытый радиальный базисный слой и выходной линейный слой
ICP	– iterative closest point algorithm, итерационный алгоритм совмещения на основе использования ближайших точек;
ISO	– International Organization for Standardization, международная организация, занимающаяся выпуском стандартов;
Smart Big Data	– «умные» большие данные, технология сбора и обработки больших данных для решения прикладных задач;
LMC	– Least material condition, наименьшее состояние материала, символ размера, который описывает состояние элемента или детали, при котором наименьшее количество материала (объём / размер) находится в пределах допуска на размер;
MES	– Manufacturing Execution System, система управления производственными процессами;
MMC	– maximum material condition, максимальное состояние материала, символ размера, который описывает состояние элемента или детали, при котором максимальное количество материала (объём / размер) находится в пределах допуска на размер;
MMR	– maximum material requirement, максимальное требование к материалу;
MMVB	– maximum material virtual boundary, максимальная виртуальная граница материала;
NURBS	– non-uniform rational B-spline (неоднородные рациональные B-сплайны);

RSS	– residual sum of squares, остаточная сумма квадратов;
Skin	– Skin Model Shape, поверхностная модель объекта;
TestBed	– цифровой испытательный полигон;
T-Map	– модель Tolerance Map, карта допуска;
TTRS	– Technologically and Topologically Related Surfaces, технологически и топологически (конструкторски) связанные поверхности;
\bar{X}	– среднеарифметическое значение;
σ	– среднеквадратическое отклонение;
p	– уровень доверительной вероятности;
ν_{eff}	– количество степеней свободы;
$t_{p, \nu_{eff}}$	– распределение Стьюдента;
np	– количество контрольных точек
$D_{\xi}(x_k)$	– заданная величина дисперсии значений измеряемых величин;
x_k	– измеряемая величина;
$\arg \Phi \cdot \left(\frac{1+p}{2} \right)$	– функция, обратная интегралу Гаусса $\Phi \cdot \left(\frac{1+p}{2} \right)$;
ε_{β}	– величина, характеризующая соотношение между допускаемой и реализуемой измерительной погрешностью;
D_K, D_T, D_{Ξ}	– соответственно дисбалансы, возникающие из-за конструкторских, технологических и эксплуатационных факторов, г·мм.
m_p	– масса ротора, кг;
$e_{ст доп табл}$	– табличное значение удельного дисбаланса, мм;
$D_{ст.т}, D_{ст.э}$	– соответственно значения главных векторов технологических и эксплуатационных дисбалансов изделия, г·мм;
$K_{\Sigma}, \bar{K}_{\Sigma}$	– осевые и радиальные зазоры в соединениях и передачах;
K_{ϕ}	– отклонение формы поверхностей проходных сечений в изделии;
$K_{ш}$	– шероховатости рабочих и конструкторских поверхностей;
K_{Σ}	– сводный критерий определения оптимального варианта сборки узла;
K_1, K_2, \dots, K_n	– геометрические параметры деталей, входящих в сборочную единицу;
P_c	– сборочное усилие;
T_c	– температура выполнения сборки узла;
$a_{ну}, a_{но}, a_{б}, a_{к}$	– первичные погрешности, связанные с базированием, установкой, и

	– обработкой заготовки, а также контролем;
A_n	– заданные операционные размеры деталей;
$A_{пр}, A_{ст}$	– используемая в ходе обработки заготовок оснастка, оборудование;
$A_{кин.}$	– кинематическая точность оборудования;
$A_{отж.}$	– величина отжатия;
A_z, A_v, A_s	– режимы обработки;
X, Y, Z	– оси декартовой системы координат;
D	– диаметр, мм;
O	– ось поверхности;
x_i, y_i, z_i	– координаты декартовой системы координат;
L_i	– i -я линейная координата, размер, длина;
δ	– погрешность, отклонение;
h	– высота;
$p(u, v)$	– координаты действительной поверхности, зависящие от локальных параметрических координат u и v ;
$p_0(u, v)$	– координаты номинальной геометрии поверхности, задаваемой конструктором;
$\Delta p_L(u, v)$	– погрешность расположения действительной поверхности относительно номинально заданной геометрии;
$\Delta p_F(u, v)$	– погрешность формы действительной поверхности;
Δp_M	– погрешность измерения средства координатных измерений;
$\Delta\Phi, \Delta\Theta, \Delta\Psi$	– компоненты вращения вокруг координатных осей X, Y, Z ;
d_i	– расстояние между измеренной i -й точкой и номинальной точками поверхности;
N	– количество пар точек совмещения;
A, B, C, D	– коэффициенты;
dF	– отклонение формы поверхности в рассматриваемой точке;
δ_s	– гармоническая составляющая отклонения формы поверхности;
δ_m	– макроотклонение формы поверхности;
δ_r	– случайная составляющая;
$f(u, v)$	– поверхность, заданная параметрическим способом;
ω_1 и ω_2	– параметры, характеризующие угловые частоты гармонических

	составляющих поверхности по осям u и v ;
$zf(\omega_1, \omega_2)$	– функция, аппроксимирующая функцию $f(u, v)$ в пространстве угловых частот соответствующих гармоническим составляющим посредством ряда Фурье;
$APSD(\omega_1, \omega_2)$	– величина спектральной плотности мощности;
$\varphi(x), \psi(x)$	– аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты, вычисленные с использованием масштабирующей функции и вейвлет-функции;
h_n	– массив вейвлет-коэффициентов;
Z	– множество целых чисел;
g_n	– величина, равная значению $(-1)^n h_{1-n}$;
$\varphi_{k,n}, C_{m-1,n}, D_{m-1,n}$	– аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты, полученные с помощью вейвлет-функции;
$P_{0...4,0...4}$	– коэффициенты полинома;
ρ	– полярный радиус;
β	– полярный угол;
P_{ij}	– координаты (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) задающей точки в трехмерном пространстве;
λ_x, λ_y	– степени полиномов по соответствующим осям x и y (полиномов, описывающих макроотклонение формы поверхности);
\bar{M}	– вектор параметров, характеризующих инструментальную погрешность координатно-измерительной машины (КИМ);
\bar{P}	– вектор параметров плана контроля (количество контрольных сечений, число контролируемых точек в них, правило их расположения по измеряемой поверхности);
\bar{S}	– параметры, обеспечивающие формальное описание поверхности;
f	– частота;
\mathbf{R}, \vec{t}	– матрица поворота и вектор транспонирования координат точки;
$\mathbf{M}_x, \mathbf{M}_y, \mathbf{M}_z$	– матрица вращения вокруг соответствующей оси;
$\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$	– углы вращения объекта в соответствующих матрицах вращения $\mathbf{M}_x, \mathbf{M}_y, \mathbf{M}_z$;
μ	– математическое ожидание;
Δ	– смещение, отклонение;

$\Delta_{\uparrow T_i}$	– торцевое биение i -ой поверхности;
$\Delta_{\uparrow P_i}$	– радиальной биение i -ой поверхности;
Δ_{aT}	– абсолютное отклонение торцевых поверхностей;
Δ_{aP}	– абсолютное отклонение радиальных поверхностей;
S	– механическая система;
$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$	– базис;
$K = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$	– множество деталей;
$B_i = \{b_i^1, b_i^2, \dots, b_i^m\}$	– подмножество поверхностей;
dx_i, dy_i, dz_i	– смещение точки;
$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$	– углы разворота базисных векторов $\vec{i}_i, \vec{j}_i, \vec{k}_i$ относительно $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$;
Ω	– множество состояний системы;
ω	– элемент множества состояний системы;
F	– множество характеристик качества (целевых показателей) сборки;
C	– упорядоченное множество сопряжений контактирующих поверхностей c_i при сборке;
$M_{сб}$	– множество комбинаций сборки поверхностей;
$P(m_j)$	– функционал качества P , заданный на множестве возможных комбинаций вариантов сборки $M_{сб}$;
$Q = \{P_i(\{m\})\}$	– интегральная функция качества;
$G = f(c_1, c_2, \dots, c_n)$	– условный зазор между контактирующими поверхностями;
g_1, g_2, \dots, g_n	– локальные зазоры;
$dist(p_i, c_k^j)$	– расстояние от точки p_i до поверхности c_k^j ;
ξ_1	– константа;
\vec{n}_i	– вектор нормали;
\vec{p}	– вектор координат точки;
$\{N\}$	– вектор реакций в узлах элемента;
$[K]$	– глобальная матрица жёсткости;

$\{q\}$	– вектор узловых смещений;
$\{Q\}$	– вектор приложения внешних нагрузок;
$[H]$	– матрица жёсткости конструкции с учетом граничных условий;
$\{P\}$	– вектор полной узловой нагрузки;
AsP_j	– j -й сборочный параметр ротора;
$[AsP_j]$	– допустимое значение параметра;
T_{AsP_j}	– допуск сборочного параметра ротора;
Pl_{sec}	– секущая плоскость;
C^c	– количество случаев;
Unc	– погрешности формообразования;
$Meas$	– результаты измерений;
Nom	– номинальная геометрия;
$Pat = Pat^{unc} + Pat^{pref}$	– шаблон для выполнения цифровой коррекции управляющих программ;
Pat^{unc}	– шаблон, учитывающий систематические погрешности формообразования;
Pat^{pref}	– шаблон для корректировки погрешностей сборки узла, определяемый с использованием метода повышения точности сборки узлов за счёт автоматизации операции пригонки деталей;
Nom^{corr}	– скорректированная 3D модель заготовки или детали;
$Traj^{corr}$	– скорректированная траектория управляющей программы;
$Traj$	– траектория управляющей программы, сформированная с использованием исходной 3D модели заготовки или детали.
$\omega_x, \omega_y, \omega_\alpha$	– линейные и угловые перемещения поверхностей;
St_l	– величина виброскоростей для опоры ротора l ;
v_l	– весовой коэффициент учета влияния дисбаланса для опоры ротора l ;
PP	– множество угловых положений деталей ротора;
αp_i	– относительное угловое положение i -й детали;
$V_{\alpha p_i}$	– множество дискретных допустимых относительных угловых положений деталей ротора;
S	– множество возможных состояний собираемого ротора;

K_r^j	– целевая функция (критерий) балансировки;
S_i	– система координат i -й детали;
K_i^j	– j -я контактирующая поверхность i -й детали;
A_i	– главные оси инерции i -й детали;
$V_{g \times 3}$	– матрица координат вершин сетки stl-модели;
$F_{m \times 3}$	– матрица сочетаний вершин по три, образующих фасеты поверхностей;
$N_{g \times 3}$	– матрица координат нормалей фасет;
\vec{r}	– радиус-вектор;
ρ	– плотность;
J	– центробежный момент инерции;
\vec{D}	– вектор дисбалансов;
m	– масса;
φ	– угловое положение объекта;
\vec{i}	– вектор перемещения детали или узла;
$\{U\}, \{\dot{U}\}, \{\ddot{U}\}$	– матрицы перемещений, первых и вторых производных по ним;
$[G]$	– гироскопическая матрица;
MPE_L	– предельно допустимая погрешность измерения длины;
θ	– фаза члена гармонического ряда;
τ	– длина кривой;
QP	– множество параметров качества сборки;
q	– вектор параметров качества сборки изделия;
qP	– параметр качества сборки изделия;
EP	– множество эксплуатационных параметров изделия;
eP	– вектор эксплуатационных параметров изделия;
eP	– эксплуатационный параметр изделия;
T_{qp_j}	– допуск на j -й параметр качества сборки;
w_j	– вес важности на j -й параметр качества сборки;
SMA	– значение скользящего среднего.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анипченко, Л.А. Исследование точности геометрических параметров номинально-соосных цилиндрических поверхностей вращения при изготовлении авиадвигателя: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04 / Анипченко Леонид Алексеевич. – Куйбышев, 1977. – 203 с.
2. Архипов, А.Н. Автоматизированное построение модели рабочей лопатки вентилятора по данным измерений профиля в САД-системе / А.Н. Архипов [и др.]. // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2018. – Том 17. – № 4. – С. 7-17.
3. Балакшин, Б.С. Основы технологии машиностроения / Б.С. Балакшин. – М.: Машиностроение, 1969. – 385 с.
4. Барвинок, В.А. Сборочные, монтажные и испытательные процессы в производстве летательных аппаратов / В.А. Барвинок [и др.]. – М.: Машиностроение, 1996. – 576 с.
5. Безъязычный, В.Ф. Научные и методические основы сборки. Состояние теории / В.Ф. Безъязычный, А.Н. Семёнов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2004. – № 4. – С. 3-7.
6. Безъязычный, В.Ф. Технологические процессы механической и физико-химической обработки в авиадвигателестроении / В.Ф. Безъязычный [и др.]. – М.: Машиностроение, 2007. – 539 с.
7. Безъязычный, В.Ф. Перспективный путь повышения качества сборки роторов ГТД / В.Ф. Безъязычный, Б.Н. Леонов, В.В. Непомилуев, В.Ю. Ерошков / М.: Полет. – 2011. – №10.
8. Безъязычный, В.Ф. Моделирование на ЭВМ процесса сборки ротора газотурбинного двигателя / В.Ф. Безъязычный, В.В. Непомилуев, М.Е. Ильина // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2001. – № 6. – С. 2-5.
9. Безъязычный, В.Ф. Управление качеством сборки изделия с помощью информационной модели / В.Ф. Безъязычный, В.В. Непомилуев, М.Е. Ильина // Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения. – 2001.
10. Белкин, И.М. Допуски и посадки / И.М. Белкин. – М. Машиностроение, 1992. – 307 с.
11. Биргер, И.А. Резьбовые и фланцевые соединения / И.А. Биргер, Г.Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1990. – 368 с.

12. Бойцов, А.Г. Процессы механической и физико-химической обработки в производстве авиационных двигателей / А.Г. Бойцов [и др.]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 584 с.
13. Болотов, М.А. Разработка методики моделирования и исследование процесса измерения деталей ГТД на координатно-измерительных машинах: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / Болотов Михаил Александрович. – Самара, 2012. – 204 с.
14. Бородачев, Н.А. Анализ качества и точности производства / Н.А. Бородачев. – М.: Машгиз, 1946. – 252 с.
15. Бородачев, Н.А. Основные вопросы теории точности производства / Н.А. Бородачев. – М.-Л.: АН СССР, 1950. – 420 с.
16. Бруевич, Н.Г. Основы теории точности механизмов ЭСМ/ Н.Г. Бруевич. – Т.2 – М.: Машгиз, 1948.
17. Бруевич, Н.Г. Точность механизмов и автоматические измерительные средства / Н.Г. Бруевич. – М.: Наука, 1956. – 76 с.
18. Гаврилов, А.Н. Технология авиационного приборостроения / А.Н. Гаврилов. – М.: Оборонгиз, 1962, – 472 с.
19. Гаврилов, А.Н. Точность обработки в приборостроении / А.Н. Гаврилов. – М.: Машиностроение, 1968. – 87 с.
20. Гапшис, В.А. Координатные измерительные машины и их применение / В.А. Гапшис, А.Ю. Каспарайтис, М.Б. Модестов. – М.: Машиностроение, 1988. – 328 с.
21. Гоголев, Д.В. Разработка и исследование методов и средств обеспечения единства измерений геометрических параметров отклонений формы сложнопрофильных поверхностей: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.15/ Гоголев Дмитрий Владимирович. – Москва, 2009. – 329 с.
22. ГОСТ 22061-76 Система классов точности балансировки. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 135 с.
23. ГОСТ 23495-76. Базы и базирование в машиностроении. – М.: Издательство стандартов, 1990.
24. ГОСТ 24642-81. Допуски формы и расположения поверхностей. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002.
25. ГОСТ 25346-2013. Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Основные положения, допуски, отклонения и посадки. – М.: Стандартиформ, 2014. – ISO 286-1:2010
26. ГОСТ 31254-2004. Основные нормы взаимозаменяемости. Геометрические элементы. Общие термины и определения. – М.: Стандратинформ, 2005.

27. ГОСТ 31320-2006 (ИСО 11342:1998) Вибрация. Методы и критерии балансировки гибких роторов. – М.: Стандартинформ, 2008. – 61 с.
28. ГОСТ 34100.1-2011. Неопределенность измерения. Ч.1. Введение в руководства по выражению неопределенности измерения. – М.: Стандартинформ, 2012. – 107 с.
29. ГОСТ ИСО 1940-1-2007 Вибрация. Требования к качеству балансировки жестких роторов. – М.: Стандартинформ, 2007. – 27 с.
30. ГОСТ Р 53442-2009. Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Допуски формы, ориентации, месторасположения и биения. – М.: Стандартинформ, 2010. – 51 с.
31. ГОСТ Р 53442-2015 (ИСО 1101:2012) Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Установление геометрических допусков. Допуски формы, ориентации, месторасположения и биения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 110 с.
32. ГОСТ Р 8.000-2015 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2019.
33. ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1 Основные положения и определения. – М.: Стандартинформ, 2009.
34. Грешилов, А.А. Математические методы построения прогнозов / А.А. Грешилов, В.А. Стакун, А.А. Стакун. – М.: Радио и связь, 1997. – 112 с.
35. Гусаров, А.А. Балансировка гибких роторов с распределённой массой / А.А. Гусаров. – М.: Наука, 1974. – 144 с.
36. Гусаров, А.А., Балансировка упруго деформируемых роторов методом постановки балансировочных грузов на упругих элементах / А.А. Гусаров, Э.Г. Делгин // Колебания и уравнивание роторов. – М.: Наука, 1973. – С. 99-103.
37. Демин, Ф.И. Исследование точности бесцентрового шлифования выпуклых конических поверхностей методом продольной подачи до упора: дис. ... канд. техн. наук: 05.00.00 / Демин Феликс Ильич. – Куйбышев, 1969. – 177 с.
38. Демин, Ф.И. Фундаментальные основы обеспечения точности при производстве двигателей авиационной и ракетной техники / Ф.И. Демин. – М.: Машиностроение, 2015. – 244 с.
39. Джунковский, А.В. Исследование способов измерения концевых мер длины при калибровке координатно-измерительных машин / А.В. Джунковский, В.П. Суслин // Законодательная и прикладная метрология. – 2006. – №5(87). – С. 54-57.

40. Дунин-Барковский, И.В. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И.В. Дунин–Барковский, А.Н. Карташова. – Москва, 1978 г. – 231 с.
41. Евстигнеев, М.И. Изготовление основных деталей авиадвигателей / М.И. Евстигнеев, И.А. Морозов, А.В. Подзей, А.М. Сулима, И.С. Цуканов. – М.: Машиностроение, 1972. – 475 с.
42. Единая система допусков и посадок СЭВ в машиностроении и приборостроении. Контроль деталей: справочник. – М.: Издательство стандартов, 1997. – 200 с.
43. Елисеев, Ю.С. Технология производства авиационных газотурбинных двигателей / Ю.С. Елисеев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2003. – 512 с.
44. Елисеев, Ю.С. Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, К.А. Малиновский. – М.: Высшая школа. 2002. – 355 с.
45. Ермаков, С.М. Статистическое моделирование / С.М. Ермаков, Г.А. Михайлов. – М.: Наука, 1982. – 296 с.
46. Ерошков, В.Ю. Разработка методологии комплектования деталей в роторных пакетах газотурбинных двигателей: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / Ерошков Василий Юрьевич. – Рыбинск, 1999. – 160 с.
47. Журавлев, А.Н. Структурная оптимизация процессов сборки многорядных роликовых опор: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Журавлев Андрей Николаевич. – Самара, 2004. – 118 с.
48. Журавлёв, В.И. Исследование точности геометрических параметров сопряженности при изготовлении авиационных конических колес с круговыми зубьями: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04 / Журавлёв Валентин Иванович. – Куйбышев, 1982. – 170 с.
49. Зубарев, Ю.М. Распространение ошибки методом Монте-Карло для анализа неопределённости соответствия позиционным допускам / Ю.М. Зубарев, С.В. Косаревский // Технология машиностроения. – 2009. – Т. 9. – С. 42-45.
50. Иванов, В.А. Прогнозирование и обеспечение точности сборки колес турбины ГТД: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / Иванов Владимир Алексеевич. – Куйбышев, 1987. – 227 с.
51. Ильина М.Е. Разработка метода управления технологическим процессом сборки ротора ГТД дискового типа на основе компьютерного моделирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Ильина Мария Евгеньевна. – Рыбинск, 2004. – 241 с.

52. Ильянков, А.И. Основы сборки авиационных двигателей / А.И. Ильянков, М.Е. Левит. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
53. Кашуба, Л.А., Проходцев, Е.А. Разработка системы обработки информации, полученной измерением геометрии изделий с помощью координатно-измерительных машин [Электронный ресурс] // Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание. – Дубна, 2013. URL: <http://www.sanse.ru/download/162>.
54. Кашуба, Л.А. Алгоритм моделирования реальной геометрии детали [Электронный ресурс] / Л.А. Кашуба // Системный анализ в науке и образовании. – 2011. – №3. – С. 1-14. URL: <http://www.sanse.ru/archive/21.-0421100111\0018>.
55. Кашуба, Л.А. Алгоритм обработки информации, полученной при измерении реальной геометрии деталей на координатно-измерительных машинах [Электронный ресурс] / Л.А. Кашуба // Системный анализ в науке и образовании. – 2011. – №3. – С. 1-14. URL: <http://www.sanse.ru/archive/21>.
56. Кашуба, Л.А. Геометрические параметры и погрешности реальной геометрии недеформируемых деталей машиностроения / Л.А. Кашуба // Системный анализ в науке и образовании. – 2013. – №4. – С. 1-18.
57. Кашуба, Л.А. Современный взгляд на геометрию реальных поверхностей деталей изделий машиностроения / Л.А. Кашуба // Системный анализ в науке и образовании. – 2014. – №1. – С. 1-15.
58. Кашуба, Л.А. Геометрия сборки недеформируемых деталей. / Л.А. Кашуба // Системный анализ в науке и образовании. – 2011. – №4. – С. 1-9
59. Кован, В.М. Основы технологии машиностроения / В.М. Кован, В.С. Корсаков, А.Г. Косилова. – М.: Машиностроение, 1965. – 492 с.
60. Кожевникова, Е.В. Методика оптимизации углового положения деталей роторного пакета / Е.В. Кожевникова, В.В. Непомилуев // Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения. – 2002.
61. Козловский, Н.С. Основы стандартизации, допуски, посадки и технические измерения / Н.С. Козловский, А.Н. Виноградов. – М. Машиностроение, 1982. – 202 с.
62. Корсаков, В.С. Точность механической обработки / В.С. Корсаков, – М.: Машгиз, 1961. – 379 с.
63. Костинский, А.С. О принципах сплайн-экстраполяции геофизических данных / А.С. Костинский // Доклады национальной академии наук Украины. – 2014. – №2. – С. 111-117.

64. Кравченко, И.Ф. Сборка роторов ГТД барабанно-дискового типа: типовые процессы, алгоритмы расчетов: монография / И.Ф. Кравченко, Э.В. Кондратюк, В.А. Титов, Г.Б. Филिमонихин, Г.И. Пейчев, А.Я. Качан. – Киев: КВИЦ, 2011. – 198 с.
65. Кудрявцев, М.Д. Оценивание погрешностей координатных измерений геометрических параметров в условиях плохо обусловленной измерительной задачи / М.Д. Кудрявцев, Н.Л. Яворовская // Сб. тез. докл. VIII конф. Молодых ученых «Навигация и управлением движением»: гироскопия и навигация. – СПб., 2006. – №2(53). – С. 1-2.
66. Кутай, А.К. Исследование технологической точности и взаимозаменяемости в производственных условиях на базе математической статистики: дис. ... д-р техн. наук: 05.00.00 / Кутай Антон Константинович. – Ленинград, 1969. – 600 с.
67. Левит, М. Е. Вибрация и уравнивание роторов авиадвигателей / М. Е. Левит, В. П. Ройзман. – М: Машиностроение, 1970. – 172 с.
68. Левит, М.Е. Балансировка деталей и узлов / М. Е. Левит, В.М. Рыженков. – М: Машиностроение, 1986. – 248 с.
69. Левит, М.Е. Справочник по балансировке / М.Е. Левит, Ю.А. Агафонов, Л.Д. Вайнгортин, А.И. Максименко [и др.]. – М.: Машиностроение, 1992. – 264 с.
70. Лысенко, В.Г. Разработка и исследование системы обеспечения единства координатных измерений геометрических параметров обработанных поверхностей: дис. ... д-р техн. наук: 05.11.15 / Лысенко Валерий Григорьевич. – Москва, 2005. – 438 с.
71. Майорова, Е.А. Повышение качества изготовления высокоточных изделий машиностроения путем обеспечения управляемости процесса сборки на основе компьютерного моделирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.23 / Майорова Екатерина Александровна. – Рыбинск, 2009. – 250 с.
72. Маталин, А.А. Точность механической обработки и проектирование технологических процессов / А.А. Маталин. – М.: Машиностроение, 1970. – 320 с.
73. МИ 2552-99 ГСИ. Рекомендация. Применение Руководства по выражению неопределенности измерений. – СПб.: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1999. – 31 с.
74. МИ 2569-99 ГСИ. Машины координатно-измерительные портального типа. Методика поверки. – М.: ВНИИМС, 1999. – 10 с.
75. Мурзин, С.П. Разработка методики оценки неопределённостей координатных измерений, разработка метода формирования лазерным воздействием структур материалов с повышением эксплуатационных свойств: отчёт по ПНИЭР / С.П. Мурзин, М.А. Болотов [и др.]. – Самара, 2015. – 355 с.

76. Непомилуев, В.В. Возможные пути повышения качества сборки роторов ГТД / В.В. Непомилуев // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2003. – № 11. – С. 5-7.
77. Непомилуев, В.В. Разработка технологических основ обеспечения качества сборки высокоточных узлов газотурбинных двигателей: дис. ... д-р техн. наук: 05.07.05 / Непомилуев Валерий Васильевич. – Рыбинск, 2000. – 356 с.
78. Непомилуев, В.В. Технология виртуальной сборки – способ автоматизации индивидуального подбора деталей / В.В. Непомилуев // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2000. – № 1. – С. 31-35.
79. Непомилуев, В.В. Исследование влияния показателей качества деталей на точность размеров ротора ГТД дискового типа / В.В. Непомилуев, М.Е. Ильина // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2002. – № 4. – С. 2-5.
80. Непомилуев, В.В. Исследование размерных цепей роторов ГТД методом имитационного моделирования / В.В. Непомилуев, М.Е. Ильина // Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения. – 2001.
81. Непомилуев, В.В. Процессный подход к управлению качеством сборки / В.В. Непомилуев, М.Е. Ильина // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2002. – № 8. – С. 37-39.
82. Непомилуев, В.В. Система обеспечения качества сборки путем индивидуального подбора деталей / В.В. Непомилуев, Е.В. Кононова // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2003. – № 11. – С. 10-11.
83. Непомилуев, В.В. Исследование возможности повышения качества изготовления высокоточных изделий машиностроения путем учета компенсирующей способности деталей при использовании метода индивидуального подбора / В.В. Непомилуев, Е.А. Майорова // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2009. – № 9. – С. 11-14.
84. Непомилуев, В.В. Виртуальная сборка ротора как способ снижения статического дисбаланса ротора / В.В. Непомилуев, А.А. Федоров // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2003. – № 7. – С. 14-17.
85. Никитин, А.Н. Технология сборки двигателей летательных аппаратов / А.Н. Никитин. – М.: Машиностроение, 1982. – 269 с.
86. Осетров, В.Г. Теоретические основы компенсирующих взаимодействий и структурной оптимизации технологии сборки машин: дис. ... д-р техн. наук: 05.02.08 / В.Г. Осетров. – Ижевск, 1997. – 300 с.

87. ОСТ 1-11139-73. Двигатели газотурбинные. Соединение дисков компрессора фланцевое. Конструкция и размеры.

88. Печенин, В.А. Повышение точности и производительности измерений при изготовлении лопаток компрессора ГТД на основе разработки методик, обеспечивающих увеличение информативности и оптимизацию метрологического процесса: дис. ...канд. техн. наук: 05.07.05 / Печенин Вадим Андреевич. – Самара, 2017. – 191 с.

89. План мероприятий («дорожная карта») «Технет» (передовые производственные технологии) Национальной технологической инициативы [Электронный ресурс] / URL: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/02_february/15/Dorozhnaya_karta_TechNet.pdf

90. Подзей, А.В. Технология авиадвигателестроения / А.В. Подзей. – М.: Машиностроение, 1957. – 416 с.

91. Прокофьев, Л.Н. Суммирование векторных производственных погрешностей в авиадвигателестроении с использованием метода имитационного моделирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / Прокофьев Леонтий Николаевич. – Куйбышев, 1985. – 213 с.

92. Пронищев, Н.Д. Технологические методы обеспечения надежности двигателей летательных аппаратов / Н.Д. Пронищев, А.П. Шулепов. – Самара: СГАУ, 2011. – 263 с.

93. Прохоров, А.Н. Цифровая трансформация. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание второе, исправленное и дополненное / А.Н. Прохоров, Л.Г. Коник. – М.: ООО «КомНьюс Групп», 2019. – 368 с.

94. Прохоров, А.Н. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное / А.Н. Прохоров, М.Н. Лысачев; под ред. А.И. Боровкова. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с.

95. Прохоров, С.А. Аппроксимативный анализ случайных процессов / С.А. Прохоров. – Самарский государственный аэрокосмический университет, 2001. – 380 с.

96. Р 50.1.062-2007. Статистические методы. Неопределенность при повторных измерениях и иерархических экспериментах. – М.: Стандартиформ, 2007.

97. Ратмиров, В.А. Управление станками гибких производственных систем / В.А. Ратмиров. – М.: Машиностроение, 1987. – 272 с.

98. Решетов, Д.Н. Работоспособность и надёжность деталей машин / Д.Н. Решетов / М.: Высшая школа, 1974, – 206 с.

99. Роджерс, Д. Математические основы машинной графики / Д. Роджерс, Дж. Адамс. – М.: Мир, 2001. – 604 с.

100. РТМ 1.4.775-80. Сборка и балансировка роторов ГТД: Руководящий технологический материал. – М.: НИАТ, 1981. – 127 с.

101. Рузанов, Н.В. Повышение производительности и точности изготовления лопаток компрессора ГТД на основе разработки и использования аппаратно-программного комплекса для измерений геометрии сложнопрофильных поверхностей: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / Рузанов Николай Владимирович – Самара, 2019. – 153 с.
102. Семенов, А.Н. Теория компенсирующей сборки узлов ГТД с избыточным базированием деталей: дис. ... д-р техн. наук: 05.02.08 / Семенов Александр Николаевич – Рыбинск, 2006. – 418 с.
103. Семенов, Е.И. Ковка и объемная штамповка / Е.И. Семенов. – М. Машиностроение, 1972. – 408 с.
104. Смирнов, Н.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений / Н.В. Смирнов, М.В. Дунин-Барковский. – М.: Наука, 1965. – 450 с.
105. Соболев, М.И. Метод Монте-Карло / М.И. Соболев. – М.: Наука, 1972. – 63 с.
106. Соколовский, А.П. Курс технологии машиностроения / А.П. Соколовский, – М.: Машгиз, 1947. – 430 с.
107. Сурков, О.С. Прогнозирование и обеспечение точности изделий сложной конструктивной формы: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / Сурков Олег Станиславович. – Куйбышев, 1996. – 195 с.
108. Суслин, В.П. Новый метод определения геометрических параметров объектов при измерениях на малых областях / В.П. Суслин, А.В. Джунковский, М.Г. Шутер // Автомобильная промышленность. – 2005. – №5. – 2 с.
109. Суслов, В.И. Эконометрия: учебное пособие / В.И. Суслов, Н.М. Ибрагимов, Л.П. Талышева, А.А. Цыплаков. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2005. – 744 с.
110. Тимофеев, В.П. Условия компенсации дисбалансов гибкого ротора сборкой по расчетным данным / В.П. Тимофеев // Технология авиационного производства: Сб. науч. трудов; под ред. П.Н. Беянина. – М.: НИАТ, 1981. – С. 146-150.
111. Тимофеева, Е.В. Исследование влияния параметров качества изготовления деталей на качество сборки ротора ГТД / Е.В. Тимофеева // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2003. – № 11. – С. 7-9.
112. Трухман, И.М. Разработка метода формирования оптимальных размерной структуры при автоматизированном проектировании технологических процессов механической обработки деталей авиационных изделий: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04 / Трухман Игорь Михайлович. – Куйбышев, 1984. – 262 с.

113. Федоров, А.А. Виртуальная сборка как способ снижения себестоимости / А.А. Федоров // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2003. – № 4. – С. 16-18.
114. Федорченко, Г.П. Разработка методов прогнозирования ресурса деталей роторов ГТД в условиях реального нагружения: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / Г.П. Федорченко. – Самара, 2013. – 154 с.
115. Фигаро, В.П. Основы проектирования технологических процессов и приспособлений. Методы обработки поверхностей / В.П. Фигаро. – М.: Машиностроение, 1973. – 468 с.
116. Шевелев, А.С. Исследование точности размерные связей в авиадвигателестроении: дис. ... д-р. техн. наук: 05.00.00 / Шевелев Анатолий Сергеевич. – Куйбышев, 1968. – 304 с.
117. Шевелев, А.С. Определение точности расстояния между осями обрабатываемых отверстий / А.С. Шевелев. – М.: ИВУЗ. – Серия «Авиационная техника», № 4, 1965. – 79-81 с.
118. Шевелев, А.С. Суммирование пространственных отклонений при круговом рассеивании. Взаимозаменяемость, точность и методы измерения в машиностроении / А.С. Шевелев. – М.: Машгиз, 1958. – 101-114 с.
119. Якушев, А.И. Взаимозаменяемость стандартизация и технические измерения / А.И. Якушев. – М.: Машиностроение, 1975. – 471 с.
120. Якушев, А.И. Функциональная взаимозаменяемость, как основной принцип проектирования и производства машин и механизмов. Взаимозаменяемость и технические измерения в машиностроении / А.И. Якушев. – М.: Машиностроение, 1964. – 3-17 с.
121. Abdul-Rahman, H.S. Freeform surface filtering using the lifting wavelet transform / H.S. Abdul-Rahman, X.J. Jiang, P.J. Scott // Precision Engineering. – 2013. – Vol. 37, № 1. – P. 187-202.
122. Al-Ahmari, A. Computer-aided inspection planning: theory and practice / A. Al-Ahmari, E. Abouel Nasr, O. Abdulhameed. – CRC Press, 2016. – 359 с.
123. Algeo, M.E.A. Form Error Models of the NIST Algorithm Testing System / M.E.A. Algeo, T.H. Hopp. – Gaithersburg, US: National Institute of Standards and Technology, 1992. – 11 p.
124. Ameta, G., Samper, S., Giordano, M. Comparison of spatial math models for tolerance analysis: tolerance-maps, deviation domain and TTRS / G. Ameta, S. Samper, M. Giordano // Journal of Computing and Information Science in Engineering. – 2011. – 11(2). – P. 255–267.

125. Anuj, B. Image compression using modified fast Haar wavelet transform / B. Anuj, A. Rashid // *World Applied Sciences Journal*. – 2009. – Vol. 7, № 5. – P 647–653.
126. Balakrishna, P. An integrated approach for the estimation of spherical form tolerance / P. Balakrishna, S. Raman. – Elsevier, 2006. – Pp. 11-12.
127. Ballu, A. Geometrical reliability of over constrained mechanisms with gaps / A. Ballu, J.-Y. Plantec, L. Mathieu // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 2008. – Vol. 57, № 1. – P. 159-162.
128. Baturin, O.V., Popov, G.M., Kolmakova, D.A., Novikova, Y.D. The best model for the calculation of profile losses in the axial turbine / O.V. Baturin, G.M. Popov, D.A. Kolmakova, Y.D. Novikova // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – V 803, no. – 1. 012017. DOI: 10.1088/1742-6596/803/1/012017.
129. Bossio, J.M. Angular misalignment in induction motor with flexible coupling / J.M. Bossio, G.R. Bossio, C.H. De Angelo // *Proceedings of the IEEE IECON*. – 2016. – P. 1033-1038.
130. Cao. A comprehensive review of tolerance analysis models / Yanlong Cao, Ting Liu, Jiangxin Yang // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (Springer-Verlag London Ltd.)*. – 2018. – № 97. – P. 3055–3085. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1920-2>.
131. Chandra Sekhar Reddy, M. Detection and monitoring of coupling misalignment in rotors using torque measurements / M. Chandra Sekhar Reddy, A.S. Sekhar // *Journal of Measurement*. – 2015. – Vol. 61. – P. 111-122.
132. Chen, H., Jin, S., Li, Z., Lai, X. A comprehensive study of three dimensional tolerance analysis methods / H. Chen, S. Jin, Z. Li, X. Lai // *Comput Aided Des*. – 2014. – 53. – P. 1–13.
133. Conover, W. J. *Practical Nonparametric Statistics* / W.J. Conover. – Hoboken, US: John Wiley & Sons, Inc., 1980. – 592 p.
134. Cox, M.G. Evaluation of measurement uncertainty based on the propagation of distributions using Monte Carlo simulation / M.G. Cox, P. Harris, B.R.-L. Siebert // *Measurement Techniques*. – 2003. – Vol. 46, № 9. – P. 824-833.
135. Cox, M.G. Determining CMM behavior from measurements of standard artefacts: NPL Report CISE 15/98 / M.G. Cox, A.B. Forbes, P.M. Harris, G.N. Peggs. – 1998. – 52 Pp.
136. Cox, M.G. Measurement of artefacts using repositioning methods: NPL Report CLM 2 / M.G. Cox, A.B. Forbes, G.N. Peggs. – 1997. – 21 Pp.
137. Cross, K.J. The uncertainty of radius estimation in least-squares sphere-fitting, with an introduction to a new summation based method / K.J. Cross, J.W. McBride, J.J. Lifton // *Precision Engineering*. – 2014. – Vol. 38, № 3. – P. 499-505.

138. Daubechies, I. Ten Lectures on Wavelets / I. Daubechies. – Philadelphia, US : SIAM, 1992. – 355 p.
139. De Boor, C.A. Practical Guide to Splines (Revised Edition) / C. De Boor. – New York: Springer, 2001. – 348 p.
140. Deepthikumar, M.B. Modal balancing of flexible rotors with bow and distributed unbalance / M.B. Deepthikumar, A.S. Sekhar, M.R. Srikanthan // Journal of Sound and Vibration. – 2013. – P. 6216-6233.
141. Denkena, B. Engine blade regeneration: a literature review on common technologies in terms of machining / B. Denkena [et al.] // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – Vol. 81, № 5. – P. 917-924.
142. Du, S. A shearlet-based separation method of 3D engineering surface using high definition metrology / S. Du, C. Liu, D. Huang // Precision Engineering. – 2015. – Vol. 40. – P. 55-73.
143. Evaluation of measurement data: Guide to the expression of uncertainty in measurement / JCGM. – Elsevier, 2008. – Pp. 119-120.
144. Flack, D. CMM verification / D. Flack // NPL Measurement good practice guide. – 2001. – №42. – 113 Pp.
145. Garcia-Ramirez, A.G. Smart sensor for online detection of multiple combined fault sin VSD-fed induction motors / A.G. Garcia-Ramirez, R.A. Osornio-Rios, D. Granados-Lieberman, A. Garcia-Perez, R.J. Romero-Troncoso // Journal of Sensors 12. – 2012. – P. 11989-12005.
146. Geetha, K. Multi-objective optimization for optimum tolerance synthesis with process and machine selection using a genetic algorithm / K. Geetha, D. Ravindran, M.S. Kumar, M.N. Islam // International Journal Adv Manuf Technol. – DOI 10.1007/s00170-012-4662-6. – 2021.
147. Guo, J. A tolerance analysis method for rotating machinery / J. Guo, J. Hong, Z. Yang, Y. Wang // 12th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, Procedia CIRP 10. – 2013. – P. 77-83.
148. ISO 10360-1:2000 Geometrical Product Specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) – Part 1: Vocabulary. Геометрические характеристики изделий (GPS). Приемочные и повторные проверочные испытания координатно-измерительных машин (СММ). Часть 1: Терминология. – М.: Издательство стандартов, 2000. – 54 с.
149. ISO 10360-2:2009 Geometrical product specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) – Part 2: CMMs used for measuring

linear dimensions. Геометрические спецификации изделий (GPS). Приемочные и повторные проверочные испытания координатно-измерительных машин (СММ). Часть 2: СММ, используемые для линейных измерений. – М.: Издательство стандартов, 2010. – 36 с.

150. ISO 10360-5:2010 Geometrical product specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) – Part 5: CMMs using single and multiple stylus contacting probing systems. Геометрические характеристики изделий (GPS). Приемочные и повторные проверочные испытания координатно-измерительных машин (СММ). Часть 5: Координатно-измерительные машины с контактными измерительными системами с несколькими щупами. – М.: Издательство стандартов, 2010. – 46 с.

151. Jalan, Arun Kr. Model based fault diagnosis of a rotor – bearing system for misalignment and unbalance under steady – state condition / Arun Kr. Jalan, A.R. Mohanty // *Journal of Sound and Vibration*. – 2009. – Vol. 327. – P. 604-622.

152. Kandikjan, T. A mechanism for validating dimensioning and tolerancing schemes in CAD systems / T. Kandikjan, J.J. Shah, J.K. Davidson // *CAD Computer Aided Design*. – 2001. – Vol. 33, № 10. – P. 721-737.

153. Kaneko, Y. Steam turbine rotor design and rotor dynamics analysis / Y. Kaneko, H. Kanki, R. Kawashita // *Advances in steam turbines for modern power plants*. – 2017. – P. 128-151.

154. Kohnke, P. ANSYS Theory Reference Release 5.6 / P. Kohnke // *ANSYS Theory Reference.001242. Eleventh Edition. SAS IP, Inc.* – 1999. – 1286 p.

155. Kruth, J.P. Uncertainty determination for CMMs by Monte Carlo simulation integrating feature form deviations/ J.-P. Kruth, N. Van Gestel, P. Bleys, F. Welkenhuyzen // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 2009. – Vol. 58, № 1. – P. 463-466.

156. Kucuker, A. Detection of mechanical imbalances of induction motors with instantaneous powering nature analysis / A. Kucuker, M. Bayrak // *Journal Electr Eng. Technol.* – 2013. – P. 1116-1121.

157. Lilliefors, H. On the Kolmogorov–Smirnov test for normality with mean and variance unknown / H. Lilliefors // *Journal of the American Statistical Association*. – 1967. – Vol. 62. – № 318. – P. 399-402.

158. Mahfoud, J. Experimental model to control and monitor rotating machines / J. Mahfoud, J. Der. Hagopian, N. Levecque, V. Steffen Jr. // *Journal of mechanism and machine theory* 44. – 2009. – P. 761-771.

159. Mazur, M. Tolerance analysis and synthesis of Assemblies subject to loading with process Integration and design optimization tools // *Doctor of Philosophy thesis*. – Melbourne, Australia: RMIT University, 2013. – 258 p.

160. MI Recommendation 2552-99. State system for ensuring unity of measurements. Applying the «Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement» / JCGM. – Elsevier, 2008.
161. Mirdamadi, S. Cost estimation method for variation management / S. Mirdamadi [et al.] // *Procedia CIRP*. – 2013. – Vol. 10. – P. 44-53.
162. Morias, T.S. Optimization of unbalance distribution in rotating machinery with localized non linearity / T.S. Morias, J. Der Hagopian, V. Steffen Jr. // *Journal Mechanism and Machine Theory*. – 2014. – Vol. 72. – P. 60-70.
163. Moroni, G. Optimal inspection strategy planning for geometric tolerance verification / G. Moroni, S. Petrò // *Precision Engineering*. – 2014. – Vol. 38, № 1. – P. 71-81.
164. Mujezinovic, A.A. New mathematical model for geometric tolerances as applied to polygonal faces / A. Mujezinovic, J.K. Davidson, J.J. Shah // *Journal of Mechanical Design*. – 2004. – Vol. 126, № 3. – P. 504-518.
165. Muralikrishnan, B. Computational Surface and Roundness Metrology / B. Muralikrishnan, J. Raja. – London, UK: Springer-Verlag, 2009. – 263p.
166. Muralikrishnan, Bala. Computational surface and roundness metrology / Bala Muralikrishnan, Jay Raja. – Springer-Verlag London Limited, 2009. – 264 Pp.
167. Nievergelt, Y. Wavelets Made Easy / Y. Nievergelt. – Boston, US: Birkhauser, Inc, 1999. – 297p.
168. Patel, T.H. Vibration response of misaligned rotor / T.H. Patel, A.K. Darpe // *Journal of Sound Vibration*. – 2009. – №325.– P. 609-628.
169. Phillips, S.D. The estimation of measurement uncertainty of small circular features measured by coordinate measuring machines / S. D. Phillips, B. Borchardt, W. T. Estler, John Buttress. – Elsevier, 1999. – Pp. 4-5.
170. Piegl, L. The NURBS Book / L. Piegl, W.Tiller. – Berlin: Springer-Verlag, 1997. – 646 p.
171. Piotrowski, J. Shaft Alignment Hand book Third Edition / J. Piotrowski // CRC Press, Taylor and Francis Group. – 2007. – 832 p.
172. Qiao, W. Im balance fault detection of direct-drive wind turbines using generate or current signals / W. Qiao, X. Gong // *IEEE Trans. Energy Convers.* – 2012. – P. 468-476.
173. Rajamohan, G. Practical measurement strategies for verification of freeform surfaces using coordinate measuring machines / G. Rajamohan, M.S. Shunmugam, G.L. Samuel. – *Metrology and Measurement Systems*, XVIII, 2011. – P. 209-222.
174. Saddik, A.EI. Digital Twins: The Convergence of Multimedia Technologies/ *IEEE MultiMedia*. – 2018. – 25 (2). – P. 87-92.

175. Sasahara, H. Surface grinding of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) with an internal coolant supplied through grinding wheel / H. Sasahara [et al.] // Precision Engineering. – 2014. – Vol. 38, № 4. – P. 775-782.
176. Saucedo-Dorantes, J.J. Multiple-fault detection methodology based on vibration and current analysis is applied to bearings in induction motors and gearboxes on the kinematic chain / J.J. Saucedo-Dorantes, M. Delgado-Prieto, J.A. Ortega-Redondo, R.A. Osornio – Rios, R.J. Romero-Troncoso // Shock and Vibration. – 2016. – 13 p.
177. Schleich, B., Wartzack, S. Tolerance analysis of rotating mechanism based on skin model shapes in discrete geometry / B. Schleich, S. Wartzack // Procedia CIRP 27. – 2015. – 10–15.
178. Smith, B. Modal structure imbalance fault detection for rotating machines / B. Smith, Q. Zhao // International federation of automatic control. – 2015. – P. 1420-1425.
179. Sodhi, R. Relative Positioning of Variational Part Models for design Analysis / R. Sodhi, J.U. Turner // Computer-Aided Design. – 1994. – Vol. 26, No. 5. – P. 366-378.
180. Song, J. The effect of tip size on the measured Ra of surface roughness specimens with rectangular profiles / J. Song [et al.] // Precision Engineering. – 2014. – Vol. 38, № 1. – P. 217-220.
181. Stepanenko, I.S., Pechenin, V.A., Ruzanov, N.V., Khaimovich, A.I. Technique of increasing the accuracy of GTE parts manufactured by selective laser melting / I.S. Stepanenko, V.A. Pechenin, N.V. Ruzanov, A.I. Khaimovich // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 1096, no. 1. 012143. – DOI: 10.1088/1742-6596/1096/1/012143.
182. Stuppy, J., Meerkamm, H. Tolerance analysis of mechanisms taking into account joints with clearance and elastic deformations / J. Stuppy, H. Meerkamm // Proceedings of the 17th International Conference on Engineering Design. – 2009. – Vol. 5 – DS 58-5.
183. Sykes, J. The effects of bearing misalignment on the non-linear vibration of aero-engine rotor-damper assemblies / J. Sykes, R. Holmes // Journal of Aerospace Engineering. – 1990. – Vol. 204. P. 83-100.
184. Szabo, J.Z. Vibration diagnostic test for effect of unbalance // 16 th International Conference on Intelligent Engineering System. – 2012. – P. 81–85.
185. Tonks, M.R. Predicting deformation of compliant assemblies using covariant statistical tolerance analysis / M.R. Tonks, K.W. Chase, C.C. Smith // Models for computer aided tolerancing in design and manufacturing. – 2007. – P. 321-330.
186. Trapet, E. The Virtual CMM Concept. Advanced mathematical tools in metrology / E. Trapet, F. Waldele // World scientific publ. comp. – 1996. – P. 238-247.

187. Walter, M., Breitsprecher, T., Gruber, G., Wartzack, S. Simulation based generation of an initial design taking into account geometric deviations and deformations / M. Walter, T. Breitsprecher, G. Gruber, S. Wartzack // Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design. – 2011. – DS 68-10.
188. Walter, M., Sprügel, T., Wartzack, S. Tolerance analysis of systems in motion taking into account interactions between deviations / M. Walter, T. Sprügel, S. Wartzack // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2013. – 227(5). – 709–719.
189. Wang, M. 3D surface form error evaluation using high definition metrology / M. Wang, L. Xi, S. Du // Precision Engineering. – 2014. – Vol. 38, № 1. – P. 230-236.
190. Wenhui, X. Analysis of motion stability of the flexible rotor – bearing system with two unbalanced disks / X. Wenhui, T. Yougang, C. Yushu // Journal of Sound and Vibration. – 2018. – P. 381-391.
191. Whitehouse, D.J. Surfaces and their measurement / D.J. Whitehouse. – London: Hermes Penton Science, 2002. – 425 p.
192. Wilhelm, R.G. Task specific uncertainty in coordinate measurement / R.G. Wilhelm, R. Hocken, H. Schwenke // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2001. – Vol. 50, № 1. – P. 553-563.
193. Williams, J.R. Introduction to wavelets in engineering / J.R. Williams, K. Amaratunga // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 1994. – Vol. 37, – Pp. 2365-2388.
194. Wu, Y. Assembly tolerance analysis method based on the real machine model with three datum planes location / Y. Wu // 13th CIRP conference on Computer Aided Tolerancing, Procedia CIRP 27. – 2015. – P. 47-52.
195. Xul, J. Vibration characteristics of unbalance response for motorized spindle system / J. Xul, X. Zheng, J. Zhang, X. Liu // Journal of Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 174. – P. 331-340.
196. Yamamoto, G.K. A smart experimental setup for vibration measurement and imbalance fault detection in rotating machinery / G.K. Yamamoto, C. Costa // Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing. – 2016. – Vol. 4. – P. 8-18.
197. Yang, J. Efficient Methods for Evaluating Task-Specific Uncertainty in Laser-Tracking Measurement / J. Yang [et al.] // Mapan. – 2015. – Vol. 30, № 2. – P. 105-117.
198. Zhang, D. Random uncertainty propagation in estimates of sphere parameters from coordinate measurements / D. Zhang, P.G. Maropoulos, M. Hill. – Elsevier, 2006. – Pp. 6-7.

199. Zhang, Z. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces / Z. Zhang // *International Journal of Computer Vision*. – 1994. – Vol. 13. – № 2. – P. 119-152.
200. Zhu, Z. An improved tolerance analysis method based on skin model shapes of planar parts / Z. Zhua, L. Qiaoa, N. Anwer // *Journal of Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 56. – P. 237-242.
201. Zia, A. The influence of assembly clearance on the deformation and stress of an assembly structure through FEA simulation / A. Zia, L. Qiao // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2012. – Vol. 26, № 6. – P. 1823-1827.
202. Ахмедзянов, А.М. Проектирование авиационных газотурбинных двигателей [Текст] / А.М. Ахмедзянов [и др.] ; под ред. А.М. Ахмедзянова. – М. : Машиностроение, 2000. – 454 с.
203. Liu, Q. On the effects of CMM measurement error on form tolerance estimation [Text] / Q.Liu, C.C.Zhang, H.P.Ben Wang. – Elseiver, 2001. – 14-15 Pp.
204. Джунковский А.В. Повышение точности измерений и совершенствование программного обеспечения координатно – измерительных машин [Текст]: дис. ... к.т.н. / А.В. Джунковский. – М., 2007. – 142 с.
205. Марков, Н.Н. Влияние отклонения от круглости поверхностей цилиндрических изделий на точность их центрирования [Текст] / Н.Н. Марков, Н. Гипп // *Вестник машиностроения*. – 1979. – №5. – С. 14-17.
206. Марков, Н.Н. Определение диаметра прилегающего цилиндра [Текст] / Н. Н. Марков, С. Вайханский // *Вестник машиностроения*. – 1983. – №2. – С. 35-37.
207. Acharya, S.B. A multivariate statistical analysis on sampling uncertainties of geometric and dimensional errors for circular features [Text] / S.B. Acharya. – Elseiver, 2004. – 45 Pp.
208. Maheshwari, N. On the selection of CMM based inspection methodology for circularity tolerances [Text] / N. Maheshwari. – Elseiver, 2001. – 58 Pp.
209. Summerhays, K.D. Optimizing discrete point sample patterns and measurement data analysis on internal cylindrical surfaces with systematic form deviations [Text] / K. D. Summerhays, R. P. Henke, J. M. Baldwi, R. M. Cassou, – Elseiver, 2002. – 17 Pp.
210. Kruth, J.-P. Uncertainty determination for CMMs by Monte Carlo simulation integrating feature form deviations [Text] / Jean-Pierre Kruth, Nick Van Gestel, Philip Bleys, Frank Welkenhuyzen // *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. – 2009. – №58. – Pp. 463-466.
211. Maheshwari, N. On the selection of CMM based inspection methodology for circularity tolerances [Text] / N. Maheshwari. – Elseiver, 2001. – 58 Pp.

212. Чудов В.А., Цидулко Ф.В., Фрейндгейм Н.И. Размерный контроль в машиностроении. М.: Машиностроение, 1982. 328 с.
213. Автоматизация измерений при применении координатных измерительных машин/ А.Е. Кобринский, Е.И. Левковский, А.Е.Рукин, Н.А. Серков // Станки и инструмент. 1979. №1. С. 9–12.
214. Раманаускас В., Тирва Ж. Операции управления КИМ // Материалы конференции «Интенсификация производства, создание новых технологий, изделий и материалов». Редакционный совет Министерства высшего и среднего специального образования Литовской ССР. Вильнюс, 1984. С. 74–75.
215. ISO/R1938:1971 ISO system of limits and fits - Part II Inspection of plain workpieces.
216. ГОСТ 24643-81 Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Числовые значения.
217. ГОСТ Р 50056-92. Основные нормы взаимозаменяемости. Зависимые допуски формы, расположения и координирующих размеров. Основные положения по применению.
218. РМГ 29-99 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения [Текст]. - М.: Издательство стандартов, 2011. – 60 с.
219. МИ 2552-99 ГСИ. Рекомендация. Применение Руководства по выражению неопределенности измерений. – СПб.: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1999. – 31 с.
220. Р 50.1.062-2007. Статистические методы. Неопределенность при повторных измерениях и иерархических экспериментах.
221. Ратмиров, В.А. Управление станками гибких производственных систем [Текст] / В.А. Ратмиров – М.: Машиностроение, 1987. – 272 с.
222. Corrado A, Polini W (2017) Manufacturing digi in variational and vector-loop models for tolerance analysis of rigid parts. Int J Adv Manuf Technol 88(5–8):2153–2161
223. Liu Y, Gao S, Wu Z, Yang J (2003) Hierarchical representation model and its realization of tolerance based on feature. Jixie Gongcheng Xuebao(Chinese Journal of Mechanical Engineering)(China) 39(3):1–7
224. You X (2008) GapSpace multi-dimensional assembly analysis. Dissertations & Theses - Gradworks
225. Jiang K, Davidson JK, Shah JJ, Liu J Using tolerance-maps to transfer datum plane from design tolerancing to machining tolerancing. In: ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2013. American Society of Mechanical Engineers, pp V004T005A023-V004T005A023

226. Adragna PA, Samper S, Favreliere H (2010) How form errors impact on 2D precision assembly with clearance? *Ifip Adv Inf Comm Technol* 315:50–59.
227. Arroyave-Tobón S, Teissandier D, Delos V (2017) Applying screw theory for summing sets of constraints in geometric tolerancing. *Mech Mach Theory* 112:255–271. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.02.004>
228. Teissandier D, Couétard Y, Gérard A (1999) A computer aided tolerancing model: proportioned assembly clearance volume. *Comput Aided Des* 31(13):805–817
229. Li H, Zhu H, Zhou X, Li P, Yu Z (2016) A new computer-aided tolerance analysis and optimization framework for assembling processes using DP-SDT theory. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*:1–12
230. Corrado A, Polini W (2017) Manufacturing signature in Jacobian and torsor models for tolerance analysis of rigid parts. *Robot Comput Integr Manuf* 46:15–24
231. Zeng W, Rao Y, Wang P, Yi W (2017) A solution of worst-case tolerance analysis for partial parallel chains based on the unified Jacobian-Torsor model. *Precis Eng* 47:276–291
232. Schleich B, Anwer N, Mathieu L, Wartzack S (2014) Skin model shapes: a new paradigm shift for geometric variations modelling in mechanical engineering. *Comput Aided Des* 50(3):1–15
233. Сулима, А.М. Основы технологии производства газотурбинных двигателей [Текст] / А.М. Сулима, А.А. Носков, Г.З. Серебренников – М. : Машиностроение, 1996. – 480 с.
234. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения [Текст]: учеб. пособие для ВТУЗов / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Академия, 2003. – 459 с.
235. Egorov I.N. Technology of multipurpose optimization of gas-turbine engines and their components / Egorov I.N., Kretinin G.V., Leshchenko I.A.1, Kostiuk S.S. Тип: статья в сборнике трудов конференции Язык: английский Год издания: 1998 American society of mechanical engineers (paper) *Proceedings of the 1998 International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition*. editors: Anon. Stockholm, Sweden, 1998
236. Marchukov E. Optimization of blades stagger angles of the three-spool axial compressor to improve of efficiency of the gas turbine engine / Marchukov E., Egorov I., Popov G., Goriachkin E., Novikova Y. Тип: статья в сборнике трудов конференции Язык: английский Год издания: 2017.
237. Акулич И.Л. Математическое программирование в примерах и задачах: Учеб. пособие для студентов эконом. спец. вузов. — М.: Высш. шк., 1986

238. Уилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. Пер. с англ. — М.: Мир, 1985.
239. Резание труднообрабатываемых материалов / Под ред. П.Г. Петрухи. — М.: Машиностроение, 1972. — 176 с.
240. Резников Н.И. Учение о резании металлов. — М.:Машгиз, 1947. — 588 с.
241. Патент №2639993 Российская Федерация, МПК G01B 11/27 (2006.01). Устройство для автоматизированного контроля соосности и центровки механических конструкций: № 2016141214: заявл. 19.10.2016: опубл. 25.12.2017 / Болотов М.А., Печенин В.А., Рузанов Н.В., Грачев И.В.; заявитель Самарский университет. — 14 с.
242. Freeman R. E. Strategic Management: A Stakeholder Approach. — First Edition. — Boston: Harpercollins College Div, January 1984. — 275 p.
243. Белобородов, С.М. Методология обеспечения динамической устойчивости валопроводов высокоскоростных газотурбинных агрегатов на основе адаптационной сборки роторов: дис. ... докт. техн. наук: 05.02.08 / С.М. Белобородов. — Рыбинск, 2011. — 312 с.
244. Ковалев, А.Ю. Технологическое обеспечение уравновешенности высокоскоростных роторов с магнитными подшипниками на основе компенсационного метода сборки: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / А.Ю. Ковалев. — Пермь, 2013. —144 с.
245. Иванов, А.В. Модальный анализ динамических систем роторов / А.В. Иванов, М.К. Леонтьев // “Известия высших учебных заведений. Авиационная техника”. — 2005. — №3. С.31-35
246. Леонтьев, М.К. Моделирование роторных динамических систем с пространственным расположением валов / М.К. Леонтьев, А.В. Иванов, С.А. Дегтярев // ООО “Альфа-Транзит”. — 2010. — 25 с. URL: http://www.alfatran.com/pubs/Modeling_of_rotor_dynamic_sysems_with_spatial_shafts_location_rus.pdf.
247. Leontiev, M.K. Gas turbine dynamic response analysis through simulation / M.K. Leontiev, E.V. Borzdyko and S.L. Zvonarev // Proceedings of the international conference on rotating machine dynamics ROTORDYNAMICS'92., Italy. 28-30 April. — 1992, pp. 1-10
248. Романов, В.В. Снижение виброактивности двигателя ГТД-110 и повышение стабильности его вибрационных характеристик в составе ГТЭ-110 / В.В. Романов, А.Н. Климов, М.К. Леонтьев, С.А. Дегтярев, А.В. Давыдов // Газотурбинные технологии 2015 (электронная версия). — 2015.— №7. — 6 с.

249. Трошин, А.В. Алгоритмы обработки сигналов при координатных измерениях / А.А. Трошин, О.В. Захаров // Материалы Всероссийской молодежной научно-практической конференции. Под редакцией А.Г. Якунина. Барнаул. – 2021. с. 84-88

250. Решетникова, Е.П. Комплекс математических моделей для контроля технически сложных поверхностей на мобильных координатно-измерительных машинах / Е.П. Решетникова, П.Ю. Бочкарев, О.В. Захаров // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2015. №3. – Том 17. – с. 48-60

251. Решетникова, Е.П. Принципы координатного измерения элементарных поверхностей / Е.П. Решетникова, П.Ю. Бочкарев, О.В. Захаров // Актуальные вопросы науки и техники. Студенческая международная научно-практическая конференция. под ред. А.А. Платонова, О.А. Калачевой, С.А. Прицеповой. – 2014. – с. 160-163

252. Гречников, Ф.В. Минимизация объема измерений плоских поверхностей деталей при сборке / Ф.В. Гречников, А.С. Яковишин, О.В. Захаров // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2018. – №2. – с. 56-58

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акты внедрения результатов диссертационной работы



ПАО «ОДК-Кузнецов»
 Заводское шоссе 29, г. Самара, 443009
 Тел: 8 (846) 992-60-10, 955-16-12
 факс: 8 (846) 992-64-65
 e-mail: motor@kuznetsov-motors.ru

№ _____ от _____



Утверждаю

Технический директор
 ПАО «ОДК-Кузнецов»

В.С. Стогов

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Болотова М.А.

Результаты диссертационной работы Болотова М.А. по теме «Разработка методов создания цифровых технологических моделей деталей и узлов ГТД для повышения технических показателей их производства» использовались при разработке:

- программного приложения для балансировки ротора методом двух сборок, использующего результаты измерения его дисбалансов при двух запусках на балансировочном оборудовании;
- улучшенной модели расчёта дисбаланса ротора с поперечным разъемом по результатам измерения дисбалансов двух сборок, позволяющей определять оптимизированный вариант сборки ротора.

Программное приложение и разработанная модель были реализованы в виде аппаратно-программного комплекса и внедрены на производстве, что подтверждается актом №УГТ 070-2023. Разработка аппаратно-программного комплекса выполнялась в рамках Программы развития передовой инженерной аэрокосмической школы Самарского университета (по Соглашению от «01» мая 2023 г. ПИАШ/29-П-2023 (37/23Б)).

Внедрённое в производственный процесс программное приложение позволяет находить оптимальное положение ротора ТВД относительно ротора КВД при любом начальном дисбалансе, в отличие от имеющегося на предприятии программного приложения, которое позволяет находить оптимальное положение только в случае исходного дисбаланса, превышающего величину в 1000 г*см. Использование теоретических положений диссертации при балансировке ряда ротора ВД позволяет снизить их дисбаланс в среднем на 54,2% (для случаев когда дисбаланс ротора меньше 1000г*см) за счёт определения взаимного угла поворота половин ротора для тех случаев, при которых он ранее не определялся существующим программным приложением. Выборка из статистики приведена ниже в таблице.

Изделие	Дисбаланс УС в плоскости С		Снижение дисбаланса ротора в плоскости С, %
	Без разворота половин ротора	После разворота половин ротора на оптимальный угол	
№1	748	437	41,6
№2	560	279	50,2
№3	501	268	46,5
№4	606	109	82
№5	353,2	174,6	50,5
Среднее снижение дисбаланса ротора в плоскости С, %			54,2

Главный технолог

Главный метролог

Р.П. Резаев

Д.М. Богданович



**Акционерное общество
«Металлист-Самара»
(АО «Металлист-Самара»)**

ул. Промышленности, д. 278
г.о. Самара, 443023
Тел. (846) 246-90-05 факс (846) 246-96-00
e-mail: metallist@metallist-s.ru
сайт: www.metallist-s.ru
ОГРН 1026301520035 ИНН 6318105574
КПП 631801001

№ _____



«УТВЕРЖДАЮ»

Исполнительный директор

М.К. Глебовицкий

26.02.2024

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Болотова М.А.

Результаты диссертационной работы Болотова М.А. на тему «Разработка методов создания цифровых технологических моделей деталей и узлов ГТД для повышения технических показателей их производства» внедрялись при выполнении ремонта изделий для решения следующих задач:

- снижение неуравновешенностей ротора НД в ходе его балансировки с использованием действительных моделей узлов;
- формирование действительных моделей камеры сгорания газотурбинной энергетической установки по результатам измерений;
- измерение геометрии и корректировка технологического процесса изготовления сопловых секций турбины селективным лазерным сплавлением металлопорошковых композиций;
- контроль геометрии и разработка рекомендаций по доработке опоры турбины двигателя Д-18Т.

Использование действительных моделей позволило повысить геометрическую точность ремонтируемых изделий на 20%.

Практическая целесообразность применения основных положений диссертации Болотова М.А. определялась при выполнении прикладных научных исследований и экспериментальных разработок (ПНИЭР) по теме «Разработка комплекса технологий ремонта и восстановления функциональных характеристик ответственных деталей газотурбинных двигателей и энергетических установок». ПНИЭР выполнялась в рамках ФЦП «Исследования и разработки приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы» с 2015 по 2017 г. Идентификатор

ПНИЭР RFMEFI57815X0131. Наиболее существенными использованными научными результатами диссертационной работы являются:

1. Состав и основные принципы создания действительных моделей деталей и узлов для совершенствования технологий производства ГТД по повышению управляемости выполнения сборочных операций, их точности и производительности

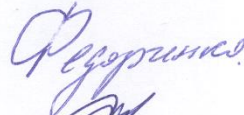
2. Обобщённая методика создания действительных моделей деталей и узлов ГТД с учётом специфики сборочных параметров.

3. Метод определения действительных геометрических параметров деталей и сборочных параметров узлов с помощью виртуальных мер (ВМ) и комплектных виртуальных сборок (КВС), которые учитывают сопряжения поверхностей объектов, то есть их макрогеометрию.

4. Алгоритм и модель определения рациональных условий сборки роторов ГТД с целью повышения точности и снижения трудоёмкости сборки.

Полученные в ходе исследования результаты создают условия для повышения точности и снижения стоимости производства и ремонта изделий.

Главный конструктор, к.т.н.



Д.Г. Федорченко

Главный технолог



Э.В. Буренок

УТВЕРЖДАЮ

Начальник инженерно-технического центра-филиала
ООО «Газпром трансгаз Самара»



И.С. Виноградов

«12» 02 2024

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы М.А. Болотова

Результаты диссертационной работы Болотова Михаила Александровича на тему «Разработка методов создания цифровых технологических моделей деталей и узлов ГТД для повышения технических показателей их производства» внедрялись при выполнении работ по созданию 3D моделей и улучшению технологии сборки и ремонта узлов ГТД на основе использования результатов измерений: 1) ротора; 2) камеры сгорания. Использование полученных результатов позволило повысить геометрическую точность ремонтируемых изделий на 20%.

Наиболее существенными использованными научными результатами диссертационной работы являются:

1. Состав и основные принципы создания действительных моделей деталей и узлов для совершенствования технологий производства ГТД по повышению управляемости выполнения сборочных операций, их точности и производительности.

2. Обобщённая методика создания действительных моделей деталей и узлов ГТД с учётом специфики сборочных параметров.

3. Метод определения действительных геометрических параметров деталей и сборочных параметров узлов с помощью виртуальных мер (ВМ) и комплектных виртуальныхборок (КВС), которые учитывают сопряжения поверхностей объектов, то есть их макрогеометрию.

3. Метод оценки параметров сопряжений деталей и узлов для расчётов размерных связей, позволяющий определять их деформации при сборке с учётом условий выполнения технологических операций.

4. Метод повышения точности сборки узлов за счёт автоматизации операции пригонки деталей с использованием их действительных моделей.

5. Метод снижения уровня неуравновешенностей роторов ГТД с помощью балансировки на цифровой модели, позволяющий определять оптимального положения узлов в окружном направлении для обеспечения противонаправленности возмущающих воздействий от неуравновешенностей деталей и сборочных единиц.

6. Алгоритм и модель определения рациональных условий сборки роторов ГТД с целью повышения точности и снижения трудоёмкости сборки.

Полученные результаты могут найти своё применение на этапе эксплуатации изделий с целью формирования цифровых паспортов изделий, позволяющих прогнозировать отказоустойчивость изделий и формировать мероприятия по их планово-предупредительному ремонту.

Главный инженер ИТЦ – филиала
ООО «Газпром трансгаз Самара»

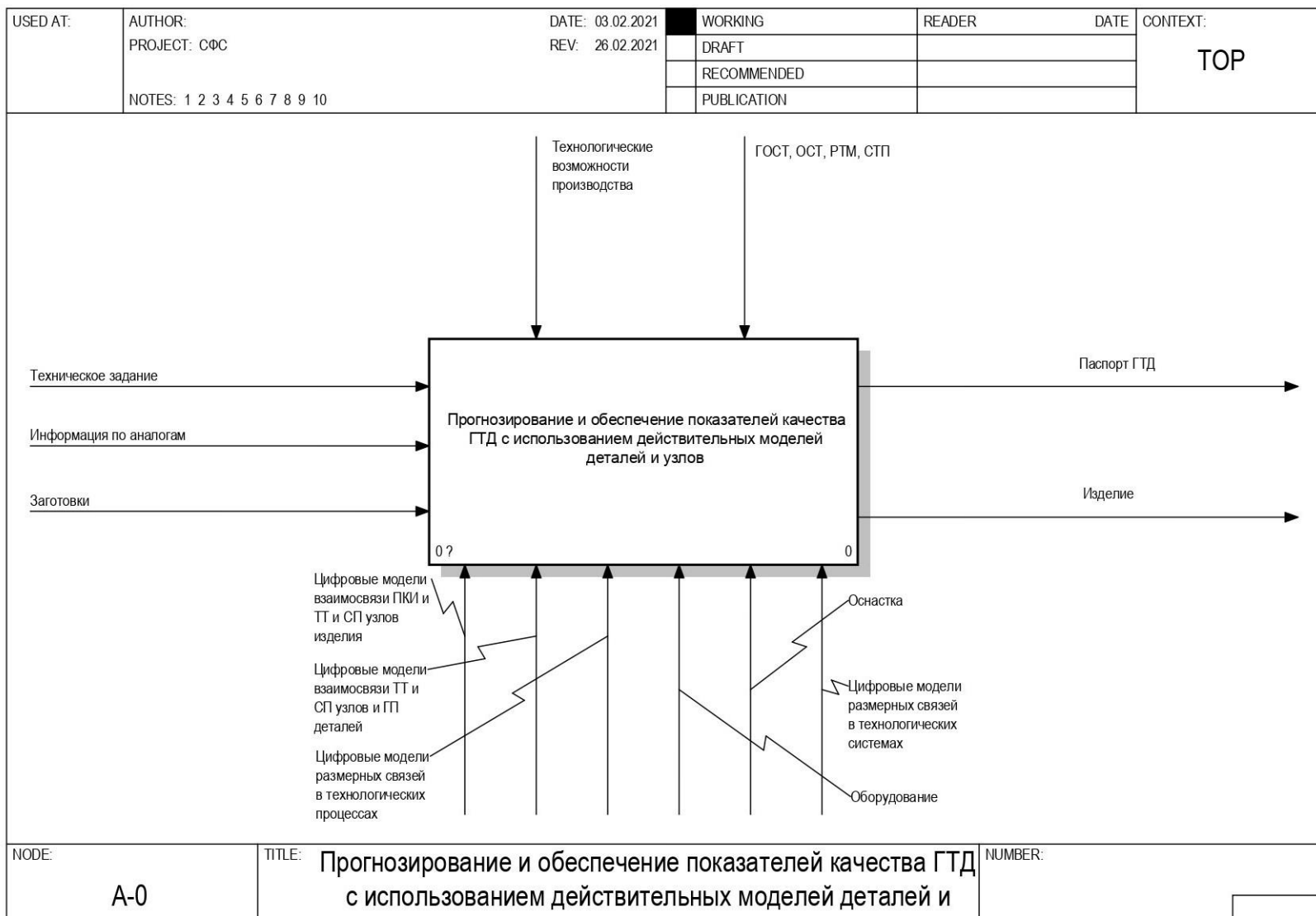
С.А. Холодков

Начальник лаборатории параметрической
диагностики ИТЦ, к.э.н.

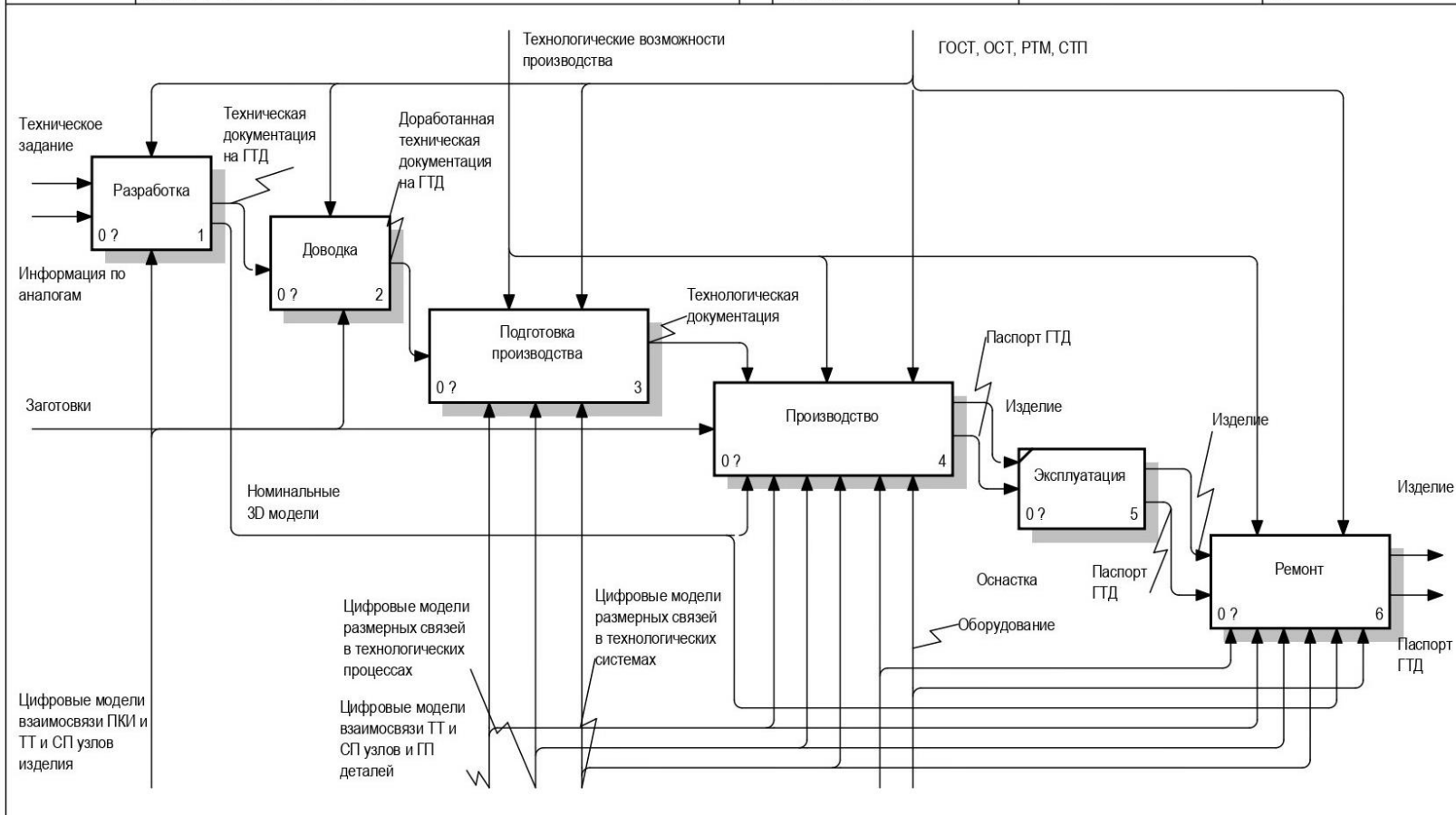
М.Ю. Воробьев

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Диаграмма IDEF0 «Прогнозирование и обеспечение показателей качества ГТД
с использованием действительных моделей деталей и узлов»



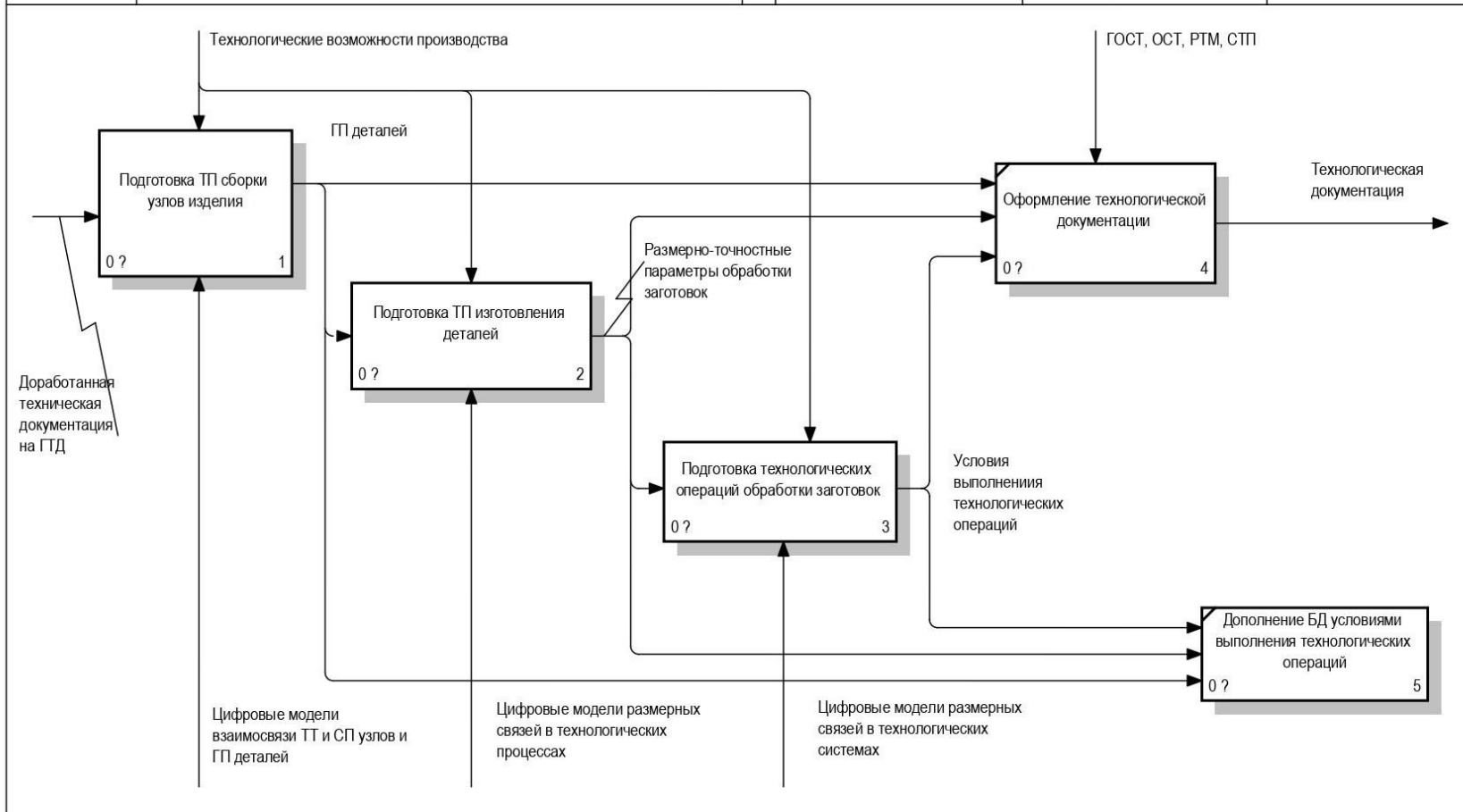
USED AT:	AUTHOR:	DATE: 03.02.2021	WORKING	READER	DATE	CONTEXT:
	PROJECT: СФС	REV: 26.02.2021	DRAFT			
			RECOMMENDED			
			PUBLICATION			
	NOTES: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10					A-0



NODE:	TITLE: Прогнозирование и обеспечение показателей качества ГТД с использованием действительных моделей деталей и узлов	NUMBER:
A0		

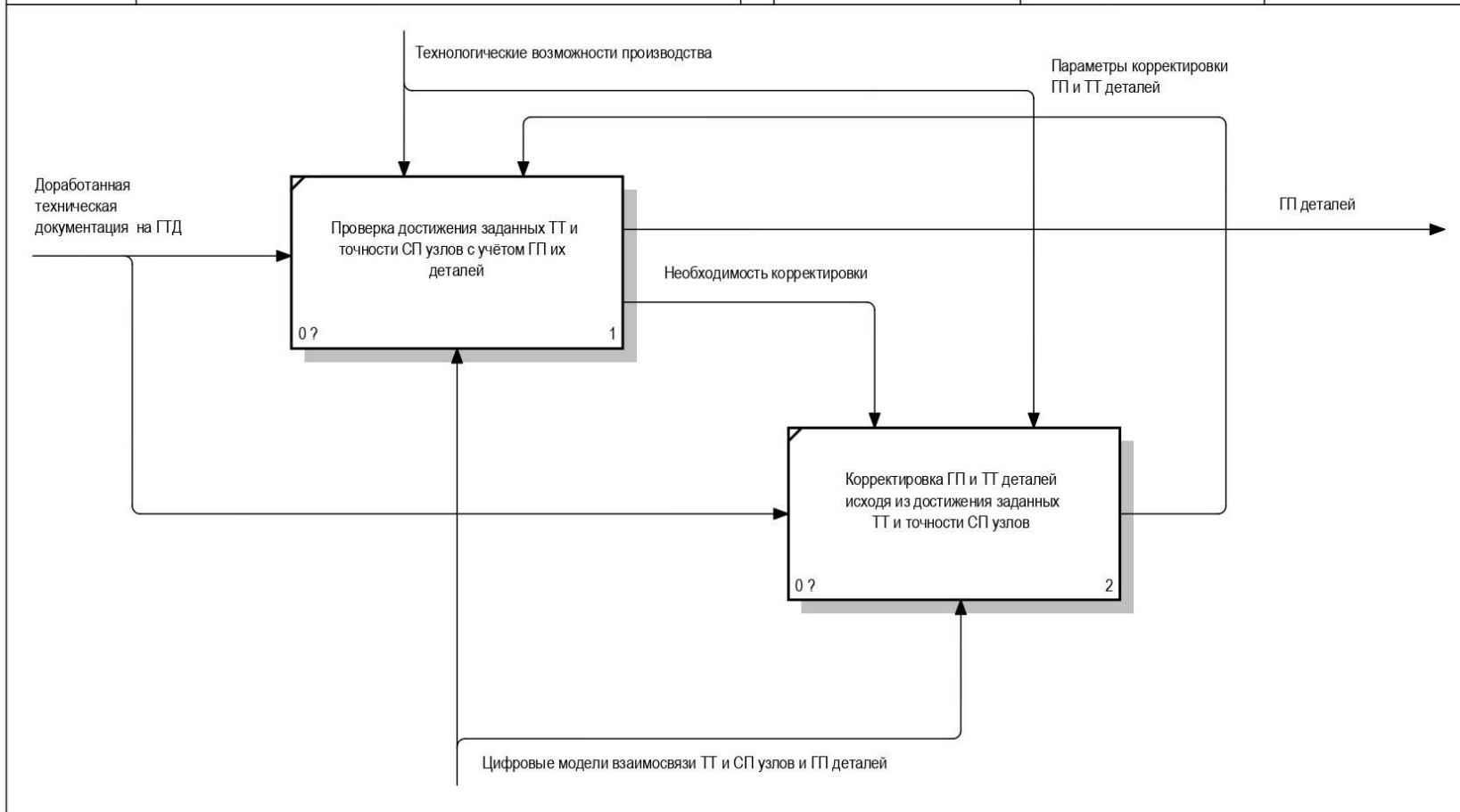
узлов

USED AT:	AUTHOR:	DATE: 03.02.2021	WORKING	READER	DATE	CONTEXT: A0
	PROJECT: СФС	REV: 04.02.2021	DRAFT			
	NOTES: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10		RECOMMENDED			
			PUBLICATION			



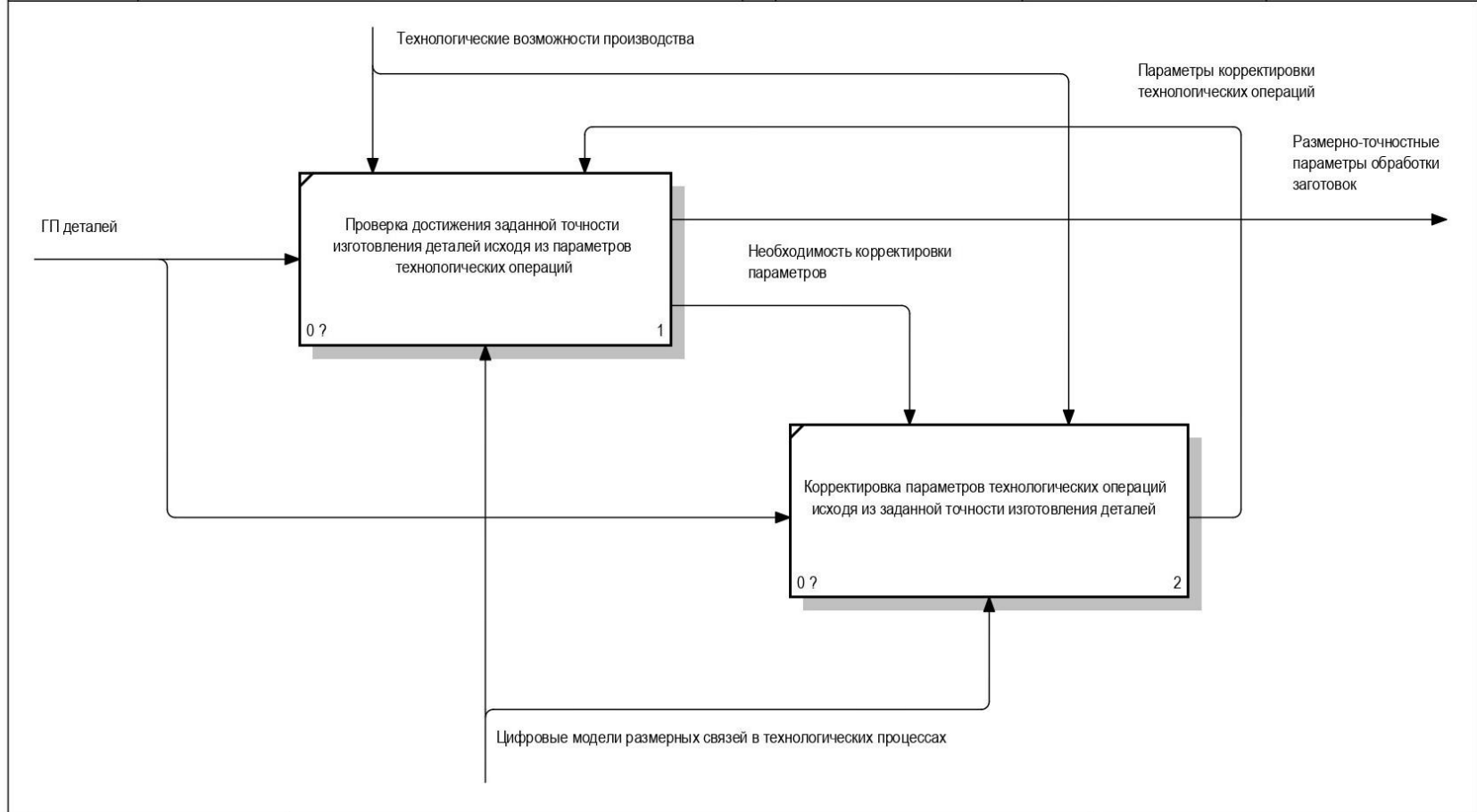
NODE: A3	TITLE: Подготовка производства	NUMBER:
--------------------	--	---------

USED AT:	AUTHOR:	DATE: 03.02.2021	WORKING	READER	DATE	CONTEXT: A3
	PROJECT: СФС	REV: 04.02.2021	DRAFT			
			RECOMMENDED			
			PUBLICATION			
NOTES: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10						



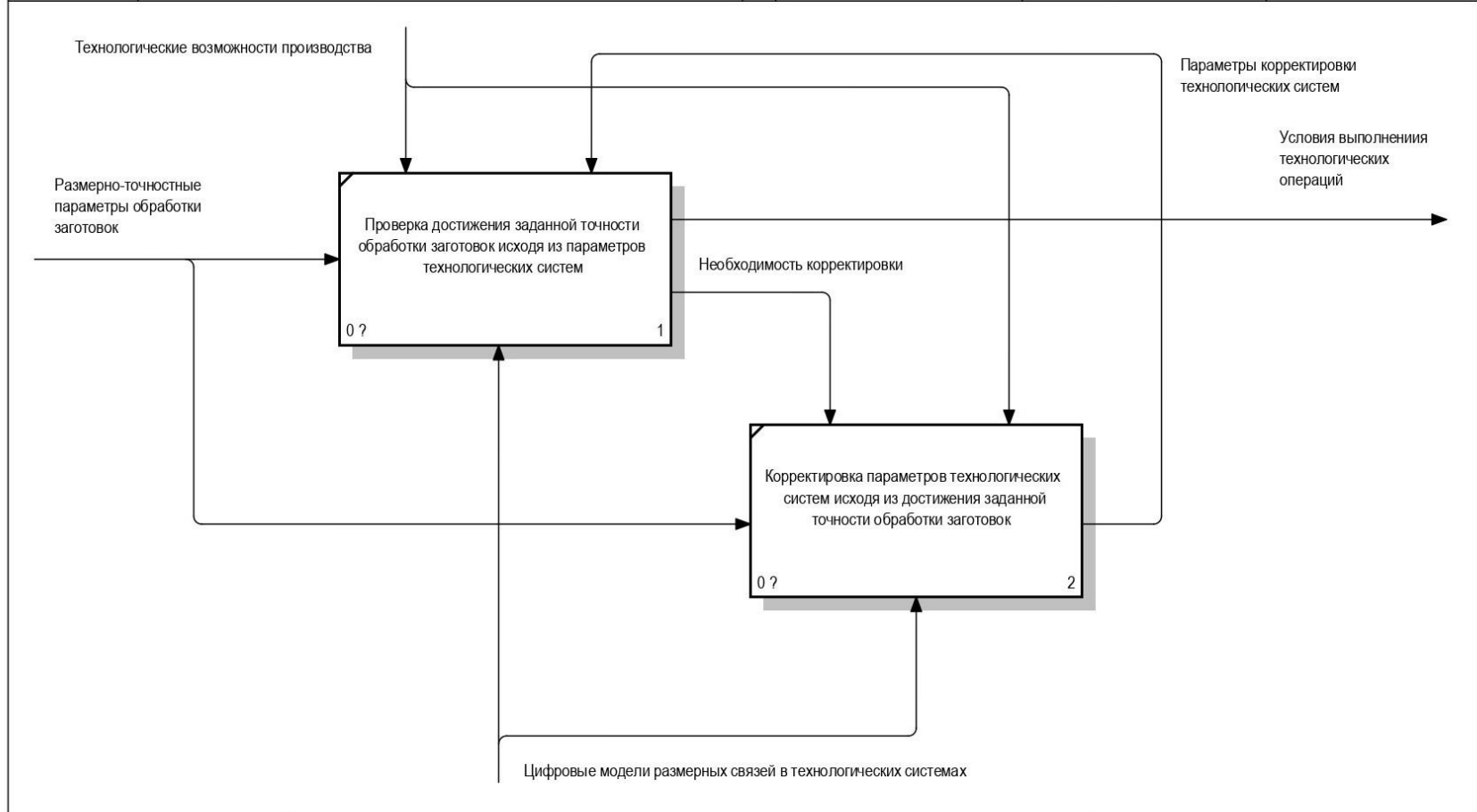
NODE: A31	TITLE: Подготовка ТП сборки узлов изделия	NUMBER:
---------------------	---	---------

USED AT:	AUTHOR:	DATE: 03.02.2021	WORKING	READER	DATE	CONTEXT: A3
	PROJECT: СФС	REV: 04.02.2021	DRAFT			
			RECOMMENDED			
			PUBLICATION			
NOTES: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10						

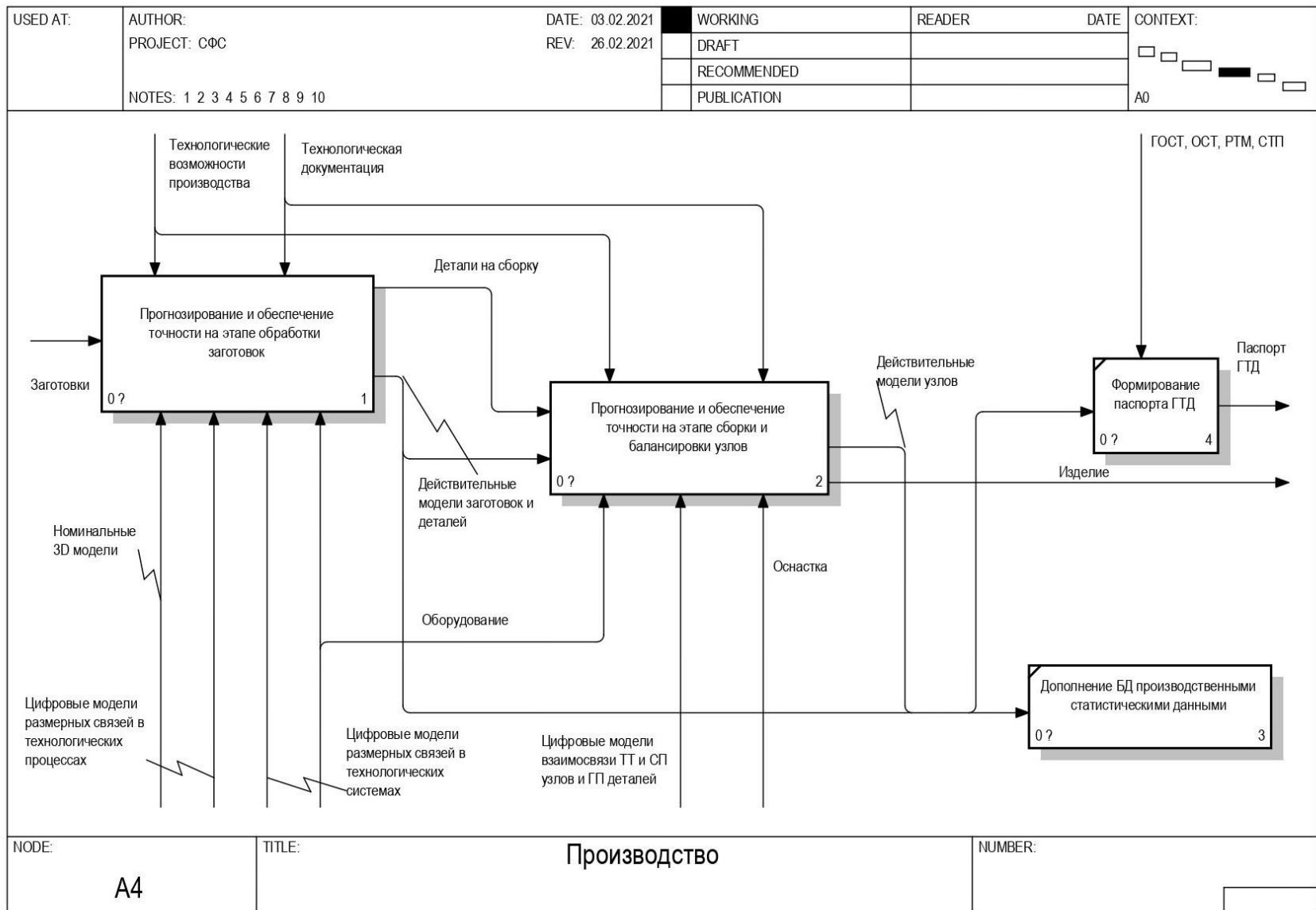


NODE: A32	TITLE: Подготовка ТП изготовления деталей	NUMBER:
---------------------	---	---------

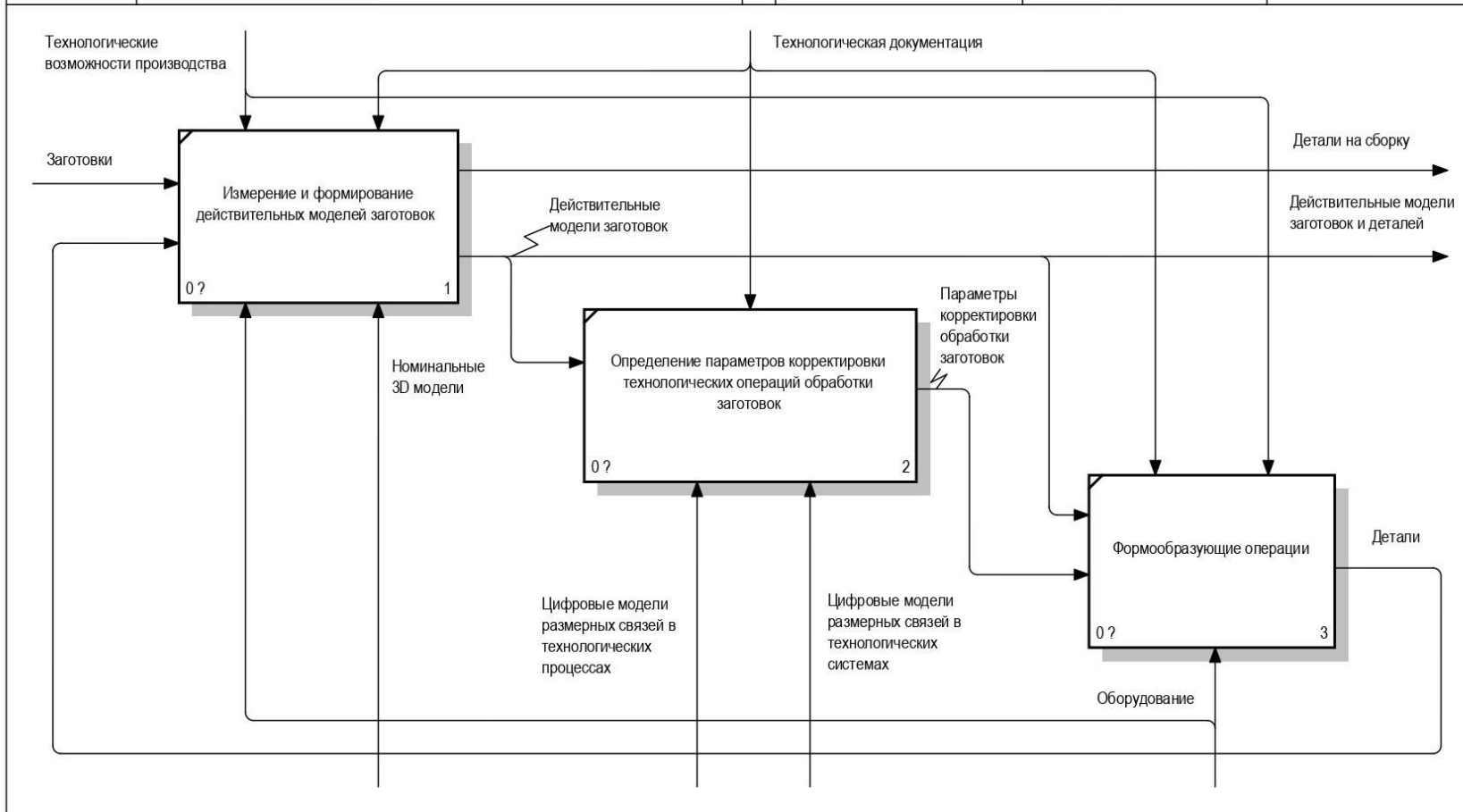
USED AT:	AUTHOR:	DATE: 03.02.2021	WORKING	READER	DATE	CONTEXT: A3
	PROJECT: СФС	REV: 04.02.2021	DRAFT			
			RECOMMENDED			
			PUBLICATION			
NOTES: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10						



NODE: A33	TITLE: Подготовка технологических операций обработки заготовок	NUMBER:
---------------------	--	---------

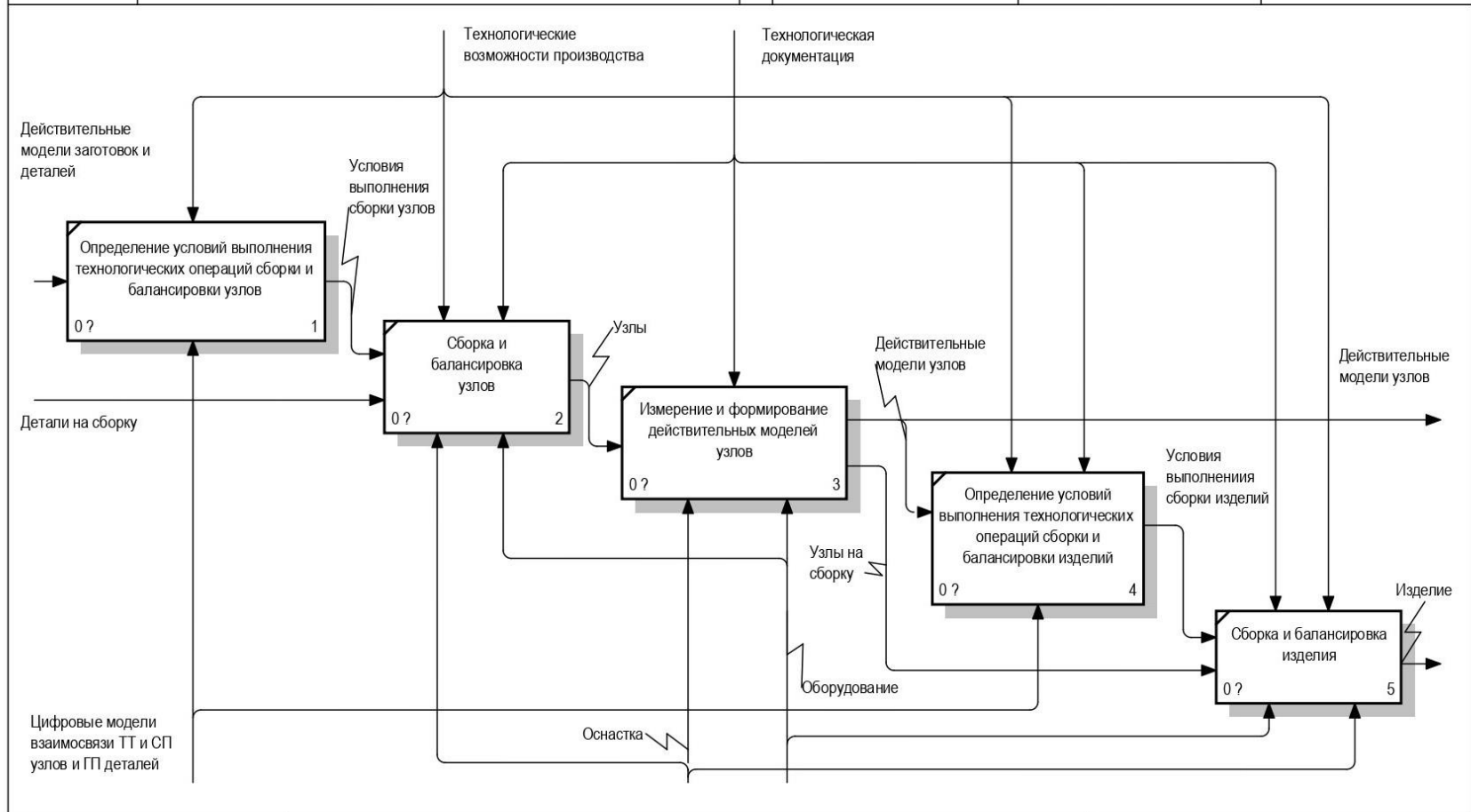


USED AT:	AUTHOR:	DATE: 03.02.2021	WORKING	READER	DATE	CONTEXT:
	PROJECT: СФС	REV: 26.02.2021	DRAFT			<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	NOTES: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10		RECOMMENDED			A4 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
			PUBLICATION			



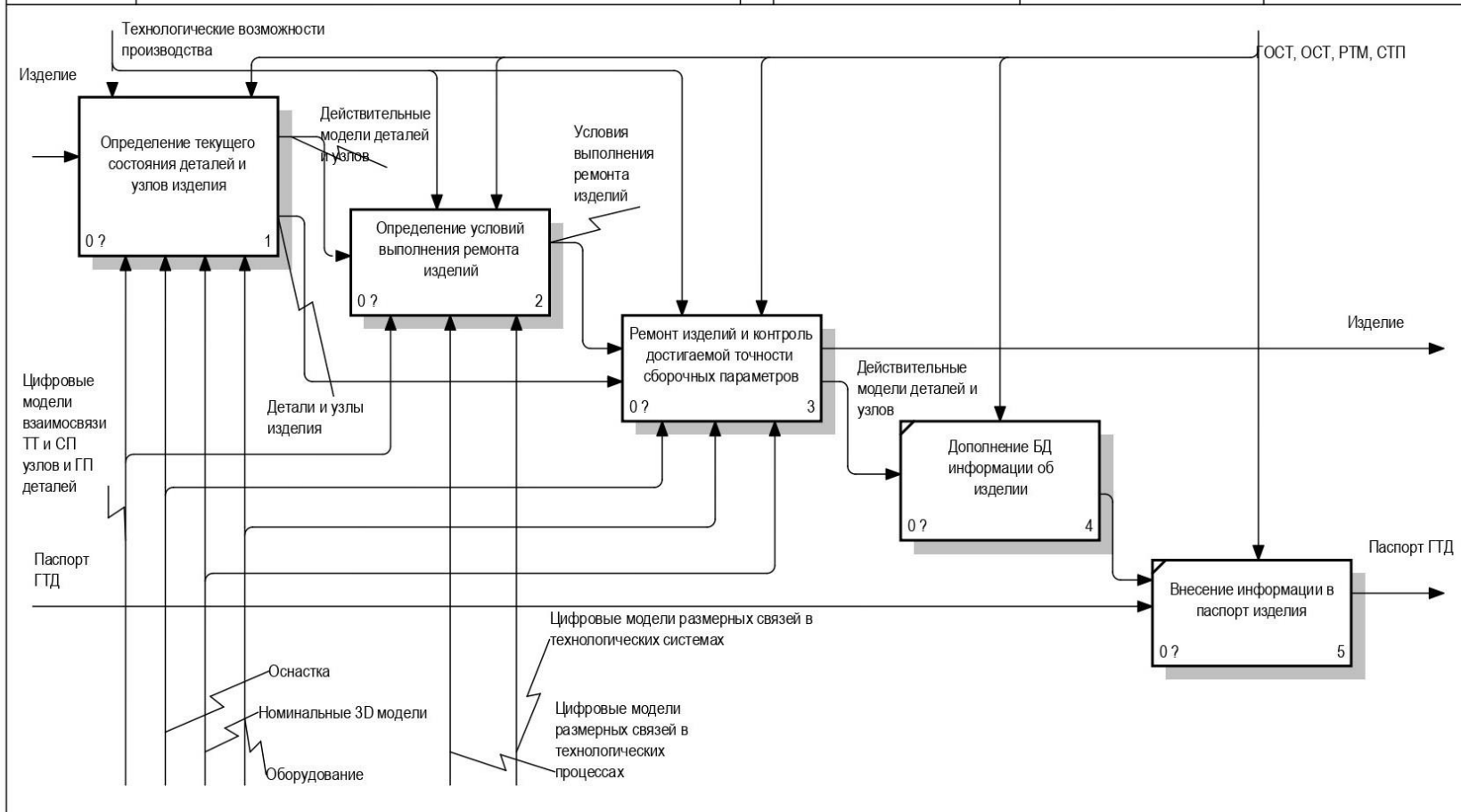
NODE: A41	TITLE: Прогнозирование и обеспечение точности на этапе обработки заготовок	NUMBER:
---------------------	--	---------

USED AT:	AUTHOR:	DATE: 03.02.2021	WORKING	READER	DATE	CONTEXT:
	PROJECT: СФС	REV: 26.02.2021	DRAFT			<input type="checkbox"/>
			RECOMMENDED			<input checked="" type="checkbox"/>
			PUBLICATION			<input type="checkbox"/>
NOTES: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10					A4	<input type="checkbox"/>



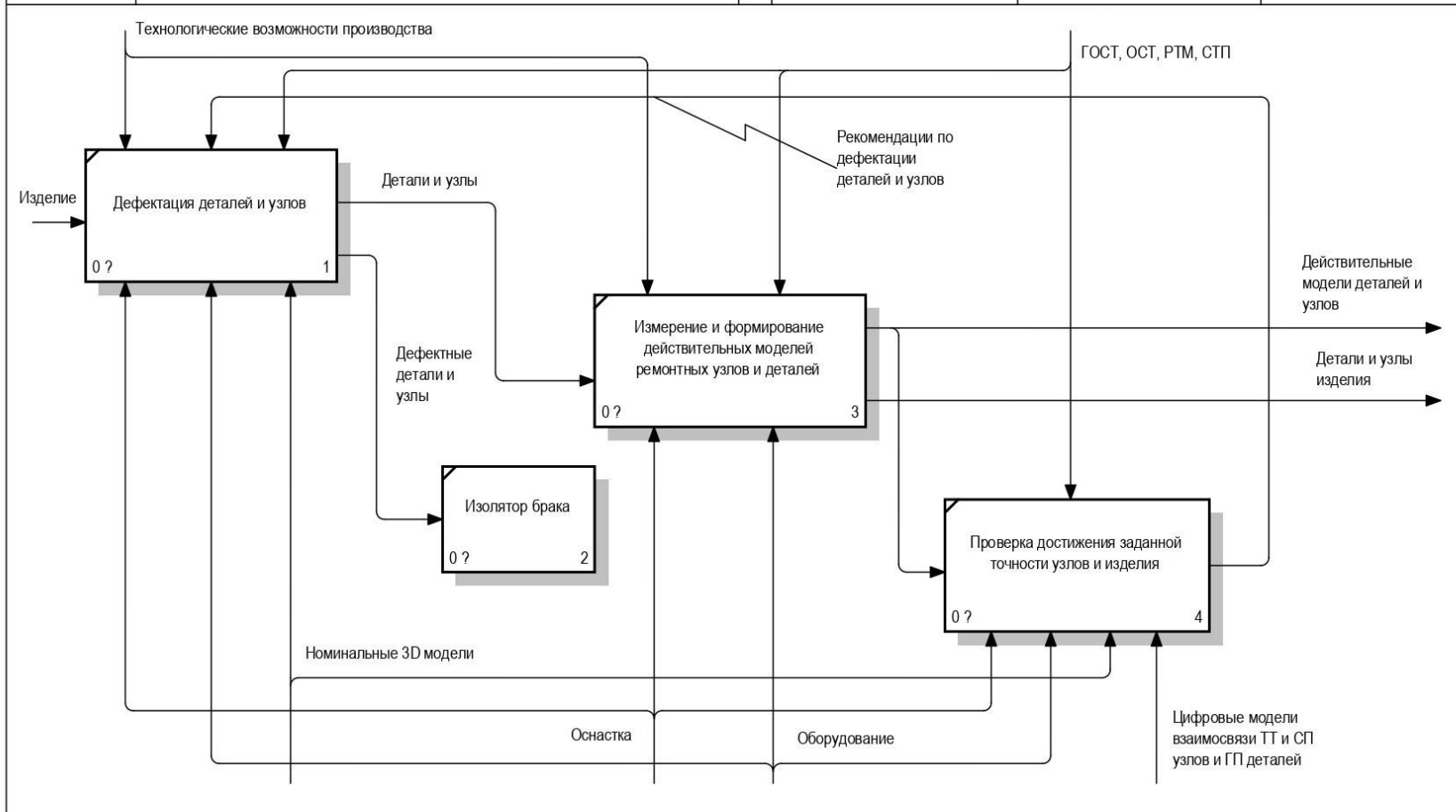
NODE: A42	TITLE: Прогнозирование и обеспечение точности на этапе сборки и балансировки узлов	NUMBER:
---------------------	--	---------

USED AT:	AUTHOR:	DATE: 04.02.2021	WORKING	READER	DATE	CONTEXT: A0
	PROJECT: СФС	REV: 26.02.2021	DRAFT			
			RECOMMENDED			
			PUBLICATION			
NOTES: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10						

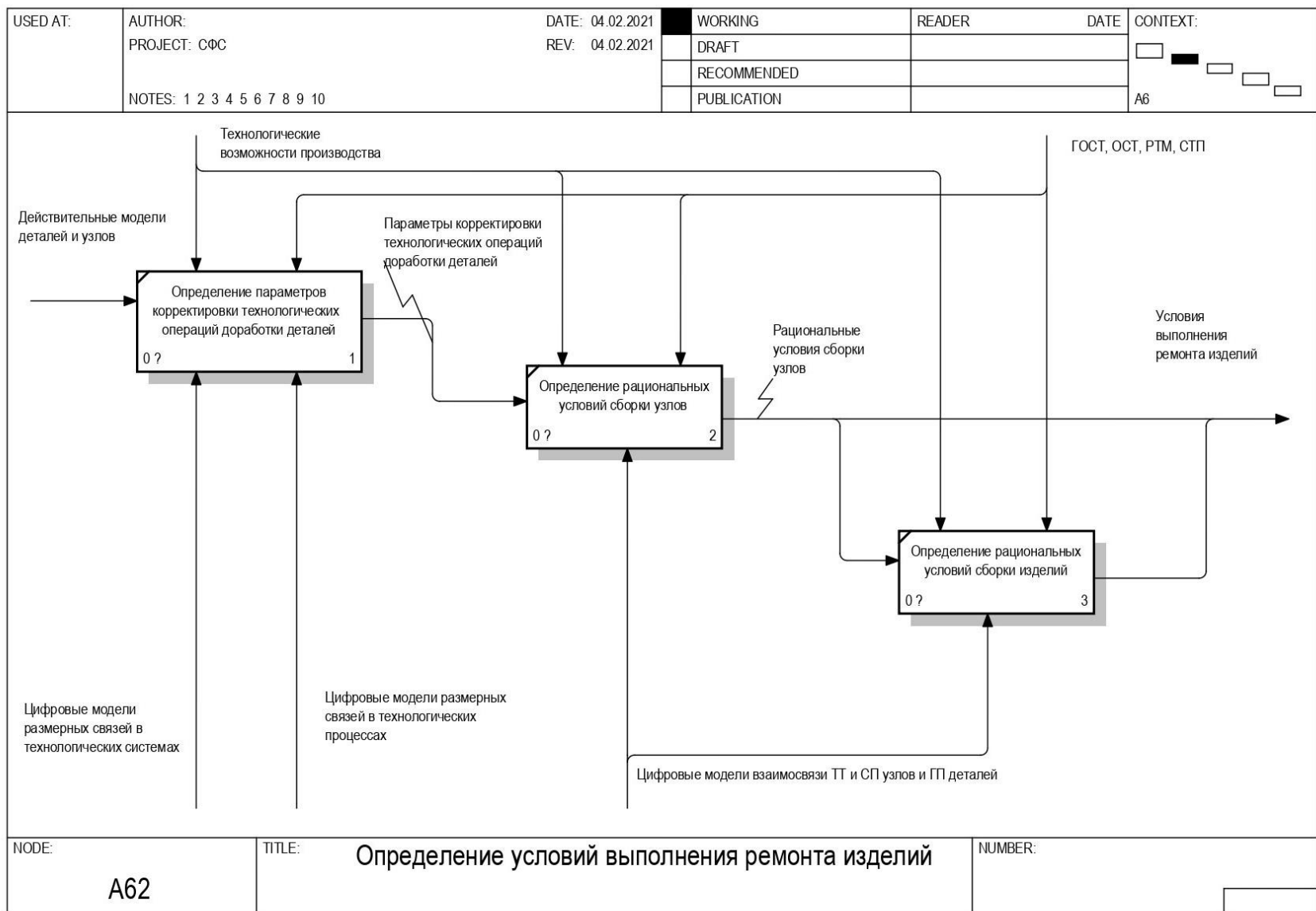


NODE: A6	TITLE: Ремонт	NUMBER:
--------------------	-------------------------	---------

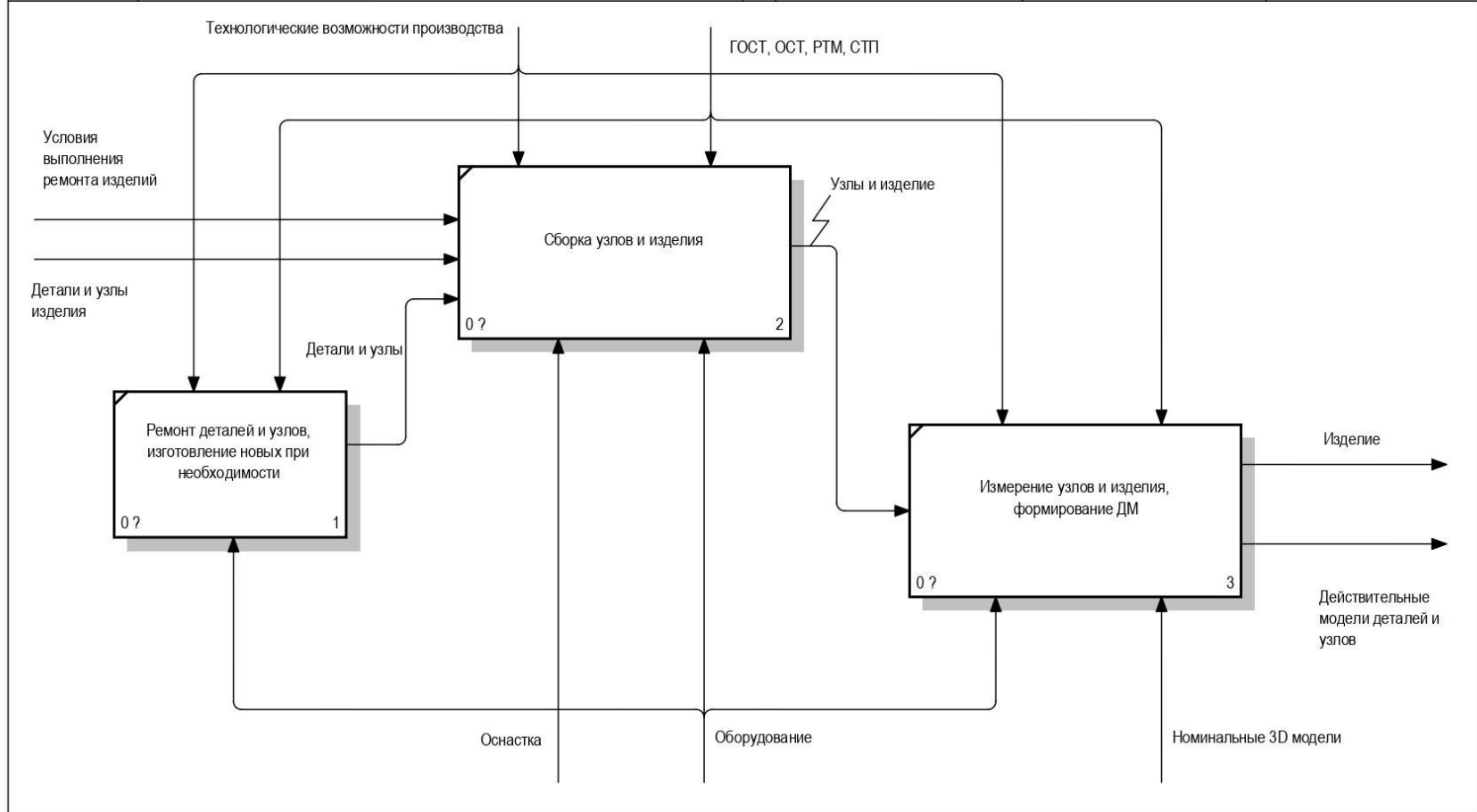
USED AT:	AUTHOR:	DATE: 04.02.2021	WORKING	READER	DATE	CONTEXT: A6
	PROJECT: СФС	REV: 26.02.2021	DRAFT			
	NOTES: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10		RECOMMENDED			
			PUBLICATION			



NODE: A61	TITLE: Определение текущего состояния деталей и узлов изделия	NUMBER:
---------------------	---	---------



USED AT:	AUTHOR:	DATE: 04.02.2021	WORKING	READER	DATE	CONTEXT: A6
	PROJECT: СФС	REV: 26.02.2021	DRAFT			
	NOTES: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10		RECOMMENDED			
			PUBLICATION			



NODE: A63	TITLE: Ремонт изделий и контроль достигаемой точности сборочных параметров	NUMBER:
---------------------	--	---------

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Моделирование и исследование параметров затяжки болтовых соединений

Моделирование и исследование параметров затяжки болтовых соединений

Сборочные единицы и узлы ГТД в своей конструкции включают достаточно большое количество болтовых соединений (БС). Последовательность и величина усилий затяжки болтовых соединений оказывает существенное влияние на точность сборочных единиц и узлов ГТД. Создание достоверных моделей болтовых соединений является необходимым для оценки сборочных параметров узлов. В текущем приложении будут рассмотрены способы создания конечно-элементных моделей болтовых соединений. Будет выбран наиболее подходящий способ, обеспечивающий необходимую достоверность, производительность расчётов и время создания модели болтового соединения.

Разработка конечно-элементной модели болтового соединения в зависимости от момента затяжки

В ходе моделирования болтовых соединений необходимо располагать информацией о действующих осевых усилиях, которые можно определить по создаваемому моменту затяжки с использованием формул, приведенных в [11]. Конечно-элементная (КЭМ) модель болтового соединения должна повторять физическое воздействие на соединяемые объекты. Выполнено сравнение и выбор способов создания моделей болтовых соединений в САЕ системах. Сравнение способов также выполнялось по параметрам: скорость расчёта, трудоёмкость построения 3D моделей и задания граничных условий моделей. Выбор наилучшего способа моделирования выполнялся на модели болтового, включающего: пластины толщиной 7 и 4 мм, гайку, болт, которые приведены на рисунке В.1.

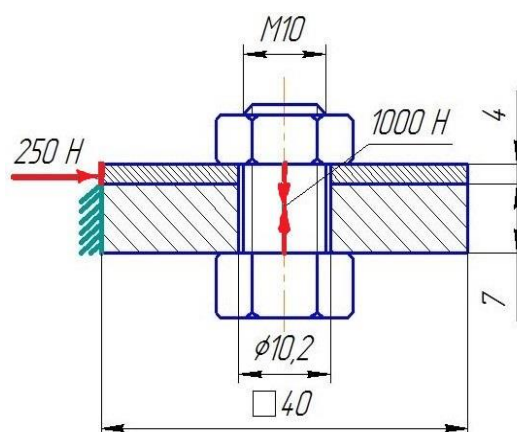


Рисунок В.1 – Расчётная схема модели болтового соединения

Сравнение способов моделирования болтовых соединений выполнялось в системе ANSYS с учётом задаваемых параметров: усилия затяжки, типа сетки, количества этапов нагружения и места закрепления.

Первый способ моделирования болтового соединения заключается в создании детальной конечно-элементной модели, включающей винтовые поверхности, взаимодействующие в процессе затяжки болтовых соединений. Моделирование болтовых соединений по первому способу предполагает учёт возникающих контактов по винтовым поверхностям. Рассмотрение и применение первого метода моделирования БС не является целесообразным, из-за необходимости значительных вычислительных ресурсов.

Во втором способе используются упрощённые твердотельные модели 3D болта и гайки. Тип контакта, задаваемый между торцевой поверхностью гайки (головкой болта) и торцевой поверхностью пластин, а также между пластинами – «Frictional», является контактом с трением. Между болтом и гайкой задаётся контакт «bolt thread contact technique», называемый виртуальной резьбой. Осевое усилие в болтовом соединении задавалось функцией «Bolt Pretension». На рисунке В.2, а приведена схема задания граничных условий, а на В.2, б картина напряжений для второго способа.

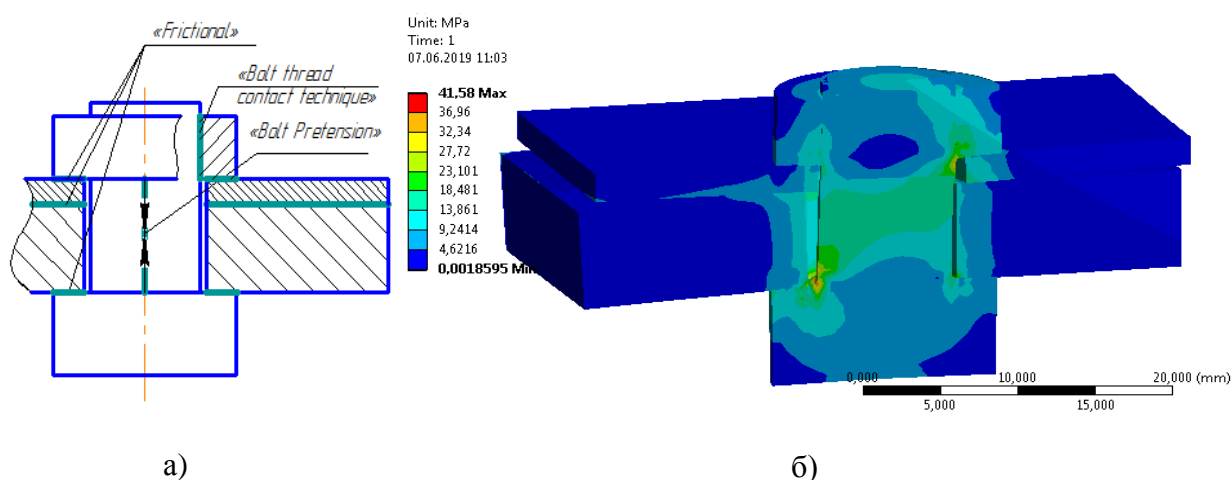


Рисунок В.2 – Схема задания граничных условий (а) и картина напряжений (б) при втором способе моделирования болтового соединения

Третий способ отличается от второго тем, что тела гайки и болта объединены в одно тело, тем самым исключается контакт между ними. Графическое пояснение второго способа показано на рисунке В.3, а. Результаты моделирования приведены на рисунке В.3, б.

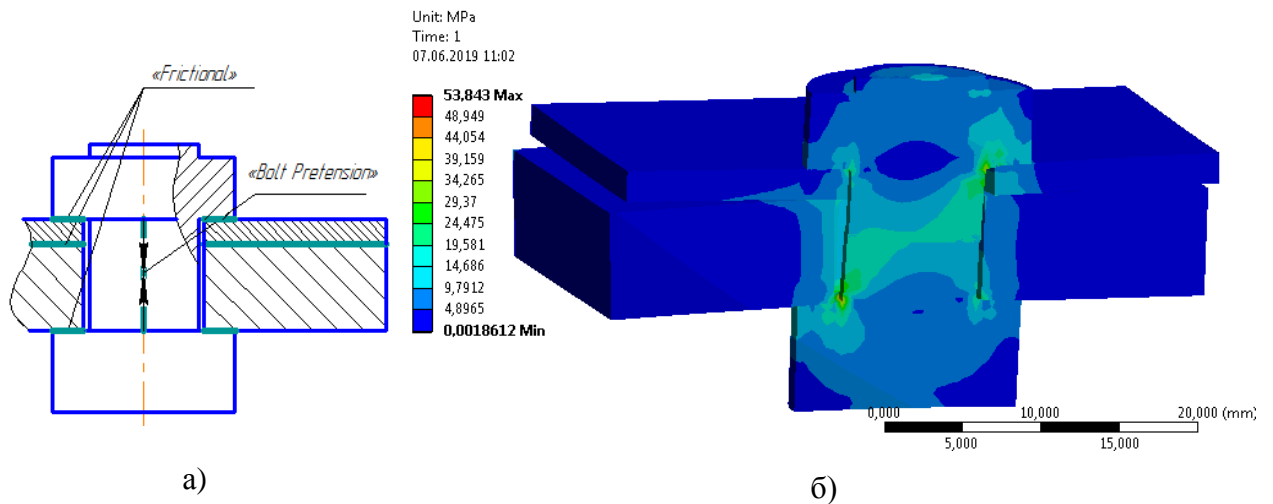


Рисунок В.3 – Схема задания граничных условий (а) и картина напряжений (б) при третьем способе моделирования болтового соединения

В четвертом методе геометрия болтового соединения упрощается до балочного тела. Посредством «APDL» кода задается усилие, а с помощью функции «Body-Body» задается контакт между болтовым соединением и торцами пластин, как показано на рисунке В.4, а. Результат моделирования приведен на рисунке В.4, б.

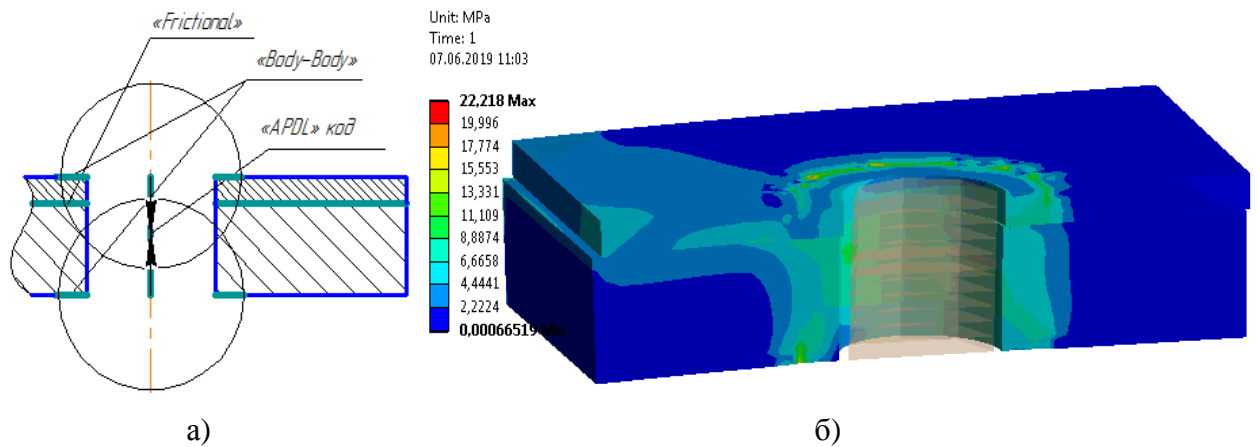


Рисунок В.4 – Схема задания граничных условий (а) и картина напряжений (б) при четвертом способе моделирования болтового соединения

В основе пятого способа задания осевого усилия и контактов БС заложено использование «APDL» кода, как показано на рисунке В.5, а. Рисунок В.5, б содержит картину напряжений, полученных в результате расчета.

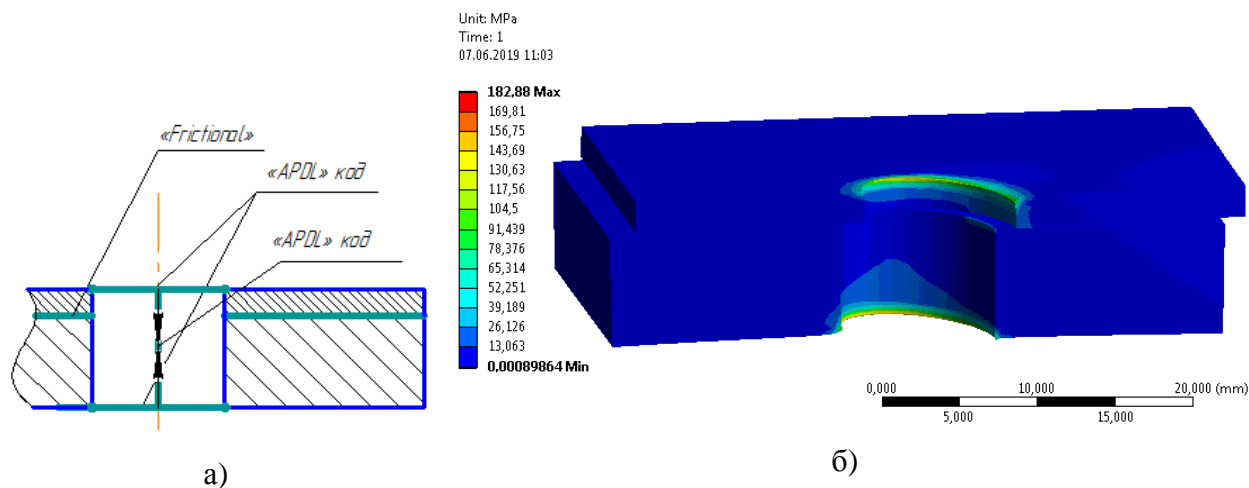


Рисунок В.5 – Схема здания граничных условий (а) и картина напряжений (б) при пятом способе моделирования болтового соединения

Полученная картина распределения напряжений в деталях под воздействием затяжки БС сравнивалась с данными, приведенными в работе [11]. Распределение напряжений повторило так называемый конус давления. Соединяемые детали испытывают при этом в основном деформации сжатия, работая подобно стержням переменного сечения при осевом нагружении. В таблице В.1 приведены значения параметров, по которым производится сравнение рассматриваемых способов создания КЭМ БС.

Таблица В.1 – Параметры сравнения способов построения КЭМ БС в % ко 2 способу

Способ	2	3	4	5
Трудоёмкость	100	80	60	60
Время расчета	100	90	80	70
Достоверность, точность	100	90	70	60
Возможность учёта неравномерности затяжки	+	+	+	–

Приведенные в таблице В.1 параметры определяются путём отношения рассматриваемых значений величин к соответствующим значениям второго способа. Сравнивая картины напряжений, можно отметить, что наиболее близкий характер распределения напряжений к данным, приведенным в [11] наблюдается в случае использования 1, 2 и 3 способов. Таким образом, рациональным является использование второго способа создания КЭМ БС.

Проверка достоверности конечно-элементной модели болтового соединения

Проверка достоверности КЭМ БС включала установление взаимосвязи между параметрами: моментом затяжки, достигаемым осевым усилием и удлинением стержня болта. Исследования выполнялись с использованием специализированного болта, препарированного тензорезисторами КФ5П1-1-100 в следующей последовательности:

- 1) препарирование стержня болта тензорезисторами для измерения осевых усилий;
- 2) изготовление оснастки для тарирования болта;
- 3) создание КЭМ модели БС в ANSYS и выполнение расчётов для определения удлинения стержня болта и возникающих напряжений при разных осевых усилиях;
- 5) определение осевых усилий в стержне болта в зависимости от момента затяжки по аналитическим зависимостям, приведенным в [11];
- 6) тарировка препарированного болта на разрывной машине;
- 7) проведение экспериментов на затяжку БС, обработку полученных результатов.

Рассматривались осевые усилия: 5, 10, 15 и 20 кН. Эскиз и 3D модель болта приведены на рисунках В.6, а и В.6, б.

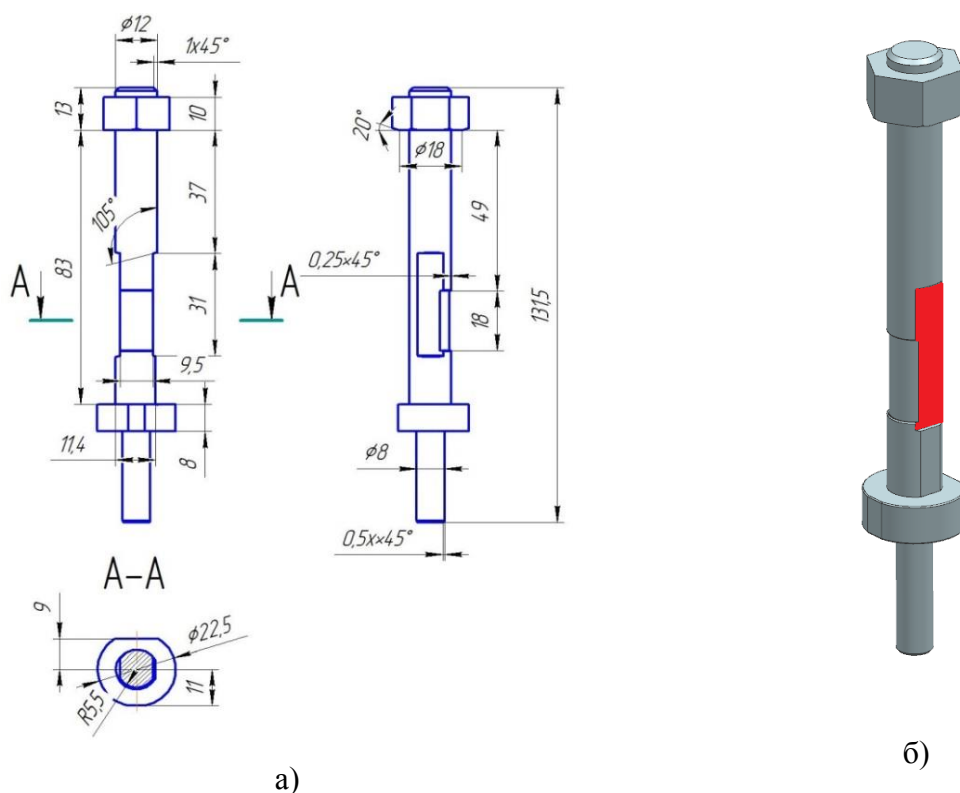


Рисунок В.6 – Эскиз конструкции (а) и 3D модель (б) используемого в ходе исследований препарированного болта

Построены две 3D модели болтового соединения. Первая модель включает болтовое соединение с имитируемыми тензорезисторами и предназначена для определения удлинения стержня болта от момента его затяжки. Вторая модель, необходима для проверки деформаций и напряжений. На рисунках В.7, а и В.7, б показаны КЭМ.

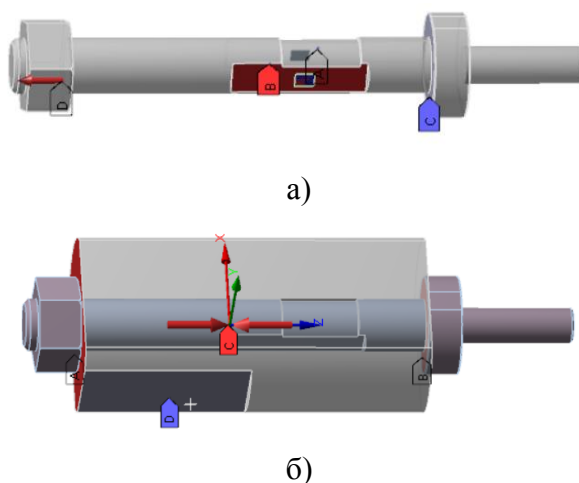


Рисунок В.7 – Первая (а) и вторая (б) конечно-элементные модели болтового соединения

Выполнялась градуировка препарированного тензорезисторами БС для получения зависимости сигнала с тензорезисторов от усилия растяжения. Сигнал с тензорезистора измерялся универсальным прецизионным аналого-цифровым преобразователем LTR-114. Подключение тензорезисторов выполнялось по полумостовой схеме. Нагружение БС осуществлялось на испытательной машине ЕНФ фирмы Shimadzu 59373-14 с использованием специального приспособления, как показано на рисунке В.8.

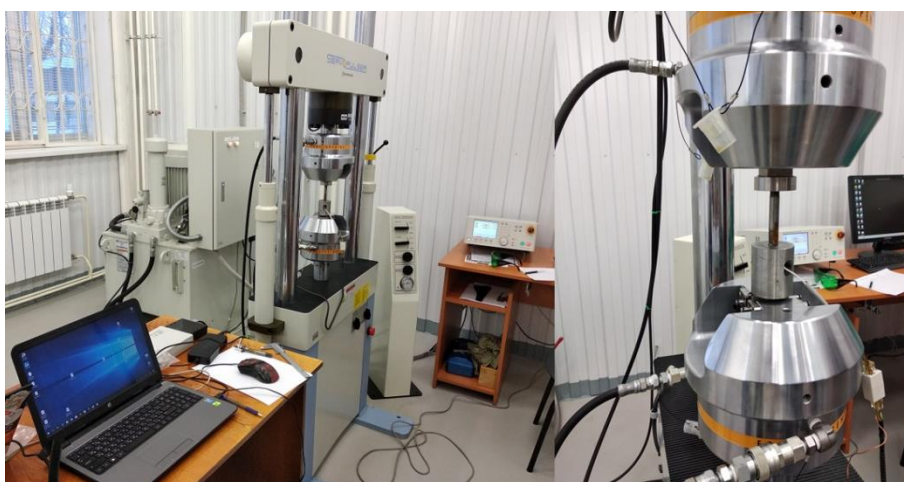
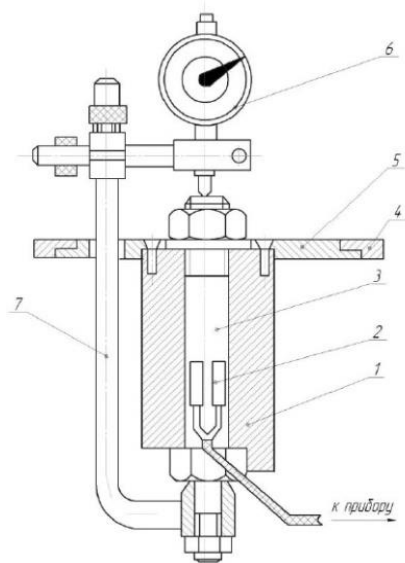


Рисунок В.8 – Установка болта в испытательную машину для выполнения тарировки

Эксперимент по затяжке болтового соединения выполнялся с использованием приспособления, приведенного на рисунке В.9.



а)



б)

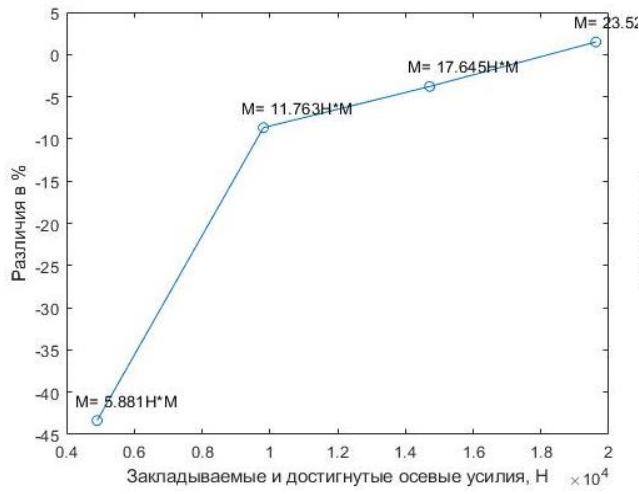
Рисунок В.9 – Эскиз (а) и фотография (б) приспособления для проведения эксперимента

Приспособление, приведенное на рисунке В.9, включает: втулку 1, испытуемый болт 3, тензорезисторы 2, кронштейн 7, индикатор часового типа 6, диск 5 с угловой шкалой 4. Затяжка гайки производилась динамометрическим ключом с моментами 11,6; 23,2; 34,8; 46,4 Н·м. Измерялся разбаланс мостов и величина удлинения БС с помощью индикатора часового типа. Результаты представлены в таблице В.2.

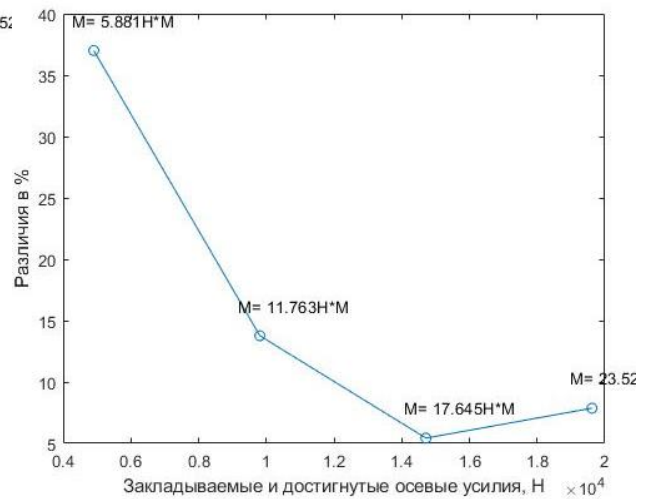
Таблица В.2 – Результаты экспериментальных и теоретических исследований

№	Момент на ключе, Н·м	Закладываемые осевые усилия, кН	Достигнутые осевые усилия (экспер.), кН	Расхождение, %	Удлинение болта (экспер.), мм	Оцененное удлинение болта (ANSYS), мм	Расхождение, %
1	11,6	5	2,832	-43,3	0,02	0,021	5
			6,850	37,0			
2	23,2	10	9,133	-8,6	0,04	0,043	7,5
			11,377	13,7			
3	34,8	15	14,433	-3,7	0,06	0,065	8,3
			15,815	5,4			
4	46,4	20	20,297	1,4	0,08	0,087	8,8
			21,573	7,8			

На рисунке В.10 показаны зависимости расхождений закладываемых и достигнутых осевых усилий в стержне препарированного болта.



а)

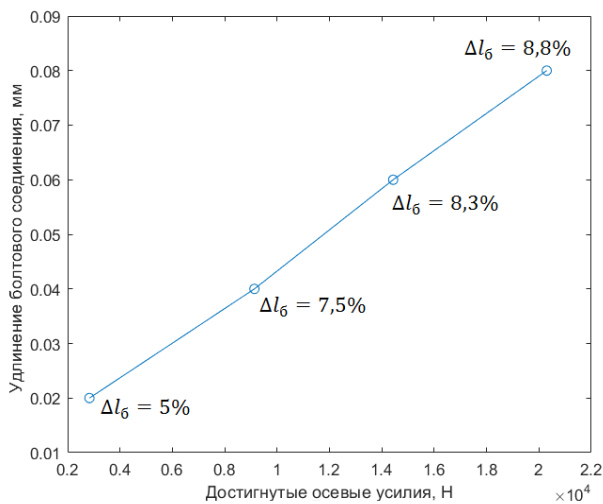


б)

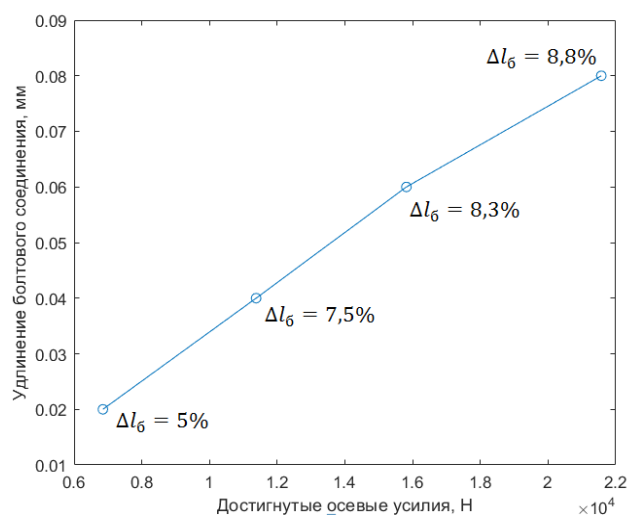
Рисунок В.10 – Расхождения планируемых и достигнутых усилий в %:

а) первый полумост; б) второй полумост

Рисунок В.11 содержит расхождение достигнутых и оцененных результатов удлинения болтового соединения на двух полумостах.



а)



б)

Рисунок В.11 – Расхождение достигнутых и спрогнозированных

результатов удлинений болтового соединения $\Delta l_{\text{б}}$ в %:

а) первый полумост; б) второй полумост

При анализе таблицы В.2 можно отметить, что наибольшие расхождения результатов выявлены при моменте затяжки 11,6 Н·м и составляют 43,3%. Такое

значительное расхождение можно объяснить двумя причинами. Первой причиной является перекос болта, вызванный непараллельностями торцев шляпки, гайки и оснастки. Вторая причина заключается во влиянии несимметричной лыски стержня при основании головки болта, выделенной на рисунке В.7. По мере увеличения задаваемого момента расхождение достигнутого осевого усилия уменьшалось и при моменте 46,4 Н·м составило 7,8%. Результаты исследований показывают удовлетворительную сходимость оценок, получаемых с использованием разработанной модели болтового соединения. Второй, третий и четвёртый способы могут применяться при дальнейшем создании моделей оценки сборочных параметров узлов.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Исследование сопряжений имитаторов деталей ротора

Исследование сопряжений имитаторов деталей ротора

С целью проверки достоверности методики оценки точности размерных связей, приведенной в подразделе 3.1, выполнялись исследования сопряжений имитаторов деталей «диск» и «проставка» турбины низкого давления ГТД. Эскиз собираемого узла приведен на рисунке Г.1.

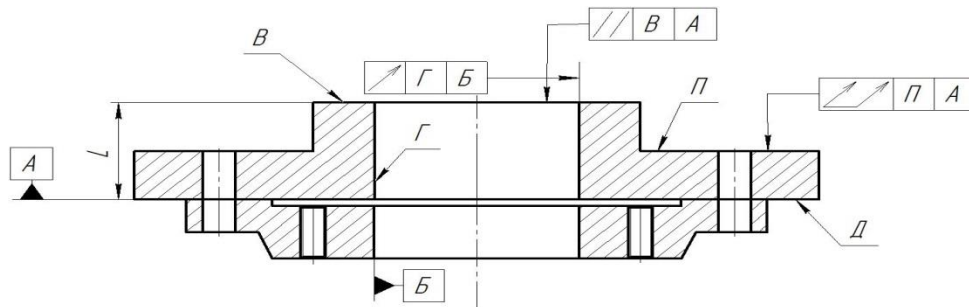
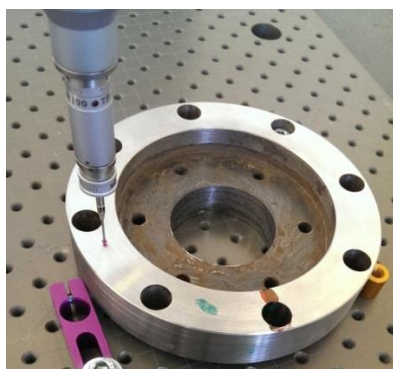


Рисунок Г.1 – Эскиз сборки узла

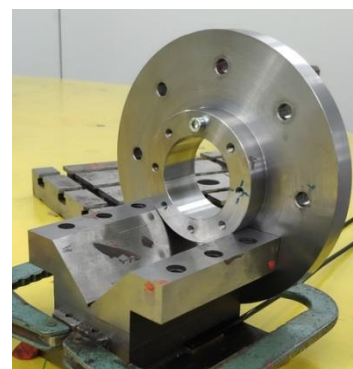
Сборка деталей выполняется по торцевыми поверхностям A и D , контролируются следующие параметры: параллельность $\delta_{\text{пар}}$ торца B относительно торца A , расстояние L между торцами B и A , радиальное биение $\delta_{\text{рад.биение}}$ отверстия Γ относительно B , торцевое биение $\delta_{\text{торц. биение}}$ торца Π относительно A .

Измерение геометрии деталей

Поверхности деталей измерялись на координатно-измерительной машине DEА Global Performance 07.10.07 с использованием триггерного датчика TP200 (рисунок Г.2).



а)



б)

Рисунок Г.2 – Измерение поверхностей деталей «диск» (а) и «проставка» (б)

Поверхности деталей измерялись с использованием следующего количества точек: сопрягаемые A и D – 160–200; торец $П$ – 74; контрольные B , $П$ и $Г$ – 8–20. Измерения поверхностей A , B , $Г$, $Д$ и $П$ (рисунок Г.2) производились по сечениям. В случае цилиндрических поверхностей сечения представляют собой линии пересечения поверхности и плоскостей, перпендикулярных оси вращения. Для торцевых поверхностей сечения представляют собой линии пересечения поверхности и цилиндрических поверхностей, ось и центр которых совпадают с нормальным вектором плоскости. Таким образом, сечения представляют собой окружности. Координаты измеренных точек сохранялись в файлы *.txt для дальнейшего анализа.

Анализ и обработка измеренных поверхностей

Для проведения обработки измеренных данных координаты измеренных точек поверхностей загружались в программный пакет MATLAB. Обработка измеренных данных заключается в сглаживании выпадающих значений, упорядочивании сетки точек на поверхностях, имеющих значительные отклонения формы и математическое базирование после внесения корректировок. Рассмотрим подробнее три подзадачи анализа.

Координаты после измерения могут иметь «выпадающие» значения при наличии загрязнений на поверхности, неправильного срабатывания датчика и т.п. При измерении 160 точек может набираться до десяти таких значений, величина которых может составить от 5 до 30 мкм и выше. Кроме того, присутствует случайная погрешность измерения, которая составляет незначительную величину до 2–3 мкм и может быть отфильтрована. Для фильтрации таких значений на цилиндрических и плоских поверхностях сначала необходимо вписать в массив измеренных точек заменяющие элементы: соответственно «цилиндр» и «плоскость», по методу наименьших квадратов.

Для анализа возникающих отклонений формы отверстий и валов предварительно выполняется задание направления оси Z локальной системы координат по оси заменяющего элемента. На следующем этапе производится перевод координат точек (в плоскости сечения) в полярную систему координат. В случае цилиндрических поверхностей центр системы координат переводится в центр вписанной окружности соответствующего сечения. Затем выполняется фильтрация случайной компоненты отклонения и «выпадающих» величин. Для фильтрации использовался метод скользящей средней. Рассматриваемые величины после фильтрации численно равны среднему арифметическому значений функции за установленный период и вычисляется по формуле:

$$SMA_t = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} p_{t-i}, \quad (\Gamma.1)$$

где SMA_t – значение скользящего среднего в точке t ;

n – интервал сглаживания, равный количеству значений функции, по которым выполняется расчет скользящего среднего;

i – номер значения функции в пределах интервала сглаживания;

p_{t-i} – значение исходной функции в точке $t-i$.

В случае цилиндрических поверхностей фильтрация проводится для величин полярных радиусов B и G . Для торцевых граней A , D и H производится фильтрация координат точек вдоль оси Z . При рассмотрении поверхности B точки с выпадающими значениями удалялись из расчетов.

Вторая подзадача вытекает из необходимости сплайнового описания поверхностей. Кривые и поверхности сложной формы в CAD системах и метрологическом обеспечении измерительного оборудования описываются сплайновыми уравнениями и представляются в порционном виде, похожем на «лоскутное одеяло». Для описания поверхностей деталей, имеющих геометрические отклонения формы, использовались поверхности, образованные из бикубических порций Кунса. Описываемая поверхность представляет собой сегмент с соответствующими значениями параметров $0 \leq u \leq 1$, $0 \leq v \leq 1$. Порция Кунса образуется в результате сопряжения граничных сплайновых кривых и определяется выражением:

$$P(u, v) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} u^i v^j, \quad (\Gamma.2)$$

где $P(u, v)$ – точка бикубической поверхности;

a_{ij} – алгебраические векторные коэффициенты с компонентами x , y и z .

При сканировании сечений количество получаемых в них точек является неодинаковым. Кроме того, могут присутствовать области, где поверхность отсутствует, или измерения произвести не удалось. Для расчета параметров $\delta_{\text{пар}}$ и L требуется упрощенная аппроксимация базовых поверхностей по измеренным координатам определенных точек с использованием МНК. Для остальных рассматриваемых поверхностей требуется передать информацию об отклонениях в каждой точке. Для этой цели по результатам измерений, прошедших предварительную фильтрацию, определялись сечения с одинаковым количеством точек для каждой поверхности. Для решения второй подзадачи анализа была использована кусочно-полиномиальная интерполяция, и при

необходимости экстраполяция, кубическими сплайнами сечений для плоских и цилиндрических поверхностей.

Затем производился обратный перевод точек поверхностей, прошедших фильтрацию и упорядочивание из полярной в декартову систему координат с возвратом центра в исходное положение.

После проведения фильтрации требуется корректировка системы координат, ввиду того, что выпадающие значения точек на базовых поверхностях деталей искажали вычисляемые параметры заменяющих элементов и вносили погрешности в вычисляемый центр системы координат и направление базовых осей. Ввиду этого в точки базовых элементов (*A* и *B* для имитатора диска, *B* и *Г* для имитатора проставки) по методу МНК вписывались заменяющие элементы и производилось выравнивание всех измеренных точек деталей.

В результате выполнения обработки данных полученные координаты сохраняются в формат *.xlsx в структуре, приведенной в таблице Г.1.

Таблица Г.1 – Структура файла с координатами точек для построения поверхностей

T 11 (X)	T 11 (Y)	T 11 (Z)	T 12 (X)	T 12 (Y)	T 12 (Z)	...	T 1M (X)	T 1M (Y)	T 1M (Z)
T 21 (X)	T 21 (Y)	T 21 (Z)	T 22 (X)	T 22 (Y)	T 22 (Z)	...	T 2M (X)	T 2M (Y)	T 2M (Z)
...
T N1 (X)	T N1 (Y)	T N1 (Z)	T N2 (X)	T N2 (Y)	T N2 (Z)	...	T NM (X)	T NM (Y)	T NM (Z)

В таблице Г.1 буква *T* обозначает «точку», первая цифра после буквы *T* обозначает порядковый номер продольной кривой (направление *u* сплайновой поверхности из (Г.1)), вторая цифра – порядковый номер поперечной кривой поверхности (направление *v*). Буквы «X», «Y» и «Z» в скобках обозначают тип координаты точки.

Формат файла точек *.xlsx для загрузки и создания поверхности *B* имитатора проставки содержит таблицу, в каждой строке которой записаны координаты соответствующей точки.

Автоматизированное создание действительных моделей деталей в системе NX

Для автоматизации создания действительных моделей деталей разработано программное приложение в модуле NX/Open API на языке программирования Visual Basic, работающее как полностью интегрированная «внутренняя» функция NX с расширением *.dll. Интерфейс разработанного программного приложения представлен на рисунке Г.3.

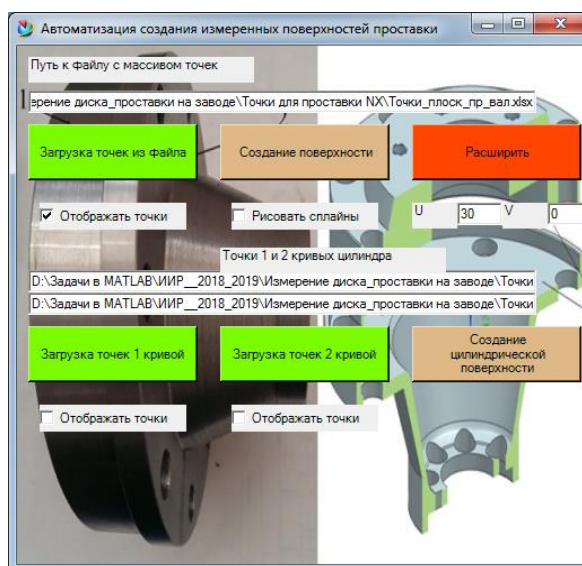


Рисунок Г.3 – Интерфейс программного приложения для автоматизированного построения действительных моделей деталей в системе NX

Экранная форма программного приложения содержит объекты управления 1–7, позволяющие задавать пути к файлам, запускать процесс обработки и сохранять результаты. С использованием разработанного программного приложения и подготовленных на этапе анализа данных, выполнялось создание действительных моделей деталей в три этапа. На первом этапе выполнялось построение номинальных моделей собираемых деталей. На втором этапе выполнялось автоматизированное построение действительных поверхностей по конечному множеству измеренных точек. На третьем этапе осуществлялось перестроение номинальных моделей путём добавления к ним действительных или модельных поверхностей таким образом, чтобы они ограничивали контур детали и образовывали единое замкнутое тело. Детали из CAD пакета NX сохраняются в формат *.x_t и производится импорт их геометрии в САЕ систему.

Моделирование геометрии сборки узла с учетом напряжено-деформированного состояния

Моделирование сборки рассматриваемого на рисунке Г.1 узла выполнялось в соответствии с методикой оценки геометрических параметров сопряжений поверхностей деталей в нежёсткой постановке. Использовался САЕ-пакет ANSYS. Полученные в результате расчетов напряженно-деформированные состояния имитаторов деталей «диск» и «проставка» соответственно представлены на рисунках Г.4 и Г.5.

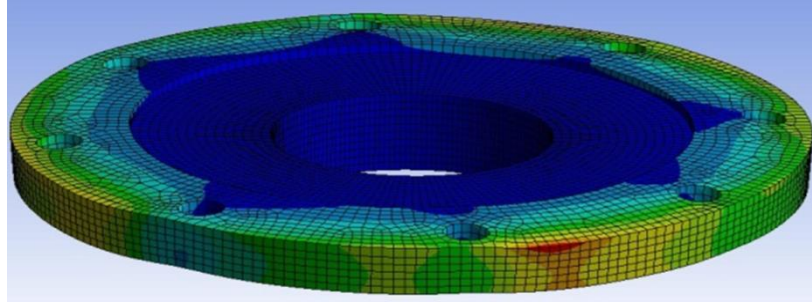


Рисунок Г.4 – Напряженно-деформированное состояние имитатора детали «диск»

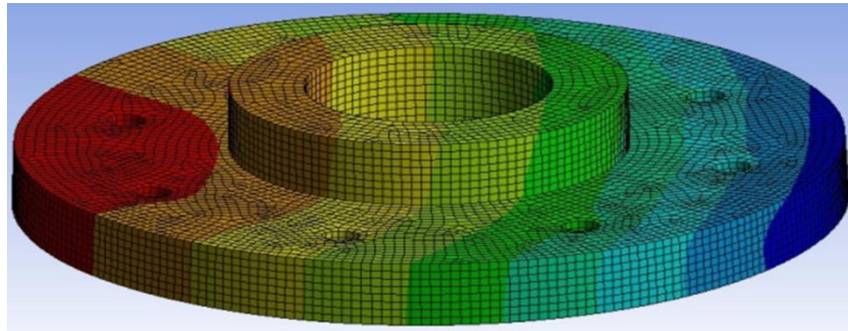


Рисунок Г.5 – Напряженно-деформированное состояние имитатора детали «проставка»

В решаемой задаче задавалась высокая плотность разбиения сетки на контактирующих торцах имитаторов. Задавались параметры задач контакта у соединений: плоскость-плоскость, а также соответствующих контактирующих пар поверхностей болтовых соединений. Заданы условия ограничения шести степеней свободы для детали имитатор «проставки». В качестве силового фактора задавались условия затягивания болтовых соединений.

Результирующая модель сборки двух деталей сохраняется в файл формата *.stl. На последующем этапе выполняется обработка экспортированных файлов, в ходе которой вычисляются величины сборочных параметров.

Обработка результатов расчётов

Файл формата *.stl содержит следующие данные: 1) $V_{g \times 3}$ матрицу координат вершин сетки stl-модели; 2) $F_{m \times 3}$ матрицу сочетаний вершин по три, образующих фасеты поверхностей; 3) $N_{m \times 3}$ матрицу координат нормалей фасет. Для расчета сборочных параметров необходимо выделить точки, принадлежащие отдельным поверхностям тел, для чего был использован алгоритм поиска и уточнения фасет одной грани детали, реализованный в MATLAB. Используя параметры заменяющих элементов «цилиндр» и

«плоскость» соответствующих поверхностей производится расчет рассматриваемых параметров отклонения расположения, регламентируемых ГОСТ Р 53442-2009.

Результаты исследований

В результате измерения поверхностей деталей было выявлено, что отклонение формы поверхностей *Б*, *В*, *Г* составляют менее 5 мкм, *А* – 12 мкм, *П* – 25 мкм и *Д* – 31 мкм. Сходимость результатов моделирования и измеренных в ходе эксперимента параметров $\delta_{\text{пар}}$, *L*, $\delta_{\text{рад.биен}}$ и $\delta_{\text{торц.биен}}$ оценивалась по абсолютным и относительным отклонениям:

$$\Delta_a = P_M - P_{\text{изм}}, \quad (\text{Г.3})$$

$$\Delta_{\text{отн}} = \frac{\Delta_a}{P_{\text{изм}}} \cdot 100\%, \quad (\text{Г.4})$$

где P_M – параметр, полученный в результате моделирования;

$P_{\text{изм}}$ – измеренный параметр на КИМ.

В таблице Г3.2 приведены результаты измеренных в ходе экспериментов и полученных в результате моделирования сборочных параметров. Проведено шесть сборок, отличающихся разным относительным угловым положением имитаторов «проставки» и «диска». Усилия затяжки болтов при сборке составили 10Н.

Таблица Г.2 – Параметры сборки, полученные в ходе измерения (1) и моделирования (2)

Угол, град	$\delta_{\text{пар}}$, мм		<i>L</i> , мм		$\delta_{\text{рад.биен}}$, мм		$\delta_{\text{торц.биен}}$, мм	
	1	2	1	2	1	2	1	2
359,78	0,029	0,026	30,033	30,057	0,331	0,290	0,069	0,070
314,89	0,025	0,026	30,032	30,056	0,221	0,196	0,063	0,070
269,88	0,023	0,027	30,032	30,056	0,230	0,205	0,058	0,071
224,83	0,027	0,027	30,035	30,057	0,201	0,227	0,063	0,069
179,84	0,027	0,027	30,032	30,057	0,432	0,465	0,071	0,070
89,84	0,029	0,026	30,035	30,057	0,303	0,272	0,072	0,067

В таблице Г.3 приведены характеристики абсолютных (Г.3) и относительных (Г.4) отклонений результатов моделирования и натурального измерения сборочных параметров.

Таблица Г.3 – Абсолютные и относительные отклонения результатов моделирования и натурального измерения сборочных параметров узла

Параметры	$\delta_{\text{пар}}$		L		$\delta_{\text{рад. биен}}$		$\delta_{\text{торц. биен}}$	
	Δ_a , мм	$\Delta_{\text{отн}}$, %	Δ_a , мм	$\Delta_{\text{отн}}$, %	Δ_a , мм	$\Delta_{\text{отн}}$, %	Δ_a , мм	$\Delta_{\text{отн}}$, %
Среднее	-0,001	-1,79	0,023	0,08	-0,015	-5,14	0,004	6,67
Максимальное	0,003	13,84	0,025	0,08	0,033	13,24	0,013	21,84
Минимальное	-0,003	-9,93	0,020	0,07	-0,045	-12,46	-0,005	-7,07
Размах	0,006	23,77	0,005	0,02	0,078	25,70	0,018	28,91

С целью повышения сходимости сборочных параметров узла, полученных в ходе моделирования и эксперимента, при выполнении расчётов использовались значения относительных угловых положений, измеренные в процессе выполнения сборочных работ.

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что присутствует постоянная погрешность при определении расстояния L . Кроме того, максимальная относительная погрешность определения торцевого биения $\delta_{\text{торц. биение}}$ составила 22%. В остальных случаях погрешность прогноза не превысила 15%. Результаты исследований показывают удовлетворительную сходимость оценок, получаемых с использованием разработанных моделей. Полученные расхождения результатов моделирования и сборки можно объяснить следующими причинами: 1) погрешностями измерения и создания моделей поверхностей деталей; 2) принятыми допущениями при разработке модели прогнозирования сборочных параметров деталей.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Исследование сопряжений детали с малой жёсткостью

Исследование сопряжений маложёсткой детали

Маложёсткие детали присутствуют в узлах и сборочных единицах ГТД и оказывают существенное влияние на точность их сборочных параметров. Текущее приложение посвящено исследованиям сопряжений маложёсткой пластины с целью проверки достоверности методики оценки точности размерных связей, приведенной в подразделе 3.1. Исследования сопряжений маложёсткой пластины с имитатором диска по торцевым поверхностям выполнялись в следующей последовательности:

- 1) измерение и создание действительной модели маложёсткой пластины;
- 2) моделирование сопряжений маложёсткой пластины и имитатора диска с использованием их действительных моделей, затяжка болтовых соединений выполнялась на момент 2,5; 5; 7,5; 10 и 12,5 Н·м;
- 3) оценка сборочных параметров и характера деформирования маложёсткой пластины;
- 4) проведение экспериментов по сборке и затяжке болтовых соединений с усилиями момента 2,5; 5; 7,5; 10; 12,5 Н·м;
- 5) расчёт сборочных параметров, измеряемых по торцевым поверхностям маложёсткой пластины;
- б) обработка и сравнение полученных результатов, построение зависимостей.

Теоретические и экспериментальные исследования позволят определить величины торцевых биений и отклонений от плоскостности контрольной поверхности, на основе которых будет сформировано заключение о точности оценки сборочных параметров.

Эскиз сборочного узла, включающего маложёсткую пластину и имитатор диска, приведен на рисунке Д.1.

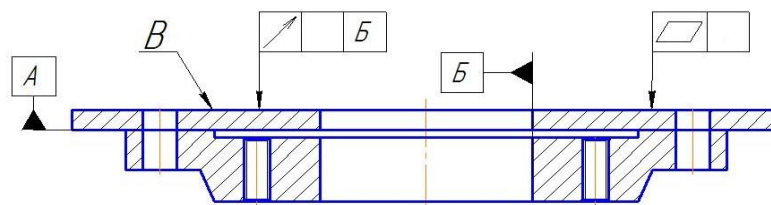


Рисунок Д.1 – Эскиз сборочного узла

На рисунке Д.2 приведен эскиз маложёсткой пластины.

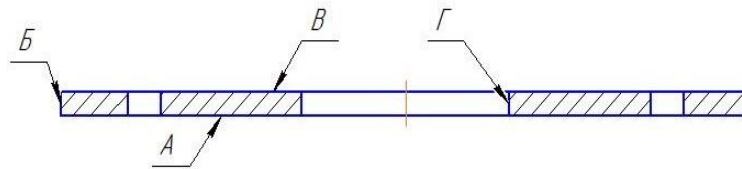


Рисунок Д.2 – Эскиз маложёсткой пластины

В ходе выполнения исследований использовались формулы и программные приложения, которые приведены в приложении Г.

Измерение маложёсткой пластины выполнялось с использованием координатно-измерительной машины DEA Global Performance 07.10.07. На рисунке Д.3 приведены исходная и сглаженная (с использованием скользящего среднего) зависимости исходных радиусов точек от их углового положения для торцевого биения по поверхности пластины.

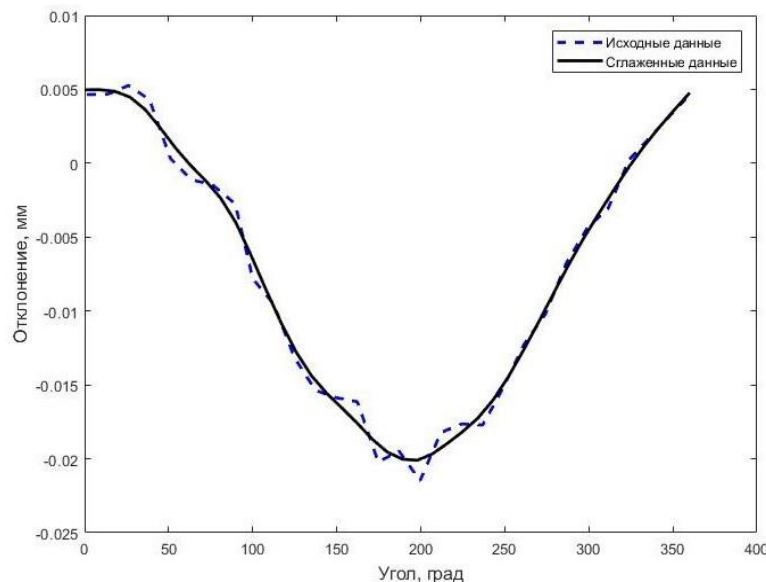


Рисунок Д.3 – Результат сглаживания радиус-векторов точек методом скользящей средней для торцевой поверхности маложёсткой пластины

Фильтрация измеренных координат точек проводилась для торцевых поверхностей А и В с использованием полярной системы координат. Поверхность А сопрягалась с диском, а В являлась контрольной. Координаты центров цилиндрических поверхностей В и Г смещались в центр вписанной окружности и также рассматривались в полярной системе координат. Выпадающие значения удалялись из расчета. На рисунке Д.4 также представлен результат кусочно-полиномиальной интерполяции кубическими сплайнами расширения на 5% поверхности В.

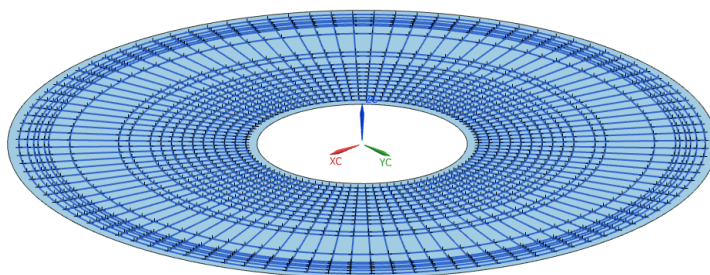


Рисунок Д.4 – Построенная торцевая поверхность

Рисунок Д.4 содержит иллюстрацию сплайнов, по которым выполнялось построение поверхности *B*. Погрешность построения поверхности составила не более 3 мкм. Остальные торцевые и цилиндрические поверхности строятся аналогичным образом.

Подготовка модели сборки узла производится в системе NX посредством создания нового проекта в модуле «Сборка». В используемый модуль поочередно загружаются действительные модели деталей. Рисунки Д.5, а,б содержат эскиз и результат подготовки модели сборки узла.

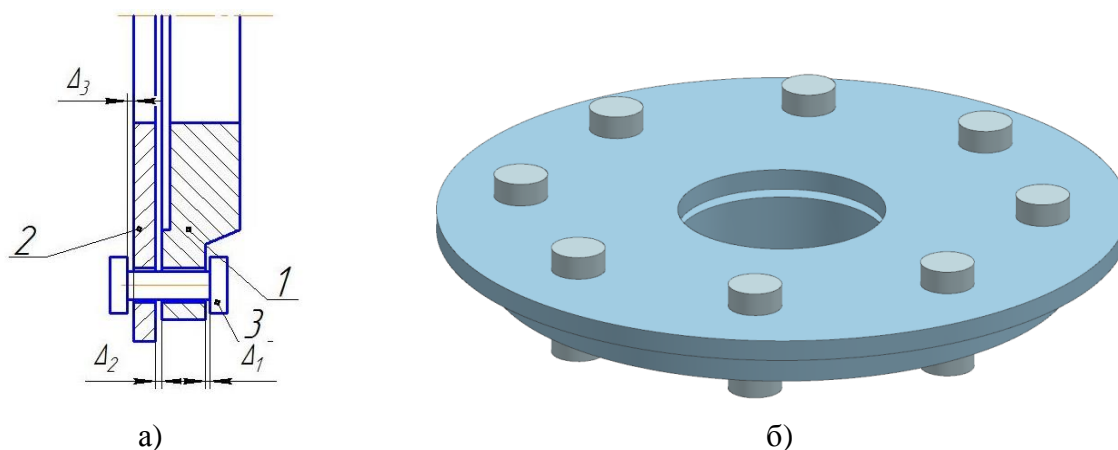


Рисунок Д.5 – Эскиз сборки узла (а) и его подготовленная модель (б)

Модель имитатора диска *1* фиксируется от всех возможных дальнейших перемещений в процессе сопряжения. Маложёсткая пластина *2* центрируется по оси вращения модели *1*. В случае несовпадения взаимного углового положения деталей проводится их выравнивание по отверстиям под болты. Между сопрягаемыми поверхностями задается зазор Δ_2 . Сопряжение болта с гайкой и деталями в модели сборки узла выполняется с использованием функции «Концентричность». 3D модель болта создаётся с учётом обеспечения зазоров Δ_1 и Δ_3 . Величины зазоров $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 = 0,1 \dots 0,5$ мм. Созданная модель сборки узла сохраняется в формате *.PRT.

Создание конечно-элементной модели (КЭМ) выполняется в системе ANSYS. КЭМ модель сборки узла импортировалась в проект Static Structural и подвергалась разбиению на простые объёмы с последующим их объединением в группу «Part». Параметризуются угловое положение маложёсткой пластины и расстояние Δ_2 для дальнейшего устранения зазора между деталями. Создание расчетной модели выполнялось в следующей последовательности: 1) задание свойств и моделей материала; 2) формирование сетки конечных элементов; 3) задание контактных пар и устранение зазора между гранями; 4) задание ограничений и нагрузок. Контактные пары назначаются соответственно по сопрягаемым торцевым поверхностям деталей 1 и 2, а также гайкой и головкой болта. Накладываются ограничения на перемещения имитатора диска и задаются усилия от болтовых соединений как показано на рисунке Д.6.

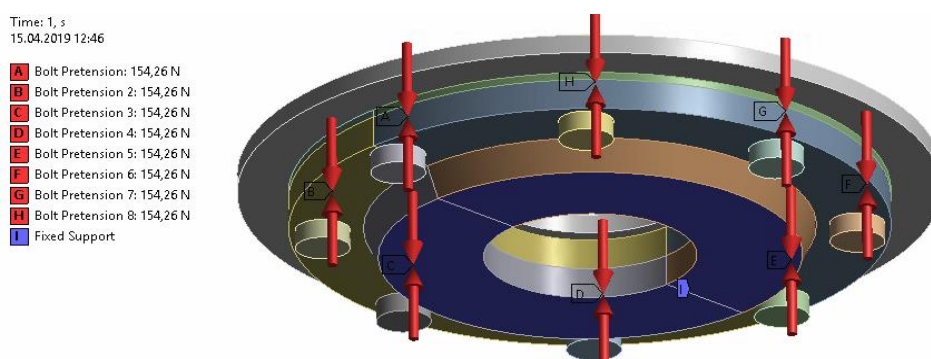


Рисунок Д.6 – Задание ограничений и приложения силовой нагрузки для сборки имитаторов

Для дальнейшего анализа деформированные модели узлов сохраняются в формате *.STL. Картина деформированного состояния узла представлена на рисунке Д.7.

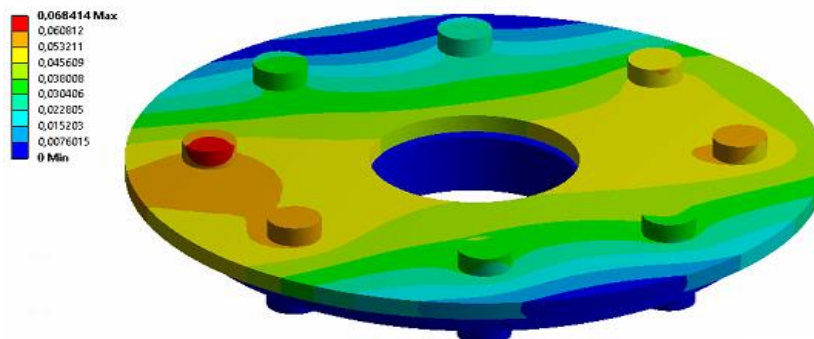


Рисунок Д.7 – Картина деформированного состояния узла

Оценка погрешностей сборки узла выполняется с использованием радиальных и торцевых биений контрольных поверхностей. Для нахождения торцевого биения

применительно к каждой точке модели определяется расстояние до плоскости, заданной точкой на оси вращения и её направляющим вектором. Указанное расстояние определяется по формуле:

$$R_i = -\frac{(\vec{x} - \vec{p}, \vec{v})}{(\vec{v}, \vec{v})}, \quad (\text{Д.1})$$

где R_i – расстояние от i -й точки расчетной поверхности до целевой плоскости;

\vec{x} – радиус-вектор точки на оси вращения детали;

\vec{p} – радиус-вектор точки расчётной поверхности;

\vec{v} – направляющий вектор оси вращения.

После нахождения всех расстояний производится расчёт торцевого биения:

$$\Delta_{\uparrow T} = \max_i R_i - \min_j R_j, \quad (\text{Д.2})$$

где $\Delta_{\uparrow T}$ – торцевое биение.

Расчёт радиального биения производится в два этапа.

На первом этапе находится максимально удаленная от оси вращения точка расчётной поверхности. Расстояние от точки до оси вращения вычисляется по формуле:

$$R = -\frac{\|\vec{v} \cdot (\vec{p} - \vec{x})\|}{\|\vec{v}\|}, \quad (\text{Д.3})$$

где R – расстояние от точки расчетной поверхности до оси вращения детали;

\vec{x} – радиус-вектор точки на оси вращения детали;

\vec{p} – радиус-вектор точки расчётной поверхности;

\vec{v} – направляющий вектор оси вращения.

В ходе второго этапа находится точка, наиболее близкая к оси вращения. Указанная точка ищется на всех границах треугольных участков расчётной поверхности. Расчет радиального биения производится по формуле:

$$\Delta_{\uparrow R} = \Delta_{\uparrow R \max} - \Delta_{\uparrow R \min}. \quad (\text{Д.4})$$

Определение указанных параметров выполняется с использованием приложения, разработанного в системе Matlab.

Сопоставление результатов исследований

Таблицы Д.1 и Д.2 содержат результаты теоретических и экспериментальных исследований торцевого биения и отклонения от плоскостности контрольной поверхности B .

Таблица Д.1 – Сравнение теоретических и экспериментальных результатов исследований по торцевому биению контрольной поверхности B

Момент затяжки болтовых соединений, Н·м	Торцевое биение поверхности B , мм		Абсолютные отклонения торцевого биения поверхности B , мм	Относительные отклонения торцевого биения поверхности B , %
	Модель	Эксперимент		
2,5	0,0241	0,0231	0,001	4,1
5	0,0239	0,0231	0,0008	3,3
7,5	0,0241	0,0217	0,0024	9,9
10	0,0239	0,0212	0,0027	11,3
12,5	0,0239	0,0222	0,0017	7,1

Таблица Д.2 – Сравнение теоретических и экспериментальных результатов исследований по отклонению от плоскостности поверхности B

Момент затяжки болтовых соединений, Н·м	Отклонение от плоскостности поверхности B , мм		Абсолютные отклонения от плоскостности поверхности B , мм	Относительные отклонения от плоскостности поверхности B , %
	Модель	Эксперимент		
2,5	0,0223	0,0262	-0,0039	-17,5
5	0,0228	0,0262	-0,0034	-14,9
7,5	0,0229	0,0253	-0,0024	-10,5
10	0,0229	0,025	-0,0021	-9,2
12,5	0,0231	0,0251	-0,002	-8,7

Проанализировав результаты, представленные в таблицах Д.2 и Д.3 можно отметить, что абсолютные величины изучаемых сборочных параметров не превышают 4 мкм, что показывает хорошую сходимость. Погрешность оценки сборочных параметров не превышает 18%. Под воздействием усилий со стороны болтового соединения маложёсткая пластина распрямилась по торцевым поверхностям и приобрела меньшие отклонения. На рисунке Д.8, а (на следующей странице) приведены результаты исследований отклонения формы торцевой поверхности B маложёсткой пластины в ходе сборки узла для момента затяжки равного 12,5 Н·м. Расхождения между экспериментальными и теоретическими данными по контрольной поверхности B показаны на рисунке Д.8, б.

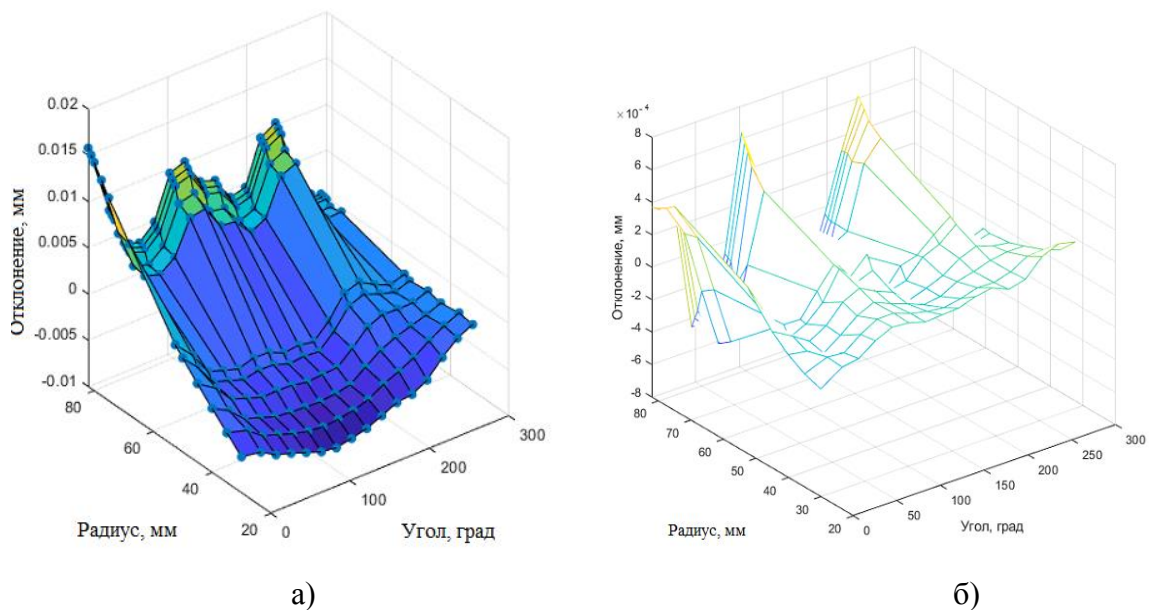


Рисунок Д.8 – Результаты исследований отклонения формы торцевой поверхности *B* маложёсткой пластины в ходе сборки узла: а) измеренные отклонения; б) расхождения между теоретическими и экспериментальными данными

На рисунке Д.9 приведен вид картины деформаций для маложёсткой пластины 5 мм с моментом затяжки болтовых соединений равным 60 Н·м. Результаты исследований, проведенных на примере сопряжений маложёсткой пластины и имитатора диска, показывают влияние величины затяжки болтовых соединений, первоначальных отклонений формы сопрягаемых поверхностей деталей и их толщины на величину сборочных параметров узла.

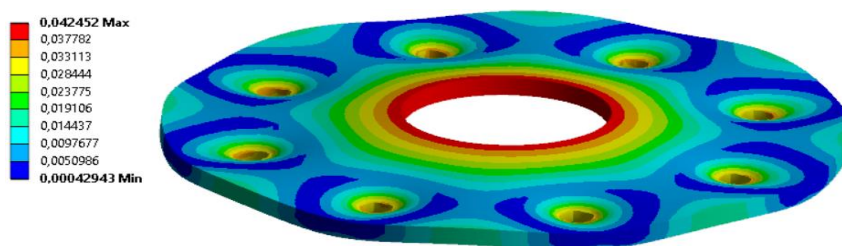


Рисунок Д.9 – Деформации маложёсткой пластины от затяжки болтовых соединений

В ходе исследований выявлена удовлетворительная сходимость разработанных моделей и методик, что позволяет использовать их в дальнейших исследованиях при выполнении сборочных работ узлов ГТД.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Исследование сопряжений деталей ротора

Исследование сопряжений деталей ротора

С целью проверки достоверности разработанных в третьей главе метода и моделей рассмотрим моделирование сопряжений деталей ротора на примере сборки узла турбины низкого давления, включающего детали «диск» и «проставка». Эскизы деталей приведены на рисунках Е.1 и Е.2, отмечены базовые и контрольные поверхности.

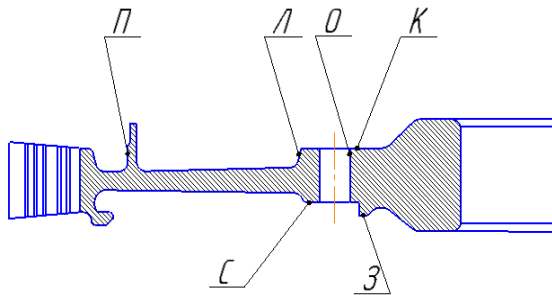


Рисунок Е.1 – Эскиз детали «диск 3 ступени»

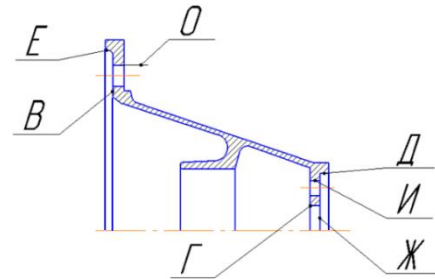


Рисунок Е.2 – Эскиз детали «проставка»

Сопряжение рассматриваемых деталей выполняется по торцевым и цилиндрическим поверхностям, соответственно B, E «проставки» и $K, Л$ «диска». Точность сборки оценивается радиальными и торцевыми биениями поверхностей $П$ и $З$ детали «диск» относительно поверхностей сопряжения с валом – торца $Ж$ и отверстия $Д$.

Моделирование поверхностей деталей ротора

Математическое представление цилиндрических поверхностей выполнялось с использованием формулы (Е.1):

$$\vec{p}_{ц} = \left| \begin{matrix} (r_{ц} + \delta r_{ц} + \delta_{\phi}(\chi)) \cdot \cos(\chi) & (r_{ц} + \delta r_{ц} + \delta_{\phi}(\chi)) \cdot \sin(\chi) & h \end{matrix} \right| \cdot \mathbf{M}_x \cdot \mathbf{M}_y + \vec{t}, \quad (\text{Е.1})$$

где $r_{ц}$ – номинальный радиус точек сечения;

$\delta r_{ц}$ – постоянная величина отклонения радиуса от номинального значения;

χ – полярный угол рассматриваемой точки;

h – высота сечения;

$\mathbf{M}_x, \mathbf{M}_y$ – матрицы вращения вокруг осей OY и OZ ;

\vec{t} – вектор смещения;

δ_{ϕ} – отклонение формы в точке $p_{ц}$, представленное при помощи ряда (Е.2):

$$\delta_{\phi}(x) = \sum_{k=1}^{+\infty} A_k \sin(k \cdot (2 \cdot \pi \cdot x / \tau + \theta_k) + (1 + (-1)^k) \cdot \pi / 2) \quad (\text{E.2})$$

где A_k – набор амплитуд членов гармонического ряда;

θ_k – фазы членов гармонического ряда;

k – частоты членов гармонического ряда;

τ – период функции (длина кривой);

x – текущая длина кривой ограниченной начальной и текущей точками (угол).

Представленная формула (E.1) позволяет определить вектор координат каждой точки направляющей кривой сечения для цилиндрической грани, ось которой перпендикулярна XOY . Направляющие кривые для плоских поверхностей представлялись с использованием формулы E.3.

$$\vec{p}_{\text{пл}} = |r_{\text{т}} \cdot \cos(\chi) \quad r_{\text{т}} \cdot \sin(\chi) \quad h + \delta_{\phi}(\chi)| \cdot \mathbf{M}_x \cdot \mathbf{M}_y + \vec{t}, \quad (\text{E.3})$$

где $r_{\text{т}}$ – средний радиус точек торца;

δ_n – моделируемое отклонение формы при помощи ряда (E.2) в точке $p_{\text{пл}}$.

Представленная формула позволяет определить вектор координат каждой точки направляющей кривой для плоскости $\vec{p}_{\text{пл}}$, параллельной XOY . На рисунке E.3 приведена направляющая кривая для торцевой плоскости.

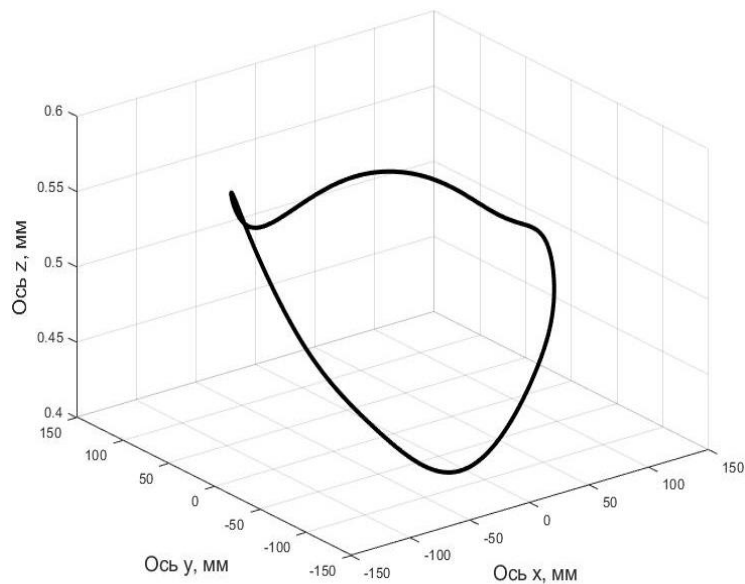


Рисунок E.3 – Направляющая кривая для плоскости

Координаты точек кривой сечения, перемещаемого вдоль направляющей, задаются с использованием уравнения параболы:

$$\vec{p}_{\text{пл}_c} = \left| r_i \cdot \cos(\chi) \quad r_i \cdot \sin(\chi) \quad h + (a \cdot r_{\text{пр}i}^2 + b \cdot r_{\text{пр}i} + c(\chi)) \right| \cdot \mathbf{M}_x \cdot \mathbf{M}_y + \vec{t}, \quad (\text{E.4})$$

где r_i – полярный радиус i -й точки торца;

$a, b, c(\chi)$ – коэффициенты в уравнении параболы.

$r_{\text{пр}i}$ – приведённый полярный радиус точки, рассчитывается с использованием выражения:

$$r_{\text{пр}i} = (r_i - r_{\min}) / (r_{\max} - r_{\min}), \quad (\text{E.5})$$

где r_{\min}, r_{\max} – минимальный и максимальный радиусы точек торца.

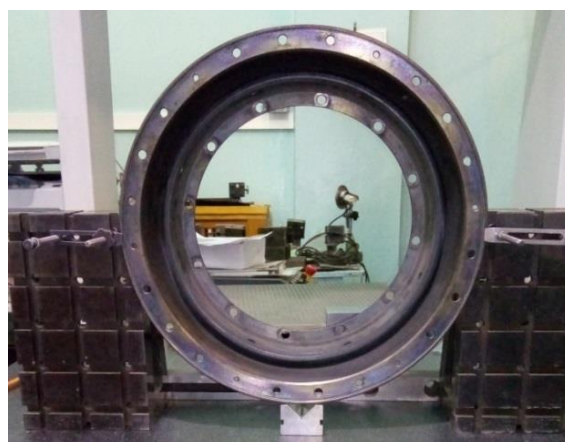
Коэффициент $c(\chi)$ изменяется в соответствии с полярным углом и равен отклонению формы δ_n направляющей с меньшим радиусом. Задание плоской поверхности может выполняться по нескольким направляющим, например двум окружностям.

Выполнение измерений и обработка их результатов

Измерение деталей «диск» и «проставка» выполнялось посредством координатно-измерительной машины (КИМ) DEA Global Performance, как показано на рисунке Е.4.



а)



б)

Рисунок Е.4 – Установка деталей на КИМ:

а) «диск»; б) «проставка»

Измерялись сопрягаемые поверхности деталей: торцевые по 100 точек в 2–3 сечениях по радиусу; цилиндрические по 100 точек в двух сечениях по высоте; координаты двенадцати отверстий «О» равнорасположенных по окружности, 20 точек в двух сечениях по длине отверстия. После выполнения измерений выполнялась обработка их результатов и создание действительных моделей деталей. Таблица Е.1 содержит статистические

характеристики геометрических параметров, характеризующих отклонения формы и расположения цилиндрических поверхностей деталей «диск» и «проставка», торца 3 детали «диск».

Таблица Е.1 – Параметры отклонений формы и расположения для цилиндрических поверхностей *E*, *II*, *Л* и торца 3

Цилиндрический поясok <i>E</i>				Цилиндрический поясok <i>Л</i>			
A_k , мм	k	θ_k , рад	$\delta r_{ц}$, мм	A_k , мм	k	θ_k , рад	$\delta r_{ц}$, мм
0,0013	6,9	2,1684	0,0059	0,0029	6,5	1,6145	-0,0456
α_x , рад	α_y , рад	t_x , мм	t_y , мм	α_x , рад	α_y , рад	t_x , мм	t_y , мм
-3,1416	-3,1416	0,0003	-0,0002	0	0	0	-0,001
Цилиндрический поясok <i>II</i>				Торец 3			
A_k , мм	k	θ_k , рад	$\delta r_{ц}$, мм	A_k , мм	k	θ_k , рад	
0,0016	6,3	1,6641	-0,0020	0,0056	6,5	1,7942	
α_x , рад	α_y , рад	t_x , мм	t_y , мм	α_x , рад	α_y , рад	t_z , мм	
0	0	0,0009	-0,0006	-0,00004	-3,1416	-0,0008	

Номинальные размеры цилиндрических поверхностей и торца 3 приведены в таблице Е.2.

Таблица Е.2 – Значения номинальных параметров цилиндрических поверхностей и торца

Параметр	Цилиндрический поясok <i>E</i>		Цилиндрический поясok <i>Л</i>	
	Сечение 1	Сечение 2	Сечение 1	Сечение 2
$r_{ц}$, мм	235,0		235,0	
h , мм	-2,0	-4,0	-1,3	-3,8
Параметр	Цилиндрический поясok <i>II</i>		Торец 3	
	Сечение 1	Сечение 2	Сечение 1	Сечение 2
$r_{ц}$, мм	276,5		-	-
h , мм	-6,5	-5,0	-25,3	
$r_{т}$, мм	-	-	212	213,1

В таблице Е.3 приведены параметры отклонений формы и расположения поверхностей *B* и *K*.

Таблица Е.3 – Параметры отклонений формы и расположения торцевых поверхностей

Торец <i>B</i>			Торец <i>K</i>		
A_k , мм	k	θ_k , рад	A_k , мм	k	θ_k , рад
0,0025	6,8	1,9083	0,0040	6,1	2,1238
Торец <i>B</i>			Торец <i>K</i>		
a	b	c	a	b	c
-0,0654	0,0500	0,0000	-0,0165	-0,0161	0
α_x , рад	α_y , рад	–	α_x , рад	α_y , рад	–
0	-3,1416	–	0	0	–

Номинальные размеры торцевых поверхностей *B* и *K* приведены в таблице Е.4.

Таблица Е.4 – Значения номинальных параметров торцевых поверхностей

Параметр	Торец <i>B</i>			Торец <i>K</i>		
	Сечение 1	Сечение 2	Сечение 3	Сечение 1	Сечение 2	Сечение 3
r_T , мм	214,1	223,4	232,4	215,0	224,5	232,0
h , мм	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Полученные результаты использовались при оценке параметров сопряжений деталей.

Сборка и измерение узла

Сборка узла выполнялась в следующей последовательности:

- предварительная состыковка деталей «дефлектор» и «диск»;
- установка болтов в соответствующие отверстия детали «проставка», для которых предусмотрена посадка с натягом;
- установка детали «проставка» на «диск» по угловым положениям 0 «диска» и 0 «проставки»;
- установка в деталь «проставка» оставшихся болтов, для которых предусмотрена посадка с зазором;
- накручивание и затяжка гаек на заданный момент при помощи моментного ключа с усилием в 2 кгс/м;
- последовательное осаживание детали «проставки» на «диск».

На рисунке Е.5 приведён вид деталей в собранном состоянии.



Рисунок Е.5 – Узел в собранном состоянии

После сборки узла выполнялось измерение его сборочных параметров. Аналогично собираемым положениям 0 «диска» и 0 «проставки» выполнялась сборка для положений 0 «диска» и 90, 180 и 270 «проставки». Положение болтов не изменяется в отверстиях. Эскиз измерения геометрических параметров узла приведён на рисунке Е.6.

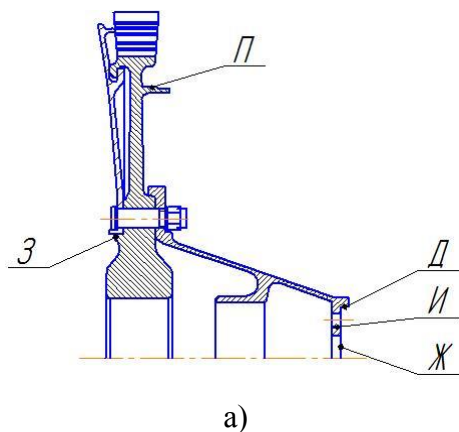


Рисунок Е.6 – Эскиз (а) и внешний вид (б) измерения узла

Базирование узла выполнялось по поверхностям детали «проставка»: торцевой *Ж*, цилиндрическим *Д* и *И*, а также по вспомогательной оси, полученной построением прямой, проходящей через ось цилиндрической поверхности *Д* и *О*. Измерялись поверхности для вычисления сборочных параметров: торцевого биения $\delta_{\Delta_{6-т}}$ по плоскости *З* и радиального биения δ_{Δ_6} цилиндрической поверхности *П*. Измерение поверхностей выполнялось со следующим количеством точек: торцевая *Ж* – 100 точек в трех сечениях; цилиндрическая *Д* – 100 точек в двух сечениях; цилиндрическая *П* – 100 точек в двух сечениях; торцевая *З* – 100 точек в двух сечениях.

Обработка измеренных координат точек заключалась в сглаживании выпадающих значений и вычислении координат точек, не достающих для построения структуры данных. Сглаживание выпадающих значений координат точек выполнялось с использованием скользящего среднего. Определение не достающих координат точек из-за наличия отверстий под болтовые соединения, производилось с использованием кусочно-полиномиальной интерполяции. На рисунке Е.7 приведён пример сплайновой интерполяции для вычисления координат недостающих точек торца диска.

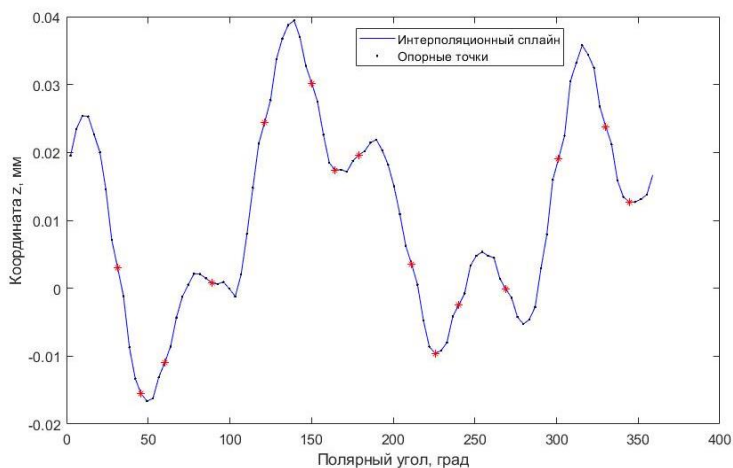


Рисунок Е.7 – Результат сплайновой интерполяции

На рисунке Е.8 приведена визуализация величин отклонений в точках на торце детали «диск».

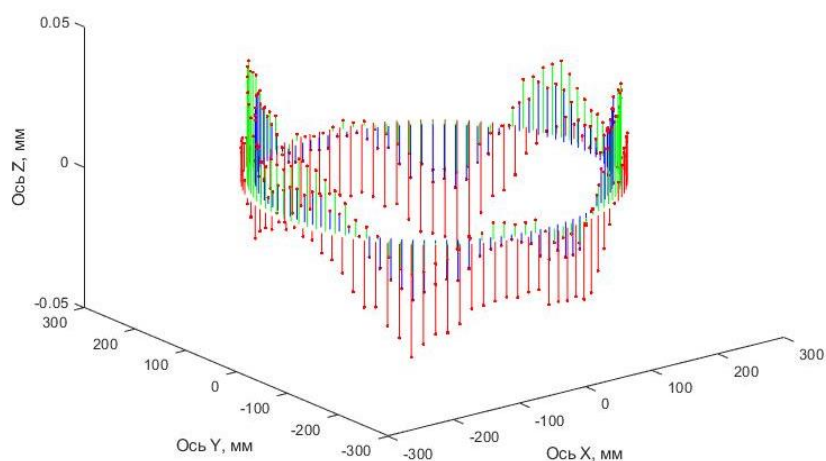


Рисунок Е.8 – Отклонение формы в точках торцевой плоскости диска *K*

Полученные данные использовались для моделирования сборки узла.

Моделирование сборки узла

Моделирование сборки узла выполнялось с использованием двух моделей. Первая модель разработана на основе метода совмещения поверхностей деталей. Конечно-элементная модель, являющаяся второй, сформирована с использованием методики оценки геометрических параметров сопряжений поверхностей деталей в нежёсткой постановке. Моделирование затяжки болтовых соединений проводилось методом «крест накрест» с требуемым моментом. Выполнялись расчёты с использованием разработанной конечно-элементной модели. Результаты расчётов сохранялись в формате *.stp. После завершения расчётов выполняется предварительный анализ деформаций сборки и элементов и величин давлений, возникающих в контактах. В качестве примера на рисунке Е.9 показана картина перемещений в узлах сетки конечных элементов.

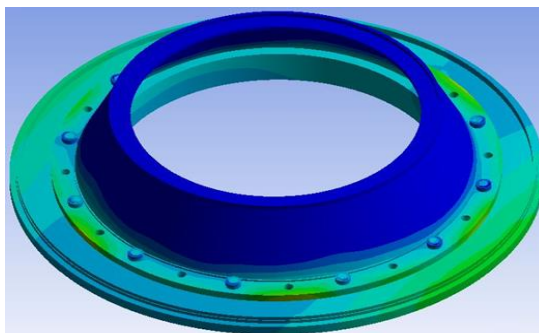


Рисунок Е.9 – Картина перемещений в узлах сетки конечных элементов

После сохранения результатов расчётов производилась их обработка в разработанном программном модуле для расчёта сборочных параметров – радиального и торцевого биений поверхностей Π и Σ детали «диск». Сравнение результатов моделирования выполнялось для трёх массивов данных: 1) полученных в ходе выполнения экспериментальных исследований; 2) моделированием в жёсткой постановке; 3) моделированием с использованием конечно-элементной модели. Сходимость результатов моделирования с действительными параметрами, полученными в ходе сборки, оценивалась посредством вычисления абсолютных и относительных отклонений:

$$\delta_a = \Pi_m - \Pi_{изм}, \quad (E.6)$$

$$\delta_{отн} = \frac{\delta_a}{\Pi_{изм}} \cdot 100\%, \quad (E.7)$$

где Π_m – параметр, вычисленный в результате моделирования;

$\Pi_{изм}$ – измеренный параметр на координатно-измерительной машине.

В таблице Е.5 приведены результаты измеренных в ходе экспериментов параметров сборки и полученных в результате виртуального моделирования.

Таблица Е.5 – Полученные в ходе моделирования и экспериментальных исследований сборочные параметры узла

Сборочный параметр	Угол	Величина параметра, мкм			Отклонения					
		Жёст.	Нежёст.	Эксп.	Жёст. – эксп.		Нежёст. - эксп.		Жёст. - нежёст.	
					δ_a , мм	$\delta_{отн}$, %	δ_a , мм	$\delta_{отн}$, %	δ_a , Мм	$\delta_{отн}$, %
Радиальное биение δ_{Δ_6}	0	139	134	159	-20	-12,6	-25	-15,7	5	3,7
	90	125	97	134	-9	-6,7	-37	-27,6	28	28,9
	180	52	127	101	-49	-48,5	26	25,7	-75	-59,1
	270	72	127	133	-61	-45,9	-6	-4,5	-55	-43,3
Торцевое биение $\delta_{\Delta_{6-т}}$	0	102	103	98	4	4,1	5	5,1	-1	-1
	90	82	90	79	3	3,8	11	13,9	-8	-8,9
	180	84	76	74	10	13,5	2	2,7	8	10,5
	270	104	92	84	20	23,8	8	9,5	12	13

На рисунке Е.10 приведены зависимости величин сборочных параметров от относительного углового положения деталей узла.

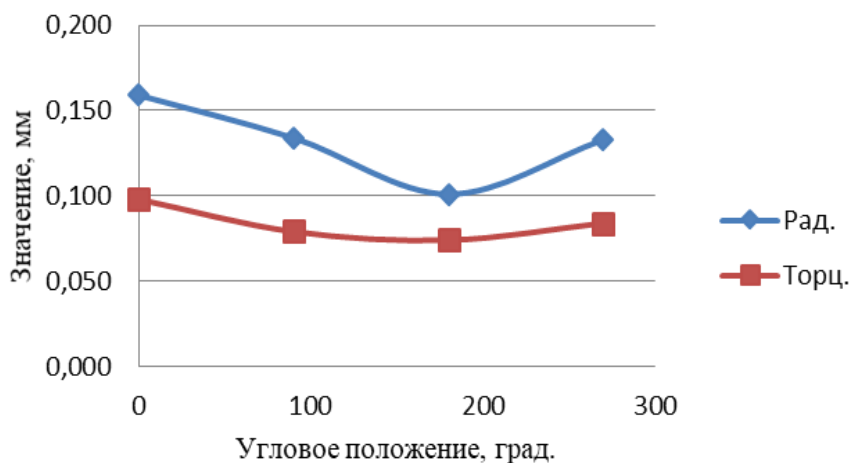


Рисунок Е.10 – Зависимости сборочных параметров узла от относительного углового положения деталей

Рисунок Е.11 содержит относительные погрешности оценки сборочных параметров.

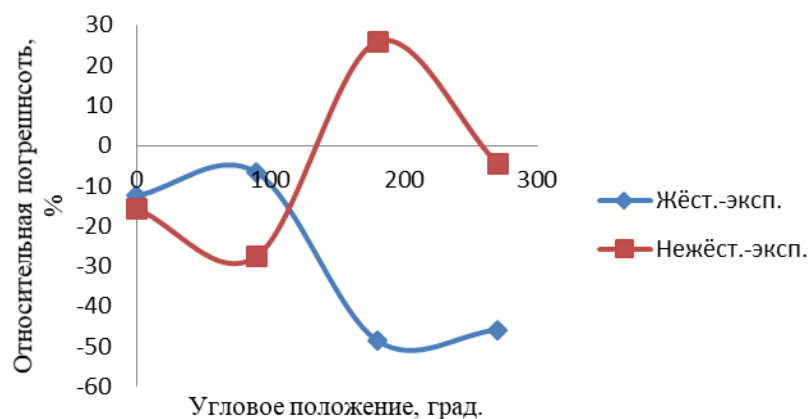


Рисунок Е.11 – Относительные погрешности оценки сборочных параметров

Расхождение данных экспериментальных исследований и оценок, полученных с использованием модели абсолютно жёстких тел, разработанной на основе метода совмещения поверхностей деталей вероятно можно объяснить следующими причинами:

- 1) погрешностями измерения и создания моделей поверхностей деталей;
- 2) деформациями деталей в ходе сборки узла.

Максимальное наблюдаемое расхождение составляет 61%, минимальное – 9%.

Расхождение данных экспериментальных исследований и оценок, полученных с использованием конечно-элементной модели вероятно можно объяснить следующими причинами:

1. Погрешностями измерения и создания моделей поверхностей деталей.

2. Способом оценки оси узла при его базировании с использованием метода наименьших квадратов для оценки сборочных параметров. Базирование узла по поверхностям *Д* и *Ж* (рисунок Е.6) выполнялось на основе вектора нормали плоской и координат центра цилиндрической поверхностей, определяемых в ходе аппроксимации измеренных точек по методу МНК. В собранном узле деталь «проставка» деформируется, что приводит к ошибкам оценки фактической оси узла. Более точная оценка сборочных параметров узла может быть получена при учёте прилегания поверхностей, например, с использованием технологии виртуальных измерительных мер.

3. Недостаточной точностью задаваемых характеристик материала, свойств контактов поверхностей, дискретностью сетки конечных элементов и др. параметров при создании конечно-элементной модели узла.

4. Погрешностями средств измерений, оказывающих влияние на достоверность контроля сборочных параметров узла.

Максимальное наблюдаемое расхождение не превышает 30%, минимальное 5%. Наименьшие погрешности наблюдаются при оценке торцевого биения контрольных поверхностей.

Анализируя расхождение результатов оценки сборочных параметров узла с использованием двух рассматриваемых моделей, можно отметить, что возникающие деформации оказывают существенное влияние на точность сборки. Влияние деформаций на точность сборки узлов может составлять до 30% от величины рассматриваемого параметра, оцененного в абсолютно жёсткой постановке.

Результаты исследований показывают удовлетворительную сходимость оценок, получаемых с использованием разработанных моделей. Достоверность оценки сборочных параметров можно повысить за счёт снижения погрешностей представления геометрии измеряемых поверхностей, уточнения параметров их контактного взаимодействия, характеристик материала деталей, повышения дискретности сетки конечных элементов модели, снижения методических ошибок при оценке сборочных параметров за счёт использования технологии использования виртуальных измерительных мер и виртуальных комплектных сборок.

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Апробация (верификация) метода снижения уровня вибраций роторов
на экспериментальном стенде

Апробация (верификация) метода снижения уровня вибраций роторов на экспериментальном стенде

Апробация (верификация) элементов метода снижения уровня вибраций роторов выполнялась с использованием разработанного разгонно-балансировочного стенда на примере имитатора ротора турбины НД.

Назначение и технические параметры разгонно-балансировочного стенда

Разработанный разгонно-балансировочный стенд (РБС) предназначен для решения следующих задач:

- 1) скоростных испытаний роторов путём их разгона до рабочих частот вращения, в том числе для выявления резонансных частот экспериментальных роторов и оценки их изгибных форм;
- 2) динамической балансировки роторов;
- 3) имитирования технологии балансировки ротора турбины низкого давления в лабораторных условиях с учётом действительных погрешностей сборки узла и балансировки деталей.

Закрепление роторов выполняется с использованием опор со сменными вкладышами под разные диаметры посадочных шеек валов. Привод выполнен в двух исполнениях. Первое исполнение подразумевает прямую передачу вращающегося момента от привода к испытываемому ротору. Второе исполнение должно предусматривать привод накидным ремнём. Двигатель привода управляется частотным регулятором. Стенд оснащён системой измерения деформации ротора. Краткий перечень технических характеристик РБС приведен в таблице Ж.1.

Таблица Ж.1 – Технические характеристики разгонно-балансировочного стенда

Наименование параметра		Значения (пояснения)
Вес балансируемого роторов, кг		от 0,3 до 10
Длина балансируемого роторов (между опорами), мм		от 50 до 500
Максимальный диаметр балансируемого роторов, мм		500
Число оборотов, тыс. об/ мин	Прямой / Ременный	до 24 / 10

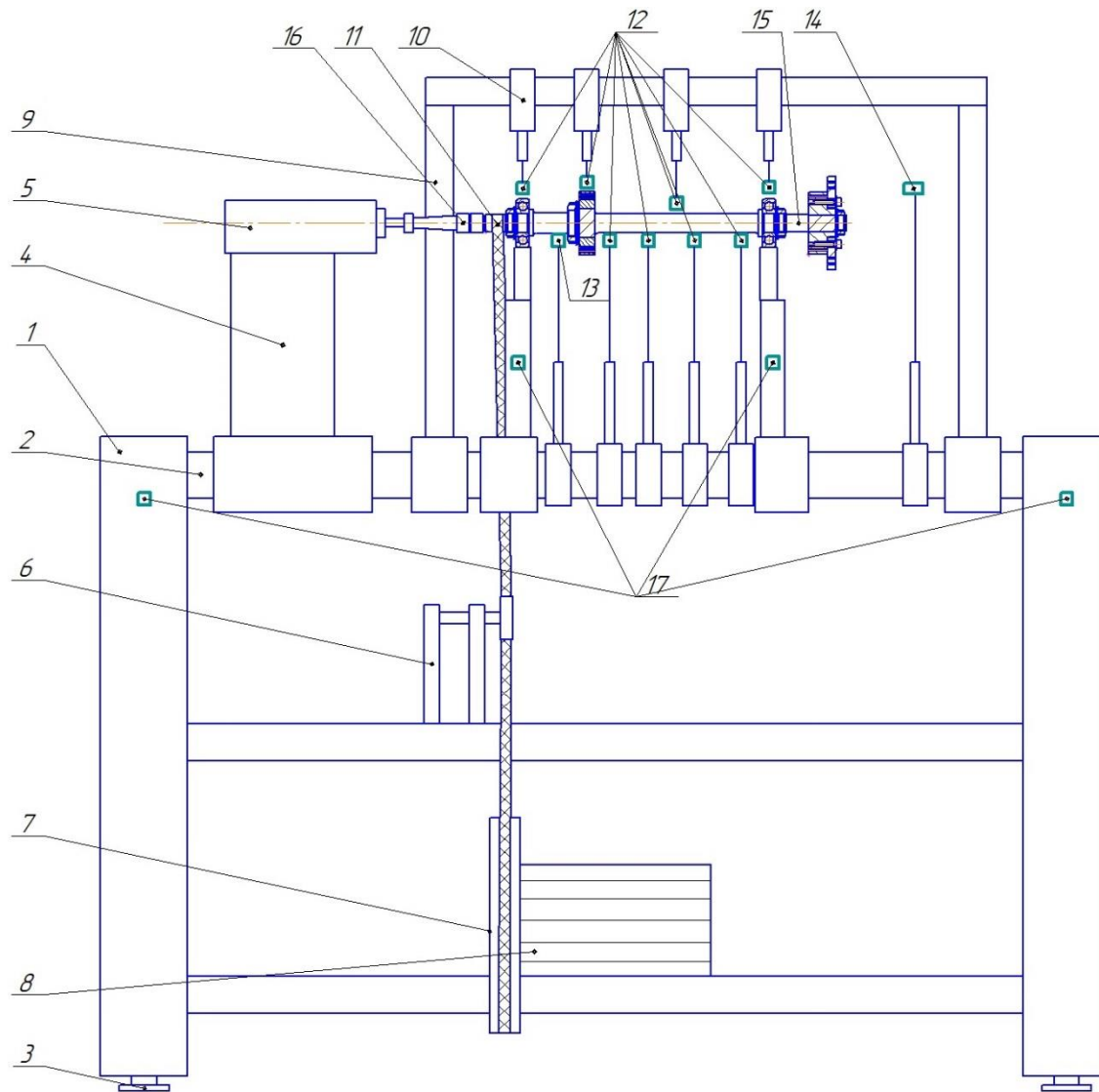
В последующем подразделе будет приведено описание конструкции разгонно-балансировочного стенда.

Общий вид и компоновка разгонно-балансировочного стенда

Разгонно-балансировочный стенд является балансировочной машиной с подвижными опорами. Принципиальная схема разгонно-балансировочного стенда приведена на рисунке Ж.1 (на следующей странице). Станина разгонно-балансировочного стенда состоит из двух одинаковых литых стоек, соединенных четырьмя круглыми направляющими. На двух верхних направляющих установлены основные механизмы для крепления ротора и измерения его параметров: левая и правая опоры; приспособление для закрепления электродвигателя прямого привода, оснастка для крепления токовихревых датчиков прогиба ротора – 12 и датчики угловой метки – 13 и 14, элементы защиты операторов от разрушения балансируемого ротора. Измерение виброускорения опор выполняется посредством активных пьезокерамических датчиков 17.

Опоры и место крепления электродвигателя прямого привода могут быть передвинуты по направляющим и закреплены рукоятками в любом месте в зависимости от длины балансируемой детали.

Вращение на балансируемую деталь может передаваться двумя вариантами приводов. Первым вариантом привода является ременный. Вращение в нём передается плоским приводным ремнем, накинутым на приводной шкив электродвигателя, натяжные ролики, с помощью них ветви ремня устанавливаются вертикально. Вторым вариантом привода является прямой привод. Вращение во втором варианте может передаваться от расположенного слева электродвигателя через муфту. Электродвигатель закреплён на каретке, которая имеет возможность плавного прямолинейного перемещения. Подвижная каретка с рельсами позволяет выполнять регулировку под размер ротора и произвести настройку соосности осей шпинделя и ротора. Несущие болты необходимы для корректировки высоты расположения электродвигателя.



1. Опоры станка ДЮ-10
2. Направляющие станка ДБ-10
3. Регулировочные винты
4. Опора прямого привода
5. Двигатель прямого привода
6. Карманы ремня
7. Шкив ременного привода
8. Двигатель ременного привода
9. Опора верхнего кронштейна датчиков
10. Крепление датчика
11. Ремень
12. Тако-вихревые датчики расстояния
13. Индукционный датчик положения ротора
14. Оптический датчик положения ротора
15. Имитатор ротора
16. Муфтовая передача прямого привода
17. Пьезокерамические датчики виброускорения

Рисунок Ж.1 – Принципиальная схема разгонно-балансировочного стенда

Измерительно-управляющая система

Измерительно-управляющая система предназначена для автоматизации проведения экспериментов и вывода данных с датчиков в цифровом виде. Структура измерительно-управляющей системы приведена на рисунке Ж.2.

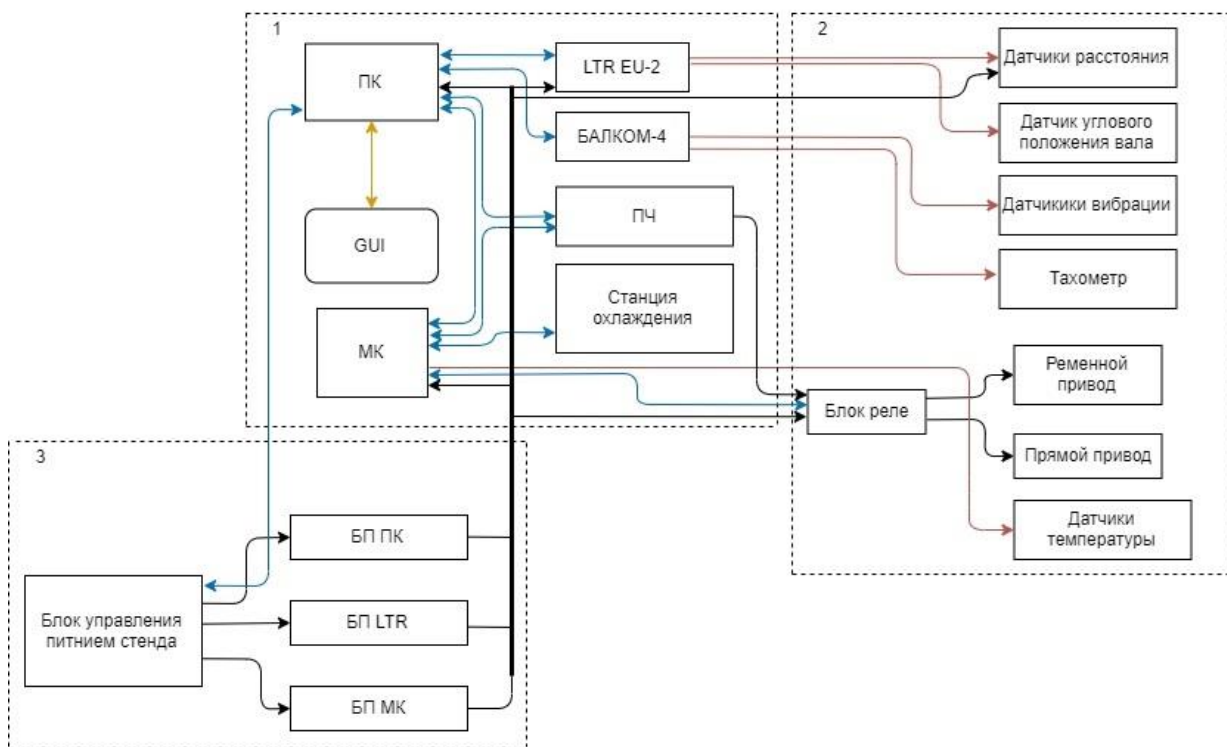


Рисунок Ж.2 – Структура измерительно-управляющей системы разгонно-балансировочного стенда

Измерительно-управляющая система укрупнено подразделяется на три блока. Первый блок предназначен для фиксации результатов измерений, поступающих с датчиков и их обработки. Второй блок включает в себя датчики для измерения и управления приводами. Третий блок содержит элементы для обеспечения работоспособности всей системы.

В первый блок входят: персональный компьютер Nettop Pentragon ЦП-Celeron D, ОЗУ – 2 Гб, 1333 МГц; преобразователь частоты INSTART мощностью 2,2 кВт; балансировочная система БАЛКОМ-4; крейтовые модули LTR 22.

Во второй блок входят: ДПА-М18-76У-1110-Н датчик положения аналоговый индуктивный; шпиндель GDZ80-1.5 (1.5 кВт); ДУПВ, пассивный индукционный датчик положения вала; активные пьезокерамические датчики вибрации; оптический тахометр.

В третий блок входят блоки питания системы.

Выходной сигнал датчика ДПА подаётся на вход 24-битного АЦП LTR22. Градуировка датчика позволяет фиксировать положения ротора с погрешностью не более 3 мкм. Прибор «БАЛКОМ-4» предназначен для балансировки роторов в одной, двух, трёх и четырёх плоскостях коррекции и может использоваться как вибротахометр и для контроля частоты вращения ротора.

Выполнение экспериментальных исследований

Исследуемым объектом является имитатор ротора турбины низкого давления, который был создан на основе ротора ГТД в масштабе 1:5, приведенный на рисунке Ж.3 (на следующей странице). В моделируемом роторе по аналогии с рассматриваемым ротором турбины присутствуют две плоскости коррекции для балансировки в сборе. Первая плоскость коррекции находится после второй опоры на месте установки диска. Вторая плоскость коррекции расположена на расстоянии 100 мм от первой опоры. Выбор геометрии имитатора ротора обусловлен необходимостью приближения к характеристикам рассматриваемого изделия в ходе испытаний. Исследования выполнялись в две серии экспериментов.

Первая серия экспериментов включает исследование виброскоростей и деформаций ротора на рабочих и критических частотах ротора с учётом его неуравновешенностей без имитатора диска. Первоначально выполнена балансировка модели ротора по 3 классу точности. Затем в соответствии с планом экспериментов вносились грузы в предусмотренные плоскости коррекции, каждая из которых включает серию равномерно расположенных торцевых отверстий. Выполнялись замеры виброскоростей на опорах и деформации ротора. Полнофакторный план экспериментов был составлен таким образом, чтобы в нем рассматривалось влияние опор, масс и углов их установки. Эксперименты проводились с закрепленными и свободными опорами, а также при комбинированном варианте.

Такое построение плана экспериментов позволило оценить взаимное влияние параметров опор. Массы вносимых грузов подобраны таким образом, чтобы они могли имитировать сопоставимый с натурным ротором по массогабаритным характеристикам дисбаланс. Для каждой плоскости коррекции подбирались свои грузы с точностью 3% относительно номинально заданной массы 0,5; 1; 1,5 и 2 грамм. Углы внесения и массы грузов изменялись с равным шагом 0; 90; 180 и 270 градусов.

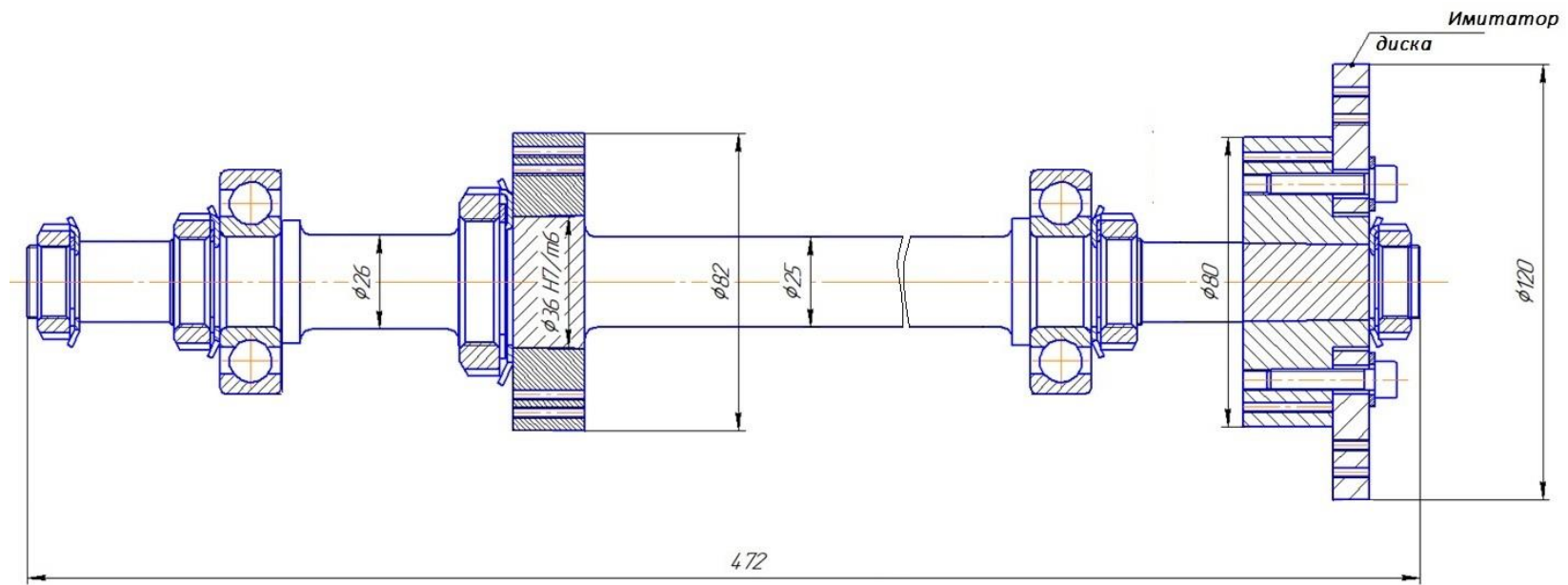


Рисунок Ж.3 – Эскиз имитатор ротора турбины низкого давления

На рисунке Ж.4 приведена часть плана экспериментов, включающего 27 сочетаний параметров.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1		Chassis 1							Chassis 2						
2	Expart name	$\alpha 1$	M	V1	V0	F	D	MM	$\alpha 2$	m	V1	V0	F	D	MM
3	07112019-11	0	m1.1	4,44	1,42	74,5		S	0	0	0,221	0,005	253,9		S
4	07112019-12	0	m1.1	3,13	1,44	85,4		T	0	0	0,219	0,006	94,9		S
5	07112019-13	0	m1.1	1,66	1,36	296,1		S	0	0	0,161	0,005	282,9		T
6	07112019-14	0	m1.1	1,67	1,24	290,9		T	0	0	0,158	0,004	33		T
7	07112019-21	0	m1.2	5,37	2,92	78,9		S	0	0	0,217	0,012	251,7		S
8	07112019-22	0	m1.2	4,14	3,88	293,6		T	0	0	0,22	0,009	225,9		S
9	07112019-23	0	m1.2	4,36	3	89,8		S	0	0	0,217	0,006	52,1		T
10	07112019-24	0	m1.2	4,93	4,65	295,5		T	0	0	0,217	0,008	44		T

Рисунок Ж.4 – Часть таблицы плана экспериментов при отсутствии имитатора диска

Таблица Ж.2 содержит параметры плана исследований для первой серии экспериментов.

Таблица Ж.2 – Параметры плана исследований для первой серии экспериментов

№	Наименование детали	Неуравновешенности, грамм (№1, 2, 3 и 4)	Угловые положения, град.
1	Корректирующее кольцо	0,5; 1; 1,5; 2	0; 90; 180; 270
2	Диск	0,5; 1; 1,5; 2	0; 90; 180; 270

В таблице Ж.3 приведены статистические характеристики исследуемых параметров виброскоростей по двум опорам, соответственно обозначаемых Vel1 и Vel2.

Таблица Ж.3 – Статистические характеристики параметров виброскоростей опор

Параметр	Среднее	СКО	Min	Max	Размах
Vel1, мм/с	4,119	1,956	0,228	7,250	7,022
Vel2, мм/с	0,017	0,009	0,002	0,035	0,033

Вторая серия экспериментов включает исследование виброскоростей и деформаций ротора на рабочих и критических частотах ротора с учётом его неуравновешенностей с установленным имитатором диска. Первоначально выполнена балансировка рассматриваемого ротора по 3 классу точности. Далее на ротор устанавливался диск с концентричностью не хуже 0,01 мм относительно оси вращения опор. Фактическое смещение диска относительно вала фиксировалось. Выполнялась балансировка ротора с имитатором диском, не ниже 3 класса точности. Далее проводились эксперименты,

аналогично, как в первой серии экспериментов, только добавилось смещение диска на 35, 70 и 100 мкм. На рисунке Ж.5 приведена часть плана экспериментов, включающего 137 сочетаний параметров.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	EXpart name	Chassis 1									Chassis 2						
2		$\alpha 1$	M	V1	V0	F	D	Swash	α Swash	MM	$\alpha 2$	m	V1	V0	F	D	MM
3	14112019-11	0	0	3,52	0,371	114,7		0	0	S	0	0	0,215	0,002	156		S
4	14112019-12	0	0	1,18	0,689	345,7		0	0	T	0	0	0,163	0,002	50		S
5	14112019-13	0	0	2,86	0,359	93,8		0	0	S	0	0	0,216	0,004	346,6		T
6	14112019-14	0	0	1,18	0,769	322,9		0	0	T	0	0	0,16	0,003	322,2		T
7	14112019-21	0	0	5,51	2,8	153,2		0	0	S	0	0	0,213	0,001	358,4		S
8	14112019-22	0	0	6,07	5,98	146,8		0	0	T	0	0	0,212	0,002	74		S
9	14112019-23	0	0	5,38	2,92	162,9		0	0	S	0	0	0,219	0,001	104,3		T
10	14112019-24	0	0	5,87	5,69	152,4		0	0	T	0	0	0,214	0,003	350,9		T

Рисунок Ж.5 – Часть таблицы плана экспериментов с имитатором диска

Таблица Ж.4 содержит параметры плана исследований для второй серии экспериментов.

Таблица Ж.4 – Параметры плана исследований для второй серии экспериментов

№	Наименование детали	Неуравновешенности, грамм (№1, 2, 3 и 4)	Угловые положения, град.	Смещение, мкм
1	Корректирующее кольцо	0,5; 1; 1,5; 2	0; 90; 180; 270	–
2	Диск	0,5; 1; 1,5; 2	0; 90; 180; 270	35; 70; 100

В таблице Ж.5 приведены статистические характеристики исследуемых параметров виброскоростей по двум опорам, соответственно Vel1 и Vel2.

Таблица Ж.5 Параметры изменения параметров

Параметр	Среднее	СКО	min	max	Размах
Vel1, мм/с	7,196	3,092	0,369	13,400	13,031
Vel2, мм/с	2,375	1,712	0,132	7,650	7,518

Полученные данные использовались для верификации конечно-элементной модели имитатора ротора.

Выполнение теоретических исследований уровня вибраций имитатора ротора турбины низкого давления

Конечно-элементная модель имитатора ротора турбины низкого давления для определения уровня вибраций на опорах ротора, которая представлена на рисунке Ж.6.



Рисунок Ж.6 – Внешний вид конечно-элементной модели имитатора ротора турбины низкого давления

Подшипниковая опора задавалась с использованием элемента COMBIN214, указывалось по три параметра жёсткости и демпфирования опоры. На рисунке Ж.6 подшипниковые опоры условно представлены в виде колец. Использование такого элемента позволяет учесть различие жёсткости опор разгонно-балансировочного в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Задание дисбалансов от вносимых грузов и от смещения имитатора диска относительно оси ротора выполнялось с использованием инструмента Rotating Force. Разработанная модель позволяет оценивать виброскорости V (мм/с) на опорах ротора при учёте погрешности установки диска и неуравновешенности деталей имитатора.

На первом этапе выполнялось моделирование динамики ротора на основе данных по задаваемым дисбалансам деталей и смещениям имитатора диска и подбор коэффициентов жёсткости и демпфирования на опорах по данным измерений. Подбор коэффициентов выполнялся по нескольким крайним точкам плана экспериментов.

На втором этапе на основе подобранных коэффициентов выполнялось моделирование динамики ротора с использованием данных по задаваемым дисбалансам деталей и смещениям имитатора диска. Сравнивались значения виброскоростей, которые получены в экспериментах и с использованием конечно-элементной модели имитатора ротора турбины низкого давления. На рисунке Ж.7 приведен вид деформаций рассматриваемого ротора.

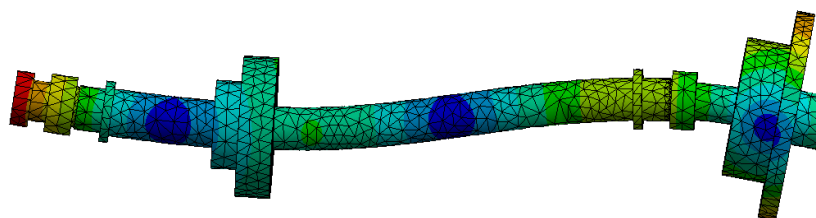


Рисунок Ж.7 – Деформации имитатора ротора турбины низкого давления в процессе его вращения

С использованием конечно-элементной модели рассматриваемого ротора выявлены две критические частоты вращения: 39 и 112 Гц (2340 и 6720 об./мин.). Максимальное расхождение измеренных в ходе эксперимента и оцененных с помощью конечно-элементной модели рассматриваемого ротора составило 27%. Полученные результаты показывают возможность использования разработанных конечно-элементных моделей для оценки дисбалансов и вибраций роторов на основе их действительных моделей в процессе дальнейших исследований. Последующий подраздел посвящён оценке линии прогиба рассматриваемого ротора.

Алгоритм обработки результатов измерений для оценки линии прогиба ротора

Обработка результатов измерений, получаемых с токовихревых датчиков, производилась для решения двух задач. Первая задача заключалась в построении диаграмм разверток по каждому из датчиков для оценки стабильности измерений и влияния отклонений формы и радиальных биений в контрольных точках ротора. Вторая задача состояла в оценке линии прогиба гибких валов, что возможно определить при использовании результатов измерений перемещений на опорах ротора. Блок-схема алгоритма обработки результатов измерений токовихревых датчиков представлена на рисунке Ж.8 (на следующей странице).

Рассмотрим содержание этапов обработки результатов измерений, получаемых с токовихревых датчиков.

На первом этапе выполняется загрузка результатов измерений, поступающих с аналого-цифрового преобразователя, к которому подключены датчики. В результате загрузки данных формируются соответствующие вектор-столбцы V_1, V_2, \dots, V_i датчиков в контрольных сечениях ротора, V^a, V^b датчиков установленных на опорах ротора, Z датчиков временных меток. Загружается вектор-столбец T временных отметок.

В ходе второго этапа выполняется преобразование результатов измерений, поступающих с датчиков V_i , представленных в единицах измерений электрического сигнала (В) в соответствующие перемещения D_i (мм) с использованием тарирующих функций:

$$D_i = f_i^{tar}(V_i). \quad (\text{Ж.1})$$

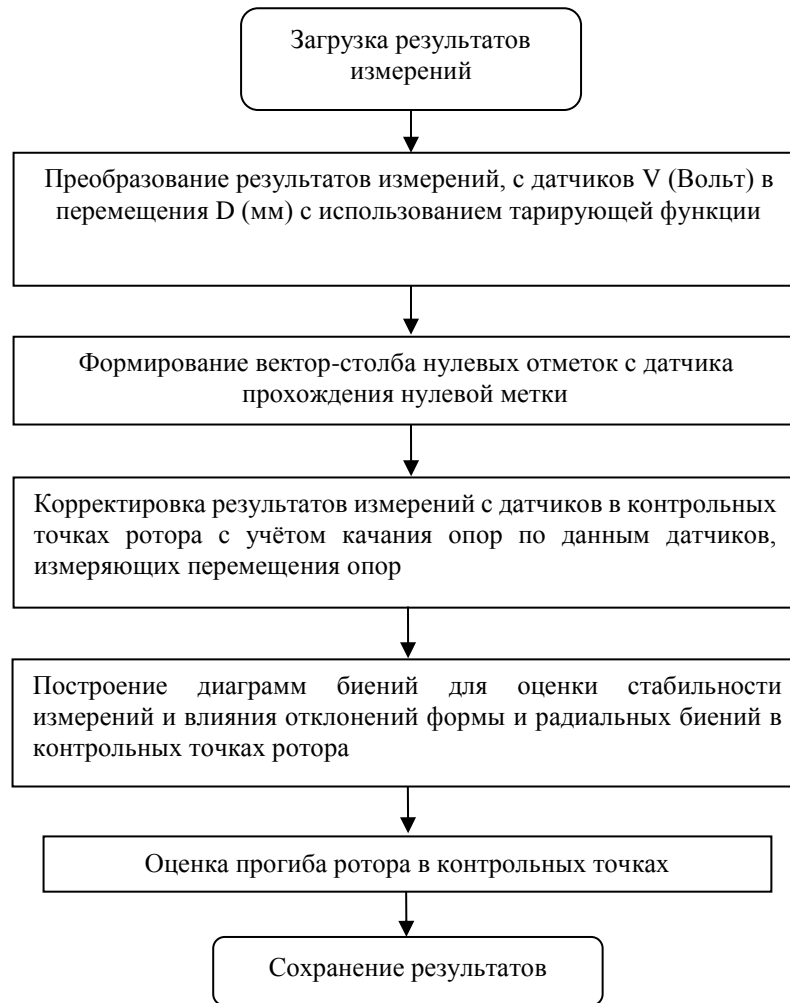


Рисунок Ж.8 – Блок-схема алгоритма обработки результатов измерений токовихревых датчиков

Аналогичным образом выполняется преобразование для датчиков, установленных на опорах ротора, в результате формируются вектор-столбцы D^{a-Add} и D^{b-Add} .

На третьем этапе производится формирование вектор-столба с датчика прохождения нулевой метки на основе ранее загруженных результатов:

$$ZM = \begin{cases} \delta = \frac{dZ}{dt} \\ z_{m_i} = 1, & \delta_i \geq Peak, \\ z_{m_i} = 0, & \delta_i \leq Peak \end{cases} \quad (Ж.2)$$

где $Peak$ – предельное значение, используемое для определения уровня прохождения нулевой отметки;

δ – массив производных по вектор-столбцу, полученный с датчика прохождения нулевой метки;

z_{m_i} – i – значение вектор-столбца прохождения нулевых меток.

В ходе четвёртого этапа выполняется корректировка результатов измерений с датчиков в контрольных точках ротора с учётом качания опор по данным датчиков перемещений, измеряющих перемещения опор.

Результаты, полученные с датчиков, дополняются соответствующими координатами вдоль оси X , на которых они установлены. Дополнение показано на примере датчиков, установленных на опорах:

$$\begin{aligned} D^{a-Add} &= [D^a, C^a], \\ D^{b-Add} &= [D^b, C^b], \end{aligned} \quad (\text{Ж.3})$$

где C^a и C^b – вектор-столбец координаты X первого датчика, количество элементов которого равно количеству элементов в D^b .

Аналогичным образом выполняется дополнение вектор-столбцов результатов измерений, получаемых с датчиков, расположенных в контрольных точках ротора величинами C_1, C_2, \dots, C_i .

На пятом этапе построение диаграмм биений по каждому из датчиков для оценки стабильности измерений и влияния отклонений формы и радиальных биений в контрольных точках ротора. Построение диаграмм развёрток производится по скорректированным данным D_i^{Add} .

В ходе шестого этапа выполняется оценка прогиба ротора в контрольных точках. Оценка прогиба выполняется с учётом движения опор и образуемых мгновенных осей, которые возможно оценить по данным, поступающим с датчиков, установленных на опорах. Определяются направления мгновенных осей ротора (вектор-столбец \vec{L}) в плоскости YZ . Формирование мгновенных осей производится по результатам с датчиков, установленных на опорах ротора D^b, D^b по следующей формуле:

$$\vec{L} = \frac{D^{b-Add} - D^{a-Add}}{\text{norm}(D^{b-Add} - D^{a-Add})}. \quad (\text{Ж.4})$$

Затем выполняется оценка мгновенных расстояний между направлениями мгновенных осей \vec{L} и дополненными результатами измерений датчиков $D_1^{Add}, D_2^{Add}, D_i^{Add} \dots$:

$$\text{dist}_i = D_i^{Add} - D_i^{Add-L}, \quad (\text{Ж.5})$$

где D_i^{Add-L} – точка на мгновенной оси \vec{L} , находящаяся к ней по нормали.

Построение диаграмм прогиба ротора выполняется на основе расстояний dist_i .

На седьмом этапе производится сохранение результатов измерений.

Обработка результатов испытаний для оценки линии прогиба имитатора ротора турбины низкого давления

Экспериментальные исследования линии прогиба ротора выполнялись на частотах вращения исследуемого ротора до 10 000 об./мин. Выполнялось построение:

- диаграмм биений в контрольных точках ротора в полярной системе координат;
- графиков для отражения уровней вариации перемещений в контрольных точках ротора с использованием инструмента «диаграмма размаха».

Инструмент «диаграмма размаха» используется для изображения одномерного распределения вероятностей и имеет вид прямоугольника, в пределах которого укладывается 50% реализаций рассматриваемого распределения. Центральная прямая соответствует медиане распределения, нижняя и верхняя граница соответствуют 25 и 75% квантилям. Крайние отростки отражают статистически значимые величины с учётом удаления выбросов. Красными точками за границами отростков отражают выбросы. На рисунках Ж.9, а и Ж.9, б приведены диаграммы биений в контрольной точке ротора №1.

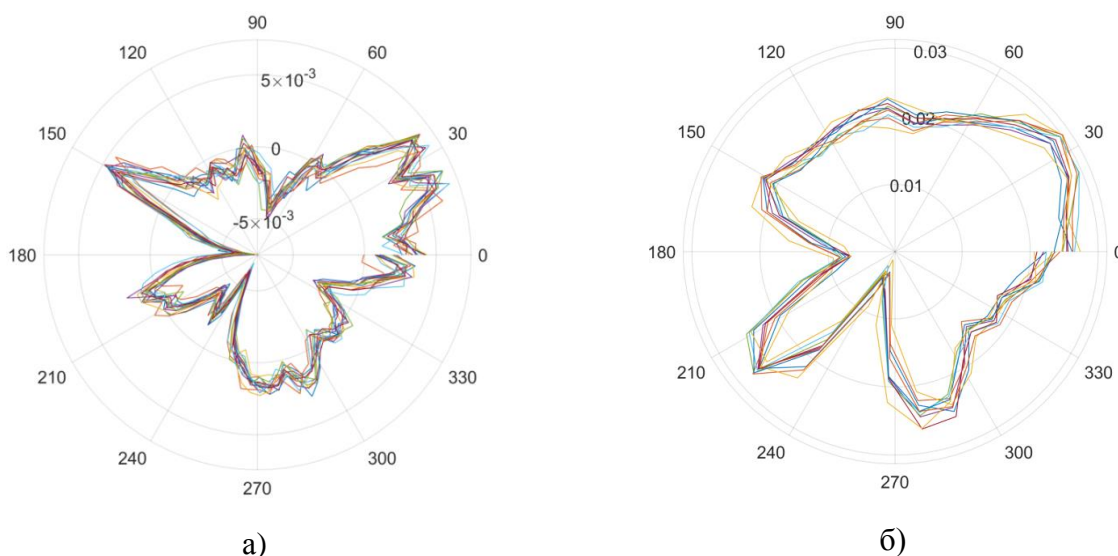


Рисунок Ж.9 – Диаграммы биений в мм для контрольной точке ротора №1 для разных частотах вращения ротора:

а) 2115 об./мин.; б) 6054 об./мин.

Прогиб ротора можно оценить с использованием графиков, содержащих уровни вариаций перемещений в контрольных точках, которые представлены на рисунках Ж.10, а, б, в, соответственно для частот вращения 2114, 4286 и 7909 об./мин.

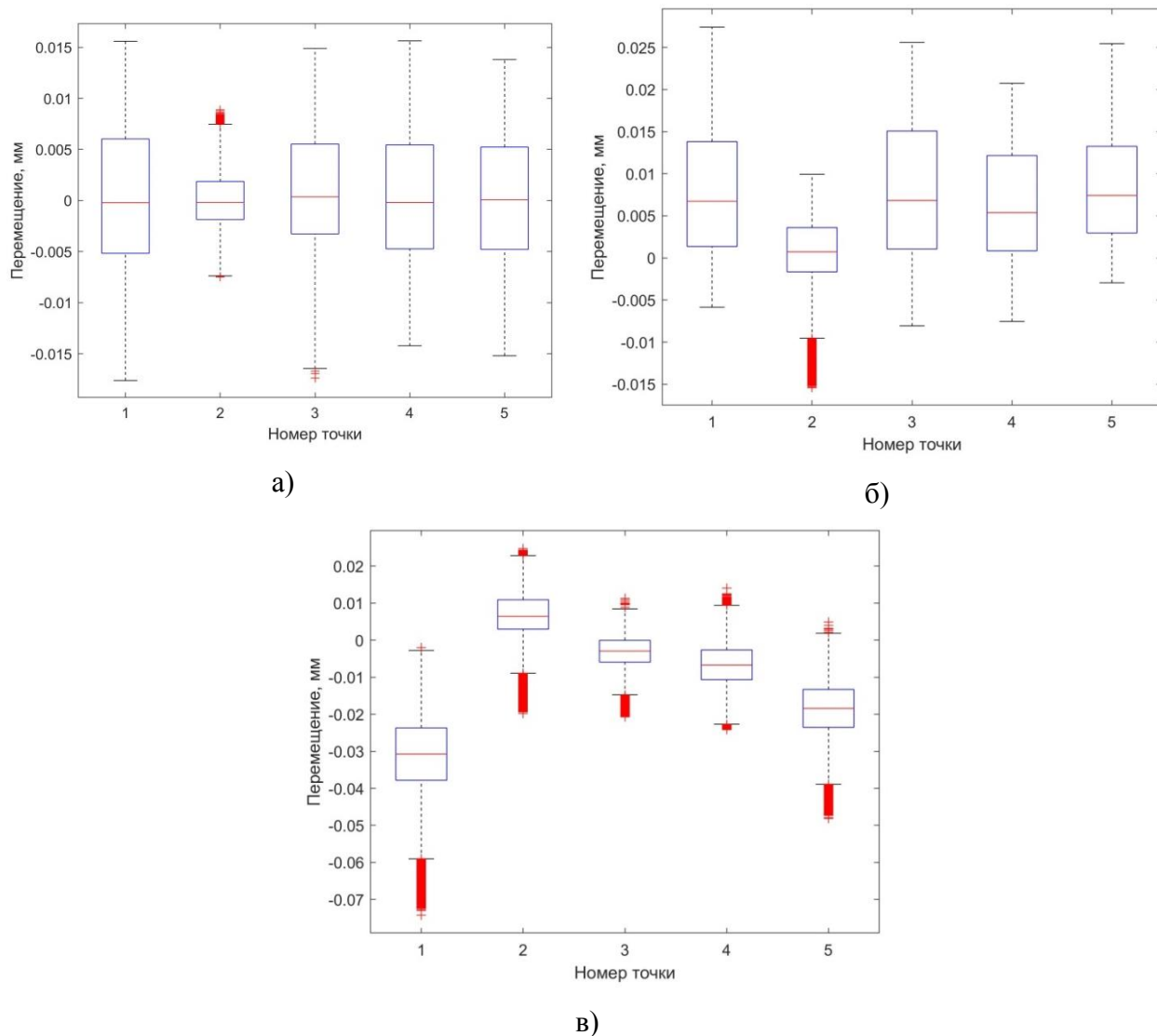


Рисунок Ж.10 – Вариации перемещений в контрольных точках ротора для разных частот вращения ротора:
а)2115 об./мин.; б)4286 об./мин.; в)7909 об./мин.

Контрольная точка 1 расположена на корректировочном кольце, имеющем диаметр 82 мм и содержащемся в средней части рисунка Ж.10. Контрольные точки 2, 3, 4 и 5 смещены вправо относительно точки 1 соответственно на расстояния 38, 84, 121 и 165 мм.

Сравнивая данные, приведенные на рисунках Ж.10, а-в, можно отметить, что с увеличением частоты вращения повышается размах перемещений и смещается центр группирования в контрольных точках ротора. Перемещения в контрольных точках ротора на частоте 2110 об./мин. имеют размах 0,01...0,03 мм, что можно объяснить радиальными биениями поверхностей, а также радиальной игрой в подшипниках. На частоте вращения 7909 об./мин. размах наблюдаемых перемещений составляет 0,04...0,055 мм, что можно объяснить деформациями ротора. Оцениваемая величина деформаций в точках ротора

может быть определена разностью перемещений на частотах 2114 и 7909 об./мин. и составляет до 0,01...0,02 мм. Выполненные расчёты подтверждают результаты экспериментов, показывающие возникающие деформации в исследуемом роторе.

Задачей апробации являлась проверка комплекса разработанных моделей, позволяющих оценивать уровни вибраций роторов в зависимости от погрешностей сборки узла и неуравновешенности деталей. Расхождение измеренных в ходе эксперимента и оцененных с помощью конечно-элементной модели уровня виброскоростей рассматриваемого ротора составила 27%. Экспериментальные исследования перемещений в нескольких точках исследуемого ротора показывают наличие деформаций при его вращении, что согласуется с результатами моделирования. Полученные результаты подтверждают возможность использования разработанных конечно-элементных моделей для оценки дисбалансов и вибраций роторов на основе их действительных моделей в процессе дальнейших исследований.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Результаты статистических исследований геометрической точности деталей
каскада низкого давления газотурбинного двигателя

Результаты исследований отклонений формы сопрягаемых поверхностей деталей ротора низкого давления

В таблице 3.1 представлены результаты измерений деталей ротора низкого давления.

Таблица 3.1 – Измеряемые детали и их размерно-точностные параметры

Наименование	Размеры отверстия под посадку, мм	Торцевая плоскость (наружный диаметр; допуск на плоскостность), мм	Отверстия под призонные болты, мм
Вал задний	$\text{Ø}240^{0,029}$	$\text{Ø}290; 0,02$	$\text{Ø}10,2^{0,021}$
Вал 015	$\text{Ø}255^{0,032}$	$\text{Ø}294; 0,02$	$\text{Ø}10,2^{0,021}$
Вал передний	$\text{Ø}240^{0,029}$	$\text{Ø}290; 0,02$	$\text{Ø}10,2^{0,021}$
Кольцо	$\text{Ø}250^{0,032}$	$\text{Ø}301; 0,34$	$\text{Ø}10,2^{0,021}$
Проставка	$\text{Ø}290^{0,032}$	$\text{Ø}324; 0,025$	$\text{Ø}8^{0,018}$

Результаты измерений отклонений формы поверхностей деталей «Вал задний»

На детали «Вал задний» измерялись отверстие под посадку, отверстия под болты и торцевая плоскость. Рисунок 3.1 содержит среднюю, минимальную и максимальную границы отклонений от круглости посадочного отверстия.

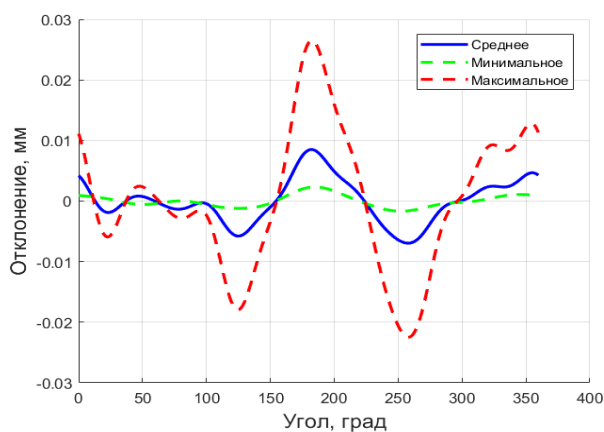


Рисунок 3.1 – Отклонение от круглости посадочного отверстия детали «Вал задний»

Графики отклонений имеют три локальных максимума и три минимума. Наиболее вероятные величина отклонения формы не превышает 0,015 мм, предельная величина составила 0,045 мм. На рисунке 3.2 приведены статистические оценки отклонений посадочных отверстий под болты детали «Вал задний».

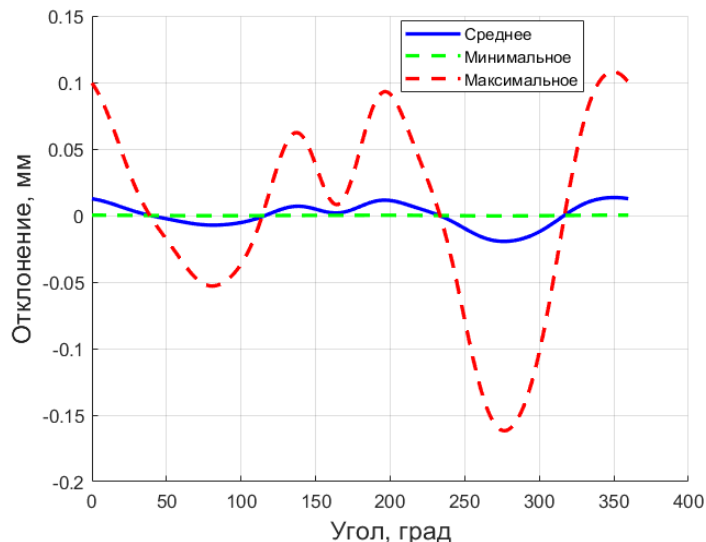


Рисунок 3.2 – Отклонение от круглости отверстий под болты детали «Вал задний»

Отверстия под болты выполнены с достаточно высокими отклонениями формы, в предельном случае достигающими до значения 0,25 мм. Средние значения отклонений формы составляют 0,02 мм. На рисунке 3.3 представлены статистические оценки отклонений от плоскостности на торце детали «Вал задний».

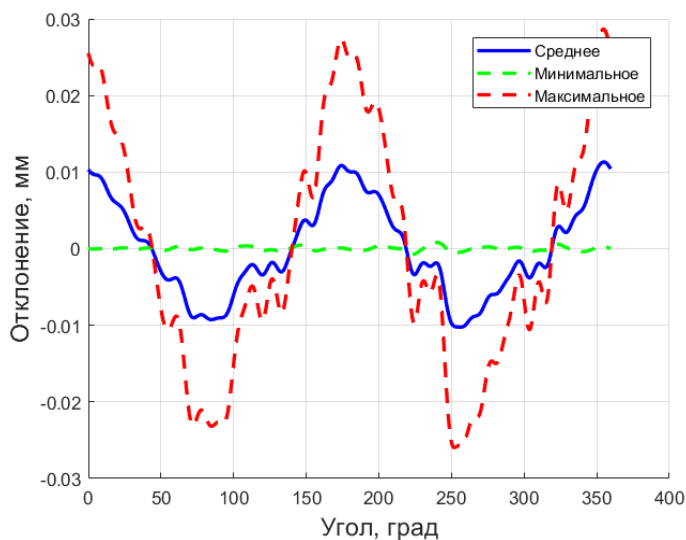


Рисунок 3.3 – Профиль отклонения от плоскостности торца детали «Вал задний»

Отклонение формы торца вала имеет два локальных максимума и два локальных минимума. Максимальная величина отклонений составляет 0,05 мм. Среднее выборочное значение отклонений не превышает 0,02 мм.

Результаты исследований отклонений формы поверхностей деталей «Вал»

Измерялись следующие поверхности деталей «Вал»: центральный посадочный пояс, отверстия под болты и торцевая плоскость. На рисунках 3.4-3.6 приведены результаты статистической обработки отклонений вдоль кривых измерений (торцевая плоскость так же измеряется по окружности).

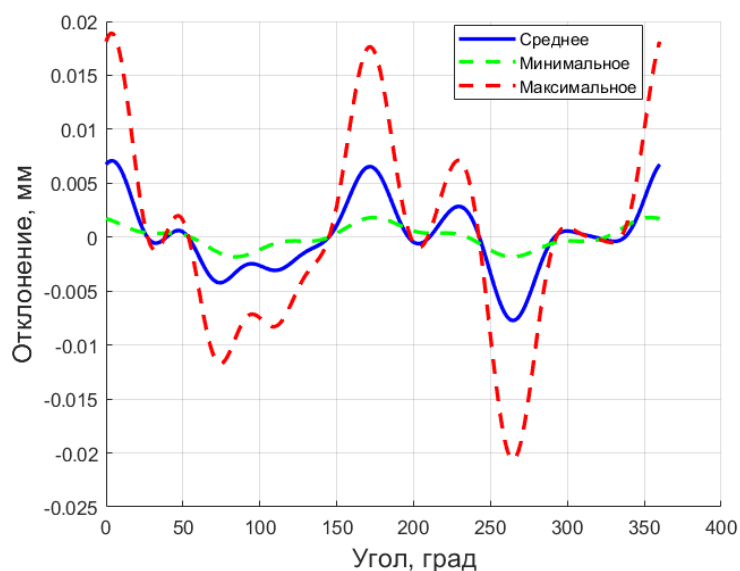


Рисунок 3.4 – Отклонение от круглости посадочного пояса детали «Вал»

Отклонение от круглости посадочного отверстия характеризуется большим количеством экстремумов. Средняя величина отклонения формы посадочного отверстия серии деталей достигает 0,015 мм.

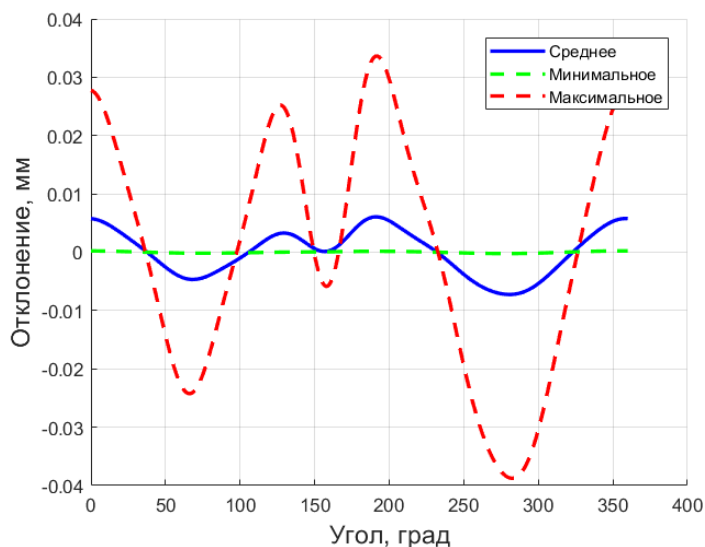


Рисунок 3.5 – Отклонение от круглости малых отверстий под болты детали «Вал»

Измеренные максимальные отклонения формы отверстий под болты оказались больше измеренных отклонений формы центрального отверстия и составляют 0,07 мм, в то время как их средняя величина не превышает значения 0,015 мм.

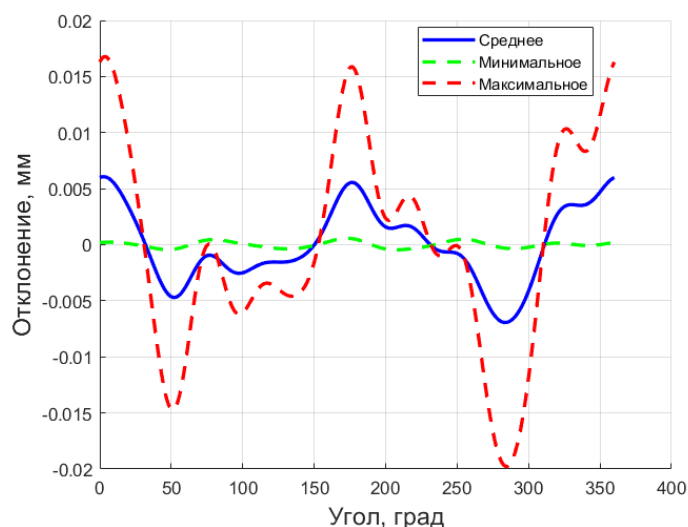


Рисунок 3.6 – Профиль отклонения от плоскостности торца детали «Вал»

Предельные отклонения формы торцевой поверхности вала составляют 0,035 мм.

Результаты исследований отклонений формы поверхностей деталей типа «Вал передний»

Измерялись следующие поверхности: центральное посадочное отверстие, отверстия под болты и торцевая плоскость. На рисунках 3.7–3.9 представлены результаты статистической обработки отклонений.

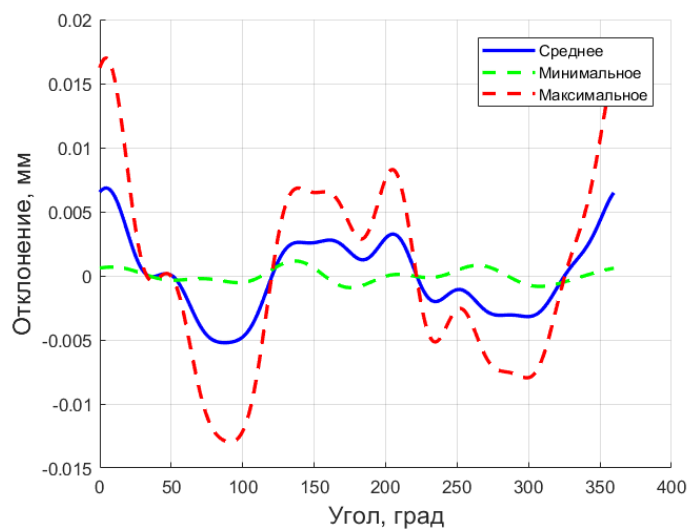


Рисунок 3.7 – Отклонение от круглости посадочного отверстия детали «Вал передний»

Отклонение формы посадочного отверстия имеет ярко выраженную «овальность», максимальная величина отклонения деталей партии составила 0,025 мм.

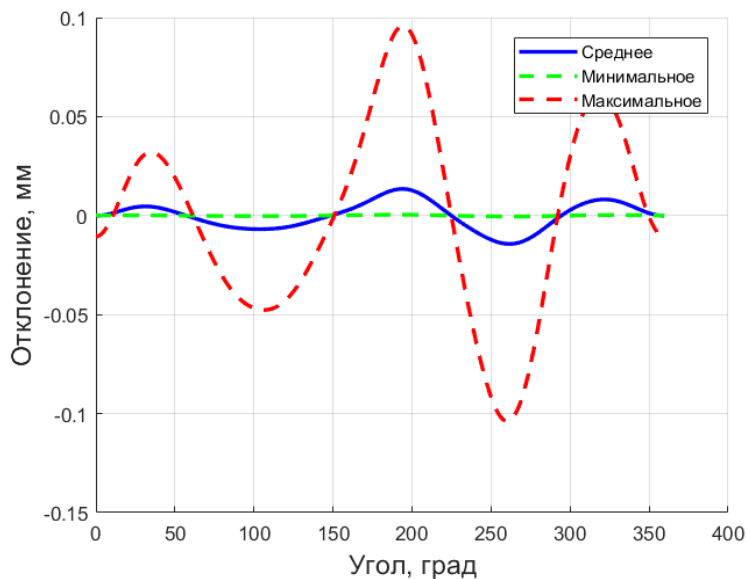


Рисунок 3.8 – Отклонение от круглости малых отверстий детали «Вал передний»

Средняя величина отклонений отверстий невелика для поверхностей данного типа и составляет 0,02 мм, однако наблюдаются значительные выпадки до 0,18 мм.

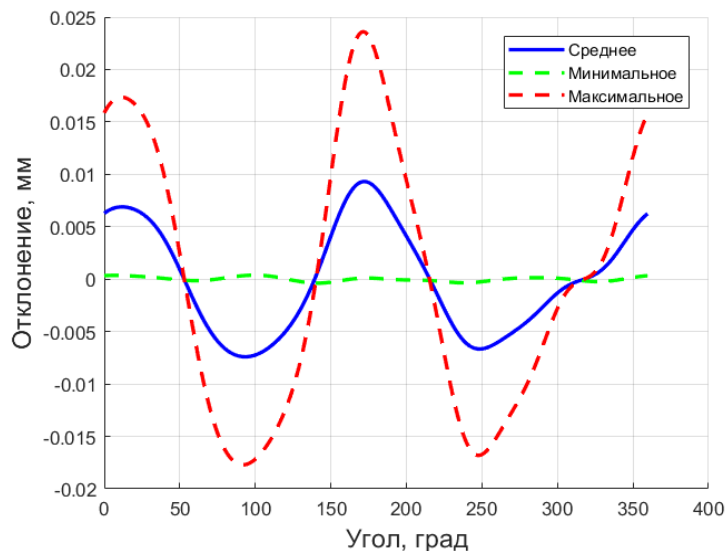


Рисунок 3.9 – Профиль отклонения от плоскостности торца детали «Вал передний»

Отклонение торца вала заднего так же, как и отклонение центрального посадочного отверстия, имеет два максимума и два минимума. Максимальная величина отклонений составила 0,04 мм.

Результаты исследований отклонений формы поверхностей деталей типа «Кольцо»

Измерялись следующие поверхности деталей «Кольцо»: центральное отверстие, отверстия под болты и торцевая плоскость. На рисунках 3.10–3.12 представлены результаты статистического обобщения измеренных отклонений.

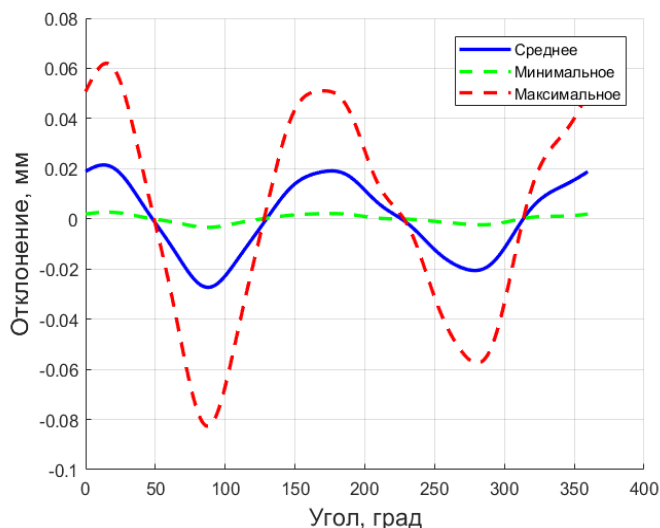


Рисунок 3.10 – Отклонение от круглости центрального отверстия детали «Кольцо»

Отклонение центрального отверстия свидетельствует о погрешности формы типа «овальность». Максимальная величина отклонения составляет 0,12 мм, средняя – 0,04 мм. Значительные величины отклонений объясняются деформациями кольца в незакрепленном состоянии из-за его малой жёсткости. Величины отклонений в сборе, как правило, имеют существенно меньшие значения.

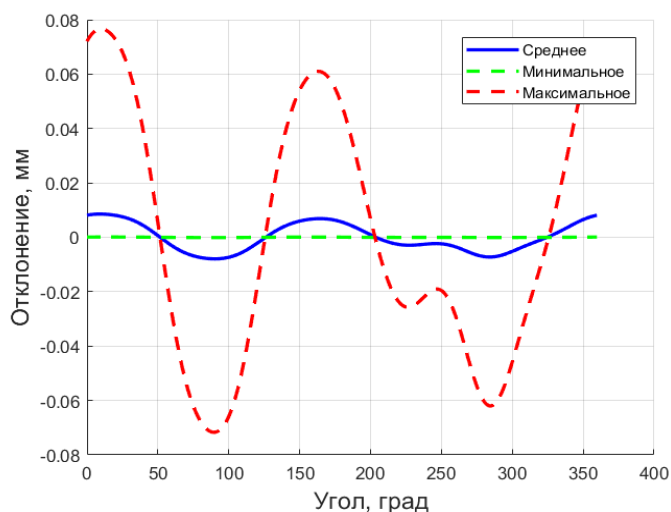


Рисунок 3.11 – Отклонение от круглости малых отверстий детали «Кольцо»

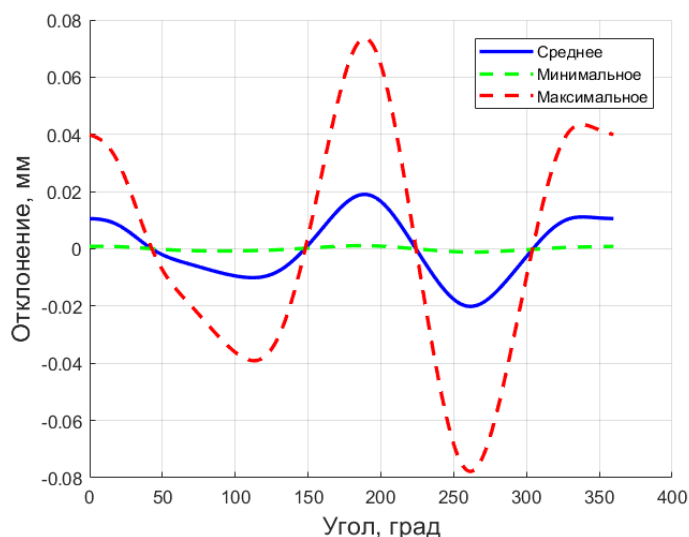


Рисунок 3.12 – Профиль отклонения от плоскостности торца детали «Кольцо»

Величина отклонения формы торца имеет тот же порядок, что и отклонения формы отверстия. Это объясняется тем, что деталь подвержена короблениям в свободном состоянии, что сказывается и на отклонении торцев. При сборке деталей типа «Вал» или «Диск», имеющими большую жёсткость с деталью «Кольцо» они расправляются.

Результаты исследований отклонений формы поверхностей деталей типа «Проставка»

Измерялись центральное посадочное отверстие, отверстия под болты и торцевая плоскость. На рисунках 3.13–3.15 представлены результаты статистической обработки отклонений.

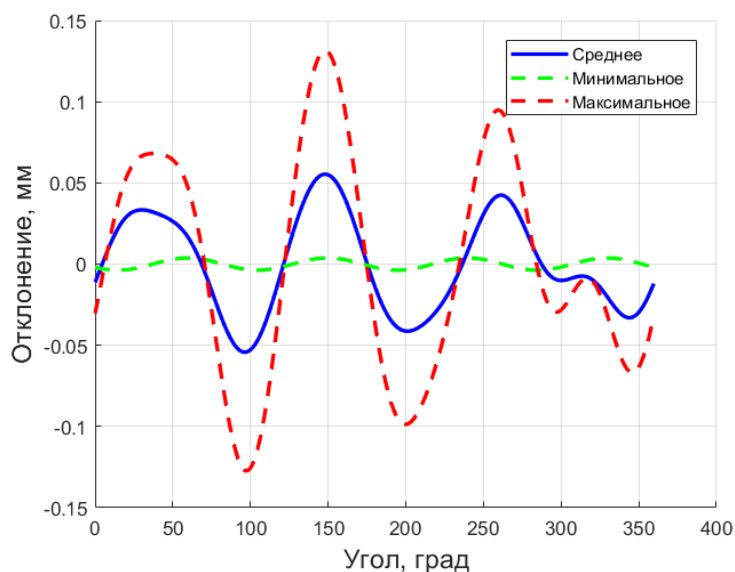


Рисунок 3.13 – Отклонение от круглости посадочного отверстия детали «Проставка»

Отверстие детали «Проставка» имеет высокие средние (0,1 мм) и максимальные (0,25 мм) величины отклонений. Наблюдаются наличие трёх максимумов и трёх минимумов.

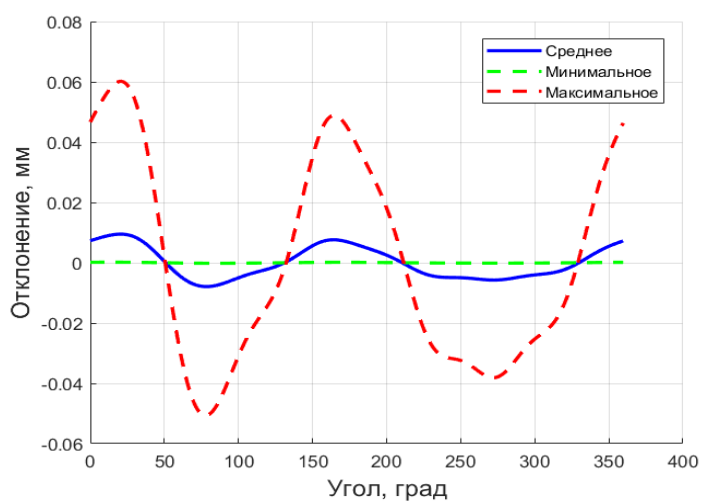


Рисунок 3.14 – Отклонение от круглости малых отверстий детали «Проставка»

Отклонения от круглости отверстий под болты не превышает 0,11 мм и носит характер овальности.

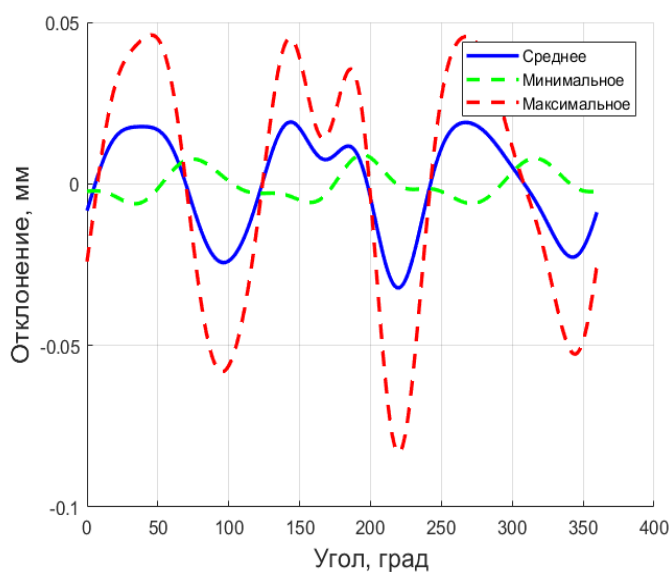


Рисунок 3.15 – Профиль отклонения от плоскостности торца детали «Проставка»

Отклонение торцевой плоскости детали «Проставка» имеет похожий характер, что и отклонение на отверстиях, и достигает в пределе величины 0,13 мм. Средние величины отклонений составили 0,045 мм. Отклонения на торце можно объяснить величиной коробления детали в радиальном направлении.