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

ПЕЧЕНИНА ЕКАТЕРИНА ЮРЬЕВНА

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА СБОРКИ РАБОЧИХ КОЛЁС С АНТИВИБРАЦИОННЫМИ ПОЛКАМИ КОМПРЕССОРОВ АВИАЦИОННЫХ ГТД

2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели
и энергоустановки летательных аппаратов

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Болотов Михаил Александрович,
кандидат технических наук, доцент

Самара – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 5

Глава 1. Анализ проблемы повышения точности сборки рабочих колёс компрессора 11

1.1 Объект исследования 11

1.2 Анализ проблем технологии сборки рабочего колеса 14

1.2.1 Технология сборки рабочего колеса 14

1.2.2 Обзор подходов к решению проблемы расстановки лопаток 20

1.3 Требования к цифровой модели сборки рабочего колеса 22

1.4 Обзор средств измерений деталей рабочего колеса 24

1.4.1 Средства измерений лопаток 25

1.4.2 Средства измерений дисков 28

1.5 Выводы по главе 1. Цель и задачи исследования 30

Глава 2. Разработка методики и модели для повышения точности и снижения трудоёмкости сборки рабочих колёс 32

2.1 Разработка методики сборки рабочих колёс компрессора ГТД с автоматизацией формирования схемы расстановки лопаток 32

2.2 Разработка модели оценки натягов по антивибрационным полкам лопаток 36

2.3 Разработка алгоритма расстановки лопаток в рабочем колесе 41

2.4 Теоретические исследования неравномерностей натягов по антивибрационным полкам 45

2.5 Выводы по главе 2 48

Глава 3. Экспериментальные исследования точности сборки рабочих колёс 50

3.1 Измерения геометрических параметров лопаток и диска 51

3.2 Проведение предварительных сборок рабочих колёс по существующей технологии 54

3.3 Обработка результатов измерений 55

3.3.1 Лопатки и диски 58

3.3.2 Сборочные параметры рабочих колёс 65

3.4 Формирование планов расстановки лопаток по разработанной методике сборки рабочих колёс компрессора ГТД 66

3.5 Обобщение и анализ полученных результатов сборок рабочих колёс 69

3.6 Анализ снижения трудоёмкости сборок рабочих колёс 74

3.7 Выводы по главе 3 76

Глава 4. Реализация разработанных модели и алгоритма в виде программной системы 78

4.1 Разработка программной системы 78

4.2 Описание работы программной системы 84

4.3 Выводы по главе 4 93

Заключение 94

Список сокращений и условных обозначений 96

Список литературы 100

Приложение А. План расстановки лопаток в эксперименте 1 113

Приложение Б. План расстановки лопаток в эксперименте 2 114

Приложение В. План расстановки лопаток в эксперименте 3 115

Приложение Г. План расстановки лопаток в эксперименте 4 116

Приложение Д. Акт внедрения результатов диссертационной работы (АО «ОДК» «НИИД») 117

Приложение Е. Акт о внедрении результатов диссертационного исследования в учебный процесс 118

Приложение Ж. Акт внедрения результатов диссертационной работы («Самарские Турбомоторы») 119

Приложение З. Технологическая инструкция 120

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Важным этапом производства и ремонта газотурбинных двигателей (ГТД) является их сборка. Технологические процессы сборки узлов ГТД оказывают существенное влияние на работоспособность, надёжность и другие эксплуатационные характеристики изделия. Сборка рабочих колёс компрессора ГТД является одной из ключевых операций технологического процесса. Большие сложности возникают при сборке рабочих колёс, лопатки которых имеют антивибрационные полки. Важным сборочным параметром названных рабочих колёс является натяг по антивибрационным полкам лопаток, который должен быть равномерным и соответствовать заданному допуску. Таким образом, точность сборки рабочих колёс можно оценить по среднеквадратическому отклонению (СКО) величин натягов по антивибрационным полкам. Неравномерность, т.е. разброс величин натягов, приводит к повышенным контактным напряжениям по поверхностям антивибрационных полок лопаток в случае увеличенных натягов, что вызывает их ускоренный износ, а в случае уменьшенных натягов – к увеличению вибронагруженности лопаток. В этом случае снижается их ресурс и создаётся опасность отрыва пера от хвостовика. Равномерность натягов в силу недостаточной геометрической точности лопаток обеспечивается путём их комплектации и расстановки в пазах диска. Ужесточение допусков и повышение точности изготовления лопаток может привести к значительным затратам, поэтому экономически целесообразнее улучшить процесс сборки рабочих колёс.

В настоящее время существующая на производстве практика обеспечения требуемой величины натягов заключается в 3-5 предварительных сборках, в каждой из которых специалисты изменяют расстановку лопаток с учётом измерений углов установки профилей, характеризующих возникающие натяги. Наличие предварительных сборок приводит к повышению трудоёмкости процесса и ухудшению геометрии полок и хвостовиков лопаток.

В этой связи перспективным направлением совершенствования сборочного процесса является замена предварительных сборок узлов компьютерным моделированием. Создание достоверной компьютерной модели процесса сборки рабочего колеса позволит оценивать натяги и определять вариант расстановки лопаток, обеспечивающий минимальную неравномерность натягов. Актуальной задачей является разработка методики автоматизированной сборки рабочих колёс компрессора ГТД в условиях использования цифрового производства.

В ходе обзора работ российских и зарубежных авторов по этой теме не было найдено комплексного решения поставленных задач применительно к рабочим колёсам компрессора с лопатками, оснащёнными антивибрационными полками. Изложенное позволяет охарактеризовать тему диссертационной работы: «Совершенствование процесса сборки рабочих колёс с антивибрационными полками компрессоров авиационных ГТД» как насущную и актуальную для двигателестроения.

Степень разработанности темы. Проблемами повышения точности и снижения трудоёмкости технологий сборки изделий занимались: Базров Б.М., Безъязычный В.Ф., Бочкарев П.Ю., Журавлев Д.А., Непомилуев В.В., Семенов А.Н., Слащев Е.С., Сибирский В.В., Чотчаева С.К., Осипович Д.А., Майорова Е.А., Kannan S.M., Shan H.S.и др.

При анализе предшествующих исследований выявлены два основных подхода к комплектации изделий и сборочных единиц. Первый подход основан на использовании пространственных размерных цепей. Второй на так называемом подходе «виртуальная сборка», предполагающим создание цифровых моделей объектов. Информация для создания цифровых моделей деталей и сборок формируется с использованием координатных средств измерений.

Следует отметить, что работы упомянутых выше авторов для рабочих колёс компрессора содержат только методики расстановки лопаток по статическим моментам как единственного критерия порядка их расстановки в диске. Однако, задача, связанная с разработкой методики для проведения точной сборки рабочих

колёс компрессора ГТД с лопатками, оснащёнными антивибрационными полками, является на сегодняшний день не полностью решённой.

Цель диссертационной работы. Повышение точности и снижение трудоёмкости сборки рабочих колёс компрессоров ГТД за счёт разработки модели оценки натягов по антивибрационным полкам лопаток, алгоритма расстановки лопаток и методики сборки с автоматизацией формирования схемы расстановки лопаток.

Задачи исследования.

1. Создание модели оценки натягов по антивибрационным полкам лопаток при их сборке в рабочем колесе, в которой используются отклонения геометрических параметров лопаток, пазов диска и учитывается влияние соседних лопаток.

2. Разработка алгоритма расстановки лопаток в рабочем колесе, направленного на минимизацию рассеивания величин натягов между лопатками, в котором в качестве критерия используются отклонения натягов по антивибрационной полке со стороны корыта и со стороны спинки от конструкторских значений.

3. Разработка методики сборки рабочих колёс компрессора ГТД с автоматизацией формирования схемы расстановки лопаток, позволяющей добиться снижения количества предварительных сборок.

4. Проведение теоретико-экспериментальных исследований погрешностей сборки рабочего колеса с использованием разработанных модели оценки натягов, алгоритма расстановки лопаток и методики сборки рабочих колёс.

5. Реализация в виде программной системы модели оценки натягов и алгоритма расстановки лопаток в рабочем колесе для использования в цеховых условиях.

Научная новизна.

1. Математическая модель оценки натягов лопаток по антивибрационным полкам при их сборке в рабочем колесе, отличающаяся от известных решений использованием данных по отклонениям геометрических параметров лопаток, пазов диска и учитывающая влияние соседних лопаток.

2. Алгоритм расстановки лопаток в рабочем колесе, позволяющий минимизировать рассеивание величин натягов между лопатками, учитывающий

отклонения натягов по антивибрационной полке со стороны корыта и со стороны спинки от конструкторских значений.

3. Методика сборки рабочих колёс компрессора ГТД с автоматизацией формирования схемы расстановки лопаток в условиях использования цифрового производства, позволяющая снизить количество предварительных сборок, отличающаяся тем, что при расстановке лопаток используются отклонения геометрических параметров лопаток, пазов диска, обобщённые в виде математической модели.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке методики сборки рабочих колёс компрессора ГТД, модели оценки натягов по антивибрационным полкам лопаток при их сборке в рабочем колесе, алгоритме расстановки лопаток в рабочем колесе.

Практическая значимость результатов работы заключается в реализации разработанных модели и алгоритма в программной системе, которая позволяет повысить точность и уменьшить трудоёмкость сборки рабочих колёс ГТД.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов. Диссертация соответствует пункту 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. Работа направлена на совершенствование технологического процесса сборки рабочих колёс компрессора ГТД за счёт использования геометрических отклонений лопаток и пазов диска для автоматизации формирования плана расстановки лопаток в рабочем колесе на основе расчёта комплексных параметров – отклонения натяга со стороны спинки и со стороны корыта, характеризующих натяг. Предложена методика, включающая модель и алгоритм, реализованная в виде программной системы, позволяющей автоматизировано формировать план наилучшего варианта расстановки лопаток в рабочем колесе на основе использования измеренных

геометрических параметров деталей. Теоретические и практические результаты работы могут быть использованы в цеховых условиях для сборки рабочих колёс компрессора ГТД с целью сокращения количества предварительных сборок и снижения неравномерности натягов по антивибрационным полкам лопаток. Полученные практические результаты позволяют повысить точность и снизить трудоёмкость технологического процесса сборки рабочих колёс компрессора ГТД.

Методы и средства исследований.

В работе использовались теоретический и экспериментальный методы исследования. Теоретические исследования выполнялись с применением аппарата аналитической геометрии, матричных вычислений, теории алгоритмов и математического моделирования. Эксперименты проводились на рабочих колёсах компрессора среднего давления при их ремонте.

Объект исследований. Технологический процесс сборки рабочего колеса компрессора среднего давления ГТД.

Предмет исследований. Условия и параметры расстановки лопаток с антивибрационными полками в рабочем колесе при его сборке.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Методика сборки рабочих колёс компрессора ГТД с автоматизацией формирования схемы расстановки лопаток.

2. Модель оценки натягов по антивибрационным полкам лопаток при их сборке в рабочем колесе, реализованная в программной системе.

3. Алгоритм расстановки лопаток в рабочих колёсах, реализованный в программной системе.

Достоверность результатов обеспечивается обоснованностью принятых допущений в математических моделях; применением известных и проверенных численных методов, обладающих высокой точностью при проведении вычислительных экспериментов; использованием в процессе исследований поверенных средств измерений и сертифицированного программного обеспечения.

Апробация работы. Основные результаты диссертации были представлены на всероссийских и международных конференциях, а именно: VI Международная

конференция и молодёжная школа ИТНТ-2020, г. Самара, Самарский университет, 26-29 мая 2020 г.; III Международная конференция ICMSIT-III 2022 г.: Метрологическое обеспечение инновационных технологий, г. Санкт-Петербург, 3-5 марта 2022 г.; VIII Всероссийская научно-техническая конференция для молодых учёных и студентов с международным участием, г. Пенза, 17-18 марта 2022 г.; VI Всероссийская научно-практическая конференции с международным участием «Исследование и проектирование интеллектуальных систем в автомобилестроении, авиастроении и машиностроении» («ISMCA' 2022»), г. Таганрог, 15 апреля 2022 г.

Реализация результатов работы. Исследование выполнено при финансовой поддержке ИИФ СО в рамках научного проекта по договору № 1/3-АКД/2021 от 23.12.2021 г. Результаты работы внедрены на предприятии ООО «Самарские турбомоторы» (акт внедрения от 20.04.2023 г.) в виде технологической инструкции и использовались для улучшения технологического процесса сборки рабочих колёс компрессоров ГТД в филиале АО «ОДК» «НИИД» (Научно-исследовательский институт технологии и организации производства двигателей) (акт внедрения от 15.06.2023 г.). Материалы диссертационной работы нашли применение в учебном процессе Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева (акт внедрения от 13.04.2023 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, в том числе 3 статьи в периодических изданиях, включённых в перечень ВАК России, и 1 статья в издании, индексируемом в базе данных Scopus.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы. Общий объём диссертации составляет 147 страниц, 47 рисунков, 14 таблиц и 8 приложений. Библиографический список включает 101 наименование.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ СБОРКИ РАБОЧИХ КОЛЁС КОМПРЕССОРА

1.1 Объект исследования

Газотурбинный двигатель является одной из сложнейших конструкций, созданных человеком [1]. Производство двигателя представляет собой трудоёмкий, дорогостоящий и ответственный процесс, который включает в себя: изготовление, сборку, испытания и контроль качества деталей и сборочных единиц. Каждый этап производства двигателя требует особого внимания.

Одним из основных и наиболее ответственных этапов является сборка как всего двигателя в целом, так и отдельных сборочных единиц. Сборка ротора компрессора – важный технологический процесс производства двигателей, поскольку именно он влияет на уровень вибраций двигателя. К сборке ротора компрессора предъявляются высокие требования по качеству, которое определяется совокупностью различных параметров, таких как:

– технологические (величина деформации и уровень напряжения деталей в результате сборки, усилия при запрессовке деталей и др.);

– кинематические (плавность работы и лёгкость перемещения, величина хода, кинематическая точность);

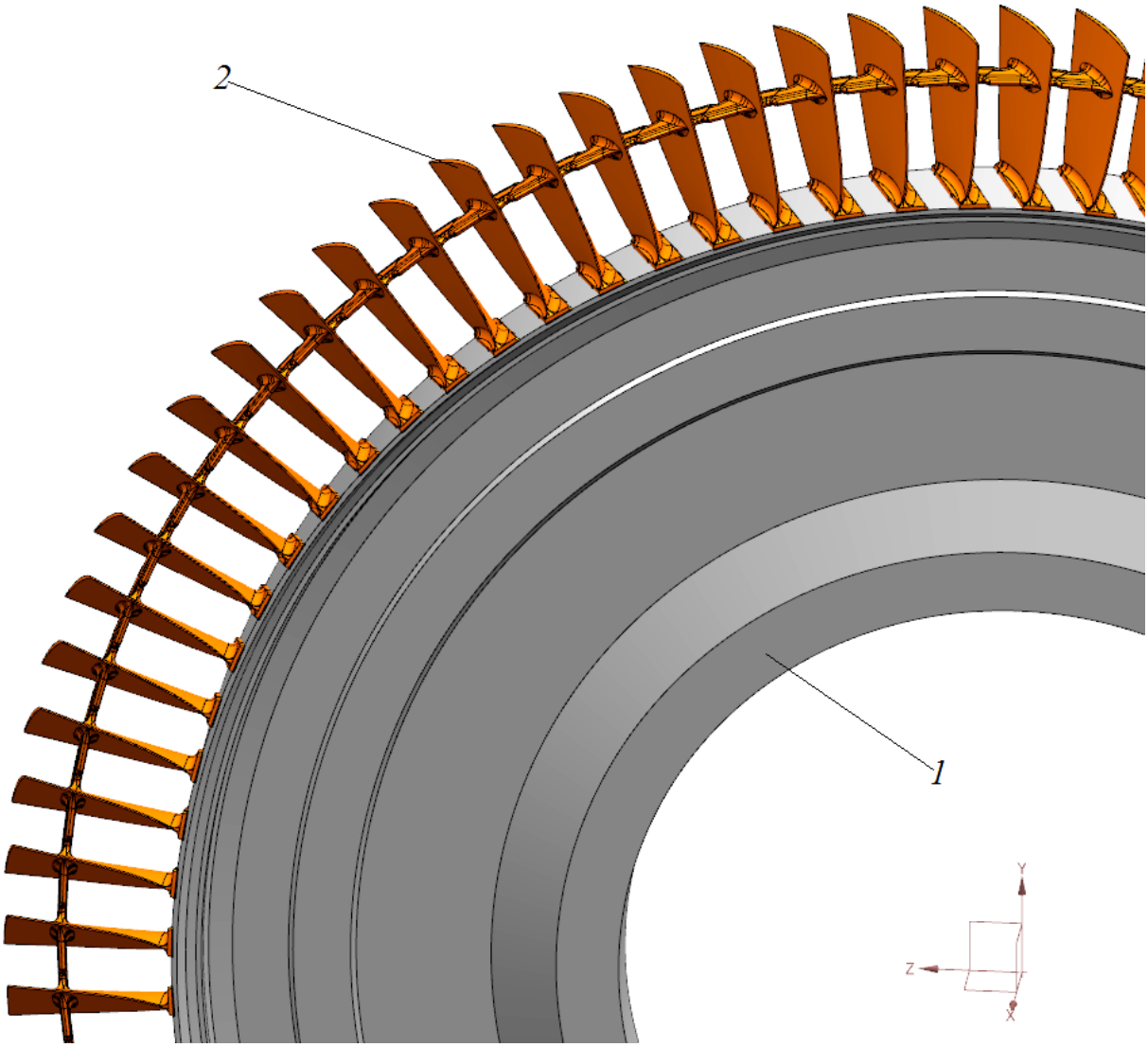
– геометрические (зазоры, натяги, отклонения размеров, формы, расположения сопрягаемых в процессе сборки элементов) [2, 3];

– условия сборочного процесса;

– эксплуатационные (величина вибраций роторов) [4].

Качество сборки ротора компрессора во многом определяет его долговечность и надёжность [5, 6].

В диссертации рассматривается рабочее колесо компрессора среднего давления ГТД. На рисунке 1.1 приведена конструкторская модель рассматриваемого рабочего колеса в сборке.



1 – диск; 2 – рабочая лопатка

Рисунок 1.1 – Конструкторская модель рабочего колеса компрессора

Рассматриваемые лопатки имеют антивибрационные полки, по которым они стыкуются между собой [7]. Срок эксплуатации компрессоров, в которые входят рассматриваемые рабочие колёса, составляет порядка 1000-2000 часов в двигателе летательного аппарата и 5000-10000 часов при использовании двигателя в качестве наземной энергетической установки [8], после чего рабочие колёса проходят ремонт. Требования к качеству сборочных параметров рассматриваемых рабочих колёс предусматривают в первую очередь обеспечение равномерности натяга [9] по антивибрационным полкам. Иначе из-за недостаточного или излишнего напряжения между лопатками, а также его неравномерности лопатка становится излишне вибронагруженной, начинает колебаться и разрушается [10,

11], обломки лопаток в процессе работы двигателя разрушают остальные лопатки диска, а кроме того, и лопатки нескольких дисков за ним.

На рисунке 1.2 приведено рассматриваемое рабочее колесо после разрушения рабочих лопаток в процессе испытаний.

Рисунок 1.2 – Бракованное после испытаний рабочее колесо со сломанными лопатками

В отличие от сборочных работ [12], ремонтные требуют более высокой квалификации слесарей-ремонтников, поскольку при ремонте в цехе используется универсальное оборудование и оснастка [13]. Кроме того, при ремонтных работах используются как восстановленные при ремонте детали или сборочные единицы, так и новые, требующие приработки.

Далее рассмотрим проблемы, сопутствующие сборочному процессу рабочего колёса компрессора.

1.2 Анализ проблем технологии сборки рабочего колеса

В данном разделе рассматриваются существующая на производстве технология сборки рабочего колеса компрессора среднего давления ГТД, лопатки которого имеют антивибрационные полки. Технология сборки представлена в виде блок-схемы с подробным описанием каждого этапа сборки рабочего колеса компрессора. Приведено описание существующих подходов к расстановке лопаток. Далее рассмотрены проблемы, возникающие при использовании существующей технологии.

1.2.1 Технология сборки рабочего колеса

Этапы технологии сборки рабочего колеса компрессора среднего давления приведены на рисунке 1.3. Рабочее колесо компрессора содержит 84 лопатки. Рассмотрим подробнее технологию сборки рабочего колеса.

Каждая из деталей сборки на первоначальных этапах подготавливается отдельно, в частности, все лопатки и диски проверяют визуальным осмотром на отсутствие забоин, трещин [14], воловин и других механических повреждений [15]. В этот момент происходит маркировка диска, на нем указывают номер и местонахождение входной и выходной части.

Также для диска, полученного из цеха механической обработки, производится контроль геометрических параметров диска [16]. К таким параметрам относятся ширина пазов, расстояние до опорной поверхности, углы наклона и плоскость пазов к осям координат.

На первом этапе технологии выполняется подготовка комплекта рабочих лопаток, который в свою очередь состоит из пяти подэтапов.

На первом подэтапе производится обработка лопаток, которая заключается в наплавке пластин на торцы антивибрационных полок каждой из лопаток, а также в шлифовке.

На втором подэтапе проводится контроль толщин антивибрационных полок со стороны спинки и корыта.

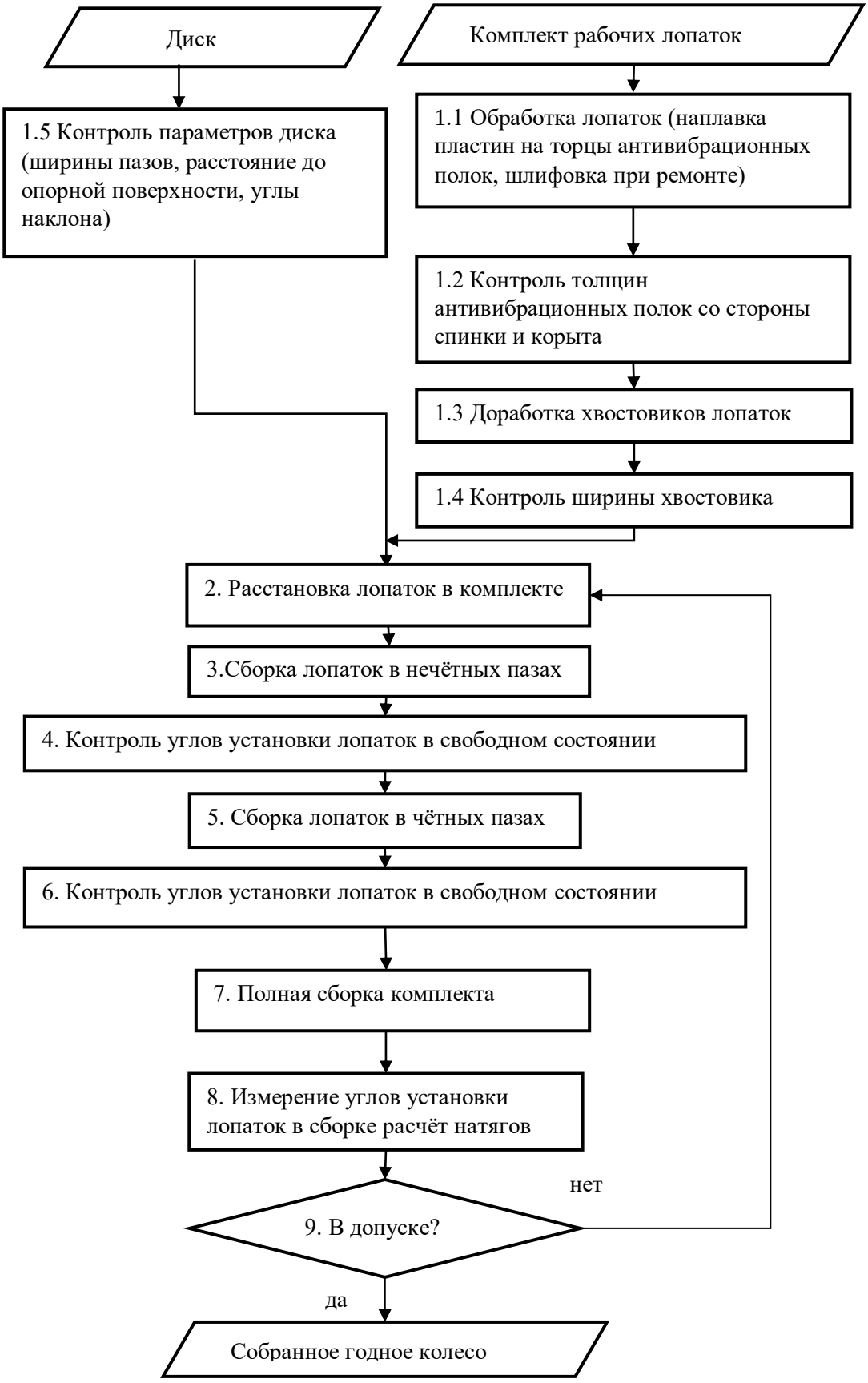


Рисунок 1.3 – Блок-схема этапов сборки РК

На третьем подэтапе производится доработка хвостовиков лопаток (фрезеруют основание хвостовика лопаток после слесарной обработки, зачистки подошвы замка и промывки). После окончательной механической обработки хвостовика лопатки производится серебрение замка. Это необходимо для низкого контактного сопротивления, что улучшает условия сборки и защищает поверхности от появления надиров и прочих механических повреждений [16].

На четвёртом подэтапе осуществляется контроль ширины хвостовика каждой лопатки из комплекта. Пятый подэтап предусматривает контроль параметров диска.

На втором этапе производят сборку и контроль лопаток в свободном состоянии. Лопатки раскладывают в специальную тару, которая разделена на пронумерованные ячейки. Каждая лопатка помещается в отдельную ячейку, номер которой совпадает с номером паза, как показано на рисунке 1.4.

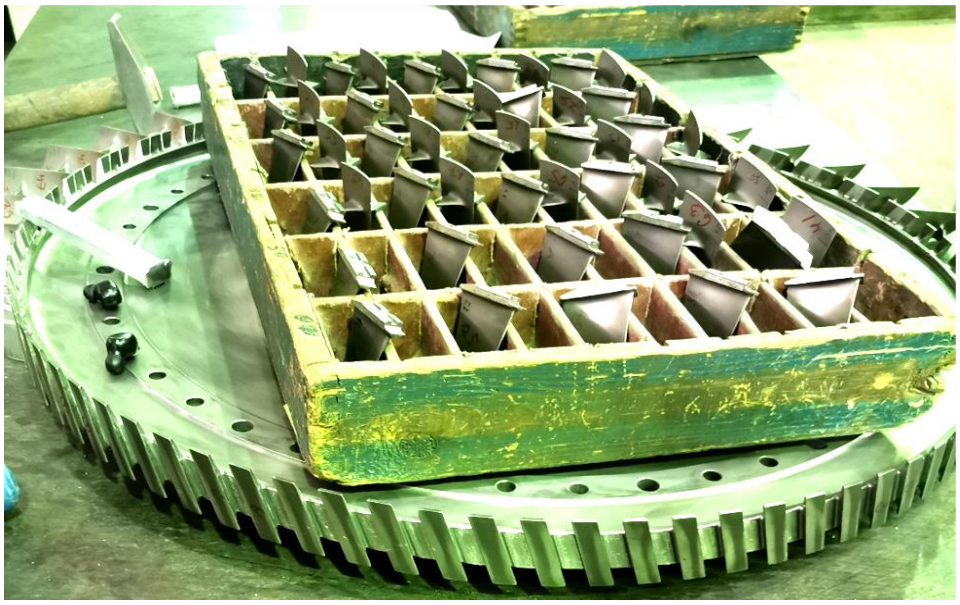


Рисунок 1.4 – Расстановка лопаток

На третьем этапе последовательно устанавливают лопатки с нечётными номерами в пазы диска, начиная с первого паза. Слесарем-сборщиком для установки лопаток используется алюминиевый стержень и молоток. В соединении хвостовика и паза обеспечивается натяг. В результате получается расстановка через одну лопатку.

После чего следует четвёртый этап – контроль углов установки лопаток в свободном состоянии. С помощью специального прибора – оптического угломера – производят замеры углов каждой лопатки в сечении выше расположения антивибрационной полки. Метрологом наносятся риски непосредственно перед контролем углов на регламентируемом расстоянии от центра диска (рисунок 1.5).

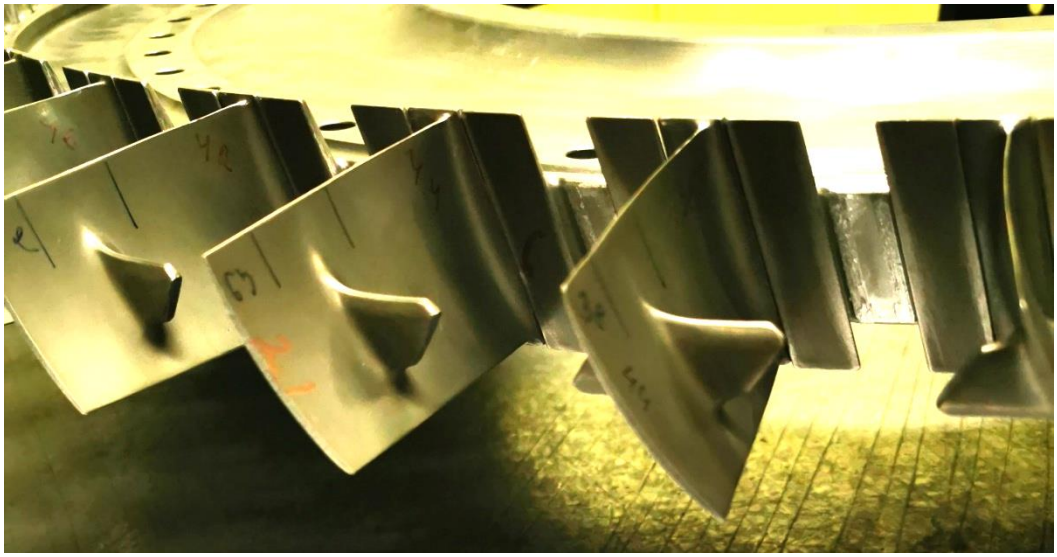


Рисунок 1.5 – Разметка лопаток для контроля углов

На рисунке 1.6 продемонстрирован процесс контроля углов установки лопаток. Значения углов записываются вручную в протокол контроля.

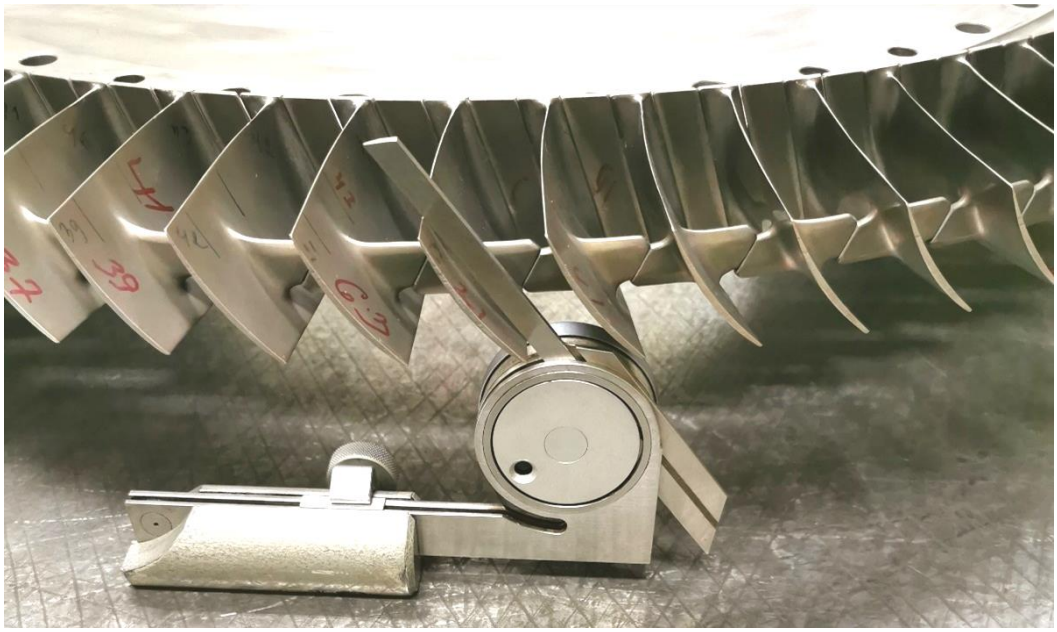


Рисунок 1.6 – Контроль углов установки лопаток

Погрешность измерения углов оптическим угломером оценивается в 5 угловых минут. Следует отметить, что погрешность сильно зависит от квалификации оператора и может превышать 10 угловых минут.

На пятом этапе осуществляется сборка лопаток в чётных пазах. Лопатки из нечётных пазов извлекаются и возвращаются на свои места в ячейки. А лопатки, предназначенные для чётных пазов, устанавливаются в пазы диска (рисунок 1.7).

Затем на шестом этапе снова осуществляется этап контроля углов установки лопаток в свободном состоянии, аналогичным образом, как для сборки лопаток в нечётных пазах.

Рисунок 1.7 – Сборка лопаток в чётных пазах

Седьмым этапом является полная сборка комплекта, носящая название «предварительная сборка», так как таких сборок делают несколько для одного комплекта. На этом этапе все лопатки комплекта располагают в пазах, затем постепенно и последовательно слесарь загоняет их в пазы. В процессе установки лопаток они меняют свой первоначальный угол установки. В связи с этим на восьмом этапе проводится измерение углов установки лопаток. В собранном состоянии измерения производятся аналогичным образом, как и для лопаток в свободном состоянии. Вычитая из углов установки в собранном состоянии углы установки в свободном состоянии, вычисляют отклонения углов установки $\gamma_{b_н}$,

характеризующие натяг. Допуском на отклонение угла является диапазон от +1° до +2°40′.

На девятом этапе осуществляется проверка годности сборки. В случае если полученные значения с этапа измерений отклонений углов установки лопаток в сборке попадают в допуск и удовлетворяют требованиям, предъявляемым к контролю данного типа деталей, то собранное рабочее колесо считается годным изделием. Если же значения не попадают в допуск, то следует вернуться к этапу расстановки лопаток в комплекте и проделать последующие этапы заново. Главными условиями являются значения отклонений $\gamma_{b_\text{н}}$ выше заданного нижнего предела, а также равномерность значений натягов в плюсе. Если в процессе переборок требуемые условия не достигаются, лопатки отправляют на доработку или меняют комплект лопаток.

В производстве раскладка лопаток по статистическим моментам выполняется для рабочих колёс 1-3 ступеней компрессора низкого давления. Рассеивание масс лопаток указанных ступеней компрессора оказывает существенное влияние на формируемый дисбаланс рабочих колёс. Технология серийного производства и ремонта рассматриваемого рабочего колеса не предусматривает раскладку лопаток по статистическим моментам, поскольку их сравнительно малая масса (44 грамма) оказывает несущественное влияние на формируемый дисбаланс рабочего колеса. Возникающие дисбалансы компенсируются статистической балансировкой, проводимой в динамическом режиме на вертикальном балансировочном станке. После сборки рабочего колеса устанавливается груз, компенсирующий дисбаланс.

Недостатками существующей технологии сборки являются:

– наличие нескольких предварительных сборок [17], которые влекут за собой высокую трудоёмкость процесса и изнашивание сопрягаемых поверхностей лопаток и диска, пазов, хвостовика и рабочих торцов антивибрационных полок;

– зачастую после достижения наилучшего результата остаются слишком высокие величины натягов и их неравномерность, что может вызывать обрыв лопаток в процессе работы двигателя.

Для улучшения существующего технологического процесса сборки рабочего колеса и устранения перечисленных выше недостатков необходимо создание специальной методики с возможностью автоматизации определения наилучшего варианта расстановки лопаток в рабочем колесе.

Одной из значимых проблем является определение наилучшего варианта расстановки лопаток в рабочем колесе при заданных временных, вычислительных и других ограничениях [18, 19].

1.2.2 Обзор подходов к решению проблемы расстановки лопаток

В ходе обзора проблемы расстановки лопаток в рабочем колесе были выявлены разные подходы, включающие в себя разработку методов, алгоритмов, методик и способов.

Исключение риска получения негодных изделий и обеспечение качества сборки в целом осуществляется методами достижения требуемой точности сборочного параметра, такими как метод взаимозаменяемости (полная, неполная и групповая) и метод компенсации (пригонка, регулирование, попарный и индивидуальный подбор [20, 21]). В свою очередь, каждый из перечисленных методов имеет значительные преимущества и недостатки. Например, недостатками методов регулирования и пригонки является высокая трудоёмкость и наличие высокой квалификации у рабочего.

В серийных производствах часто применяют методы расстановки лопаток, основанные на одном или более параметрах их отклонений. Когда отклонений несколько, то используют комбинацию данных отклонений, получая комплексный параметр [22]. Лопатки сортируют по выбранному критерию и расставляют в соответствии с ним.

В одной из рассматриваемых работ (патент РФ №2319841, F01D 5/02, 2003 [23]) приведён способ расстановки лопаток ротора, основанный на сортировке лопаток по их статическим моментам. В данном способе предлагается сначала измерить радиальные и тангенциальные статические моменты лопаток и

образовать из них пары в зависимости от значений статических моментов [24, 25]. Затем устанавливать поочерёдно лопатки по парам на ротор с диаметрально противоположным расположением пары лопаток.

Лопатки сортируются по различным критериям, как в роторах, так и в статорах.

В работе других авторов (а.с. СССР №906202, F01D 9/04, F04D 29/60, 1980 [26]) приводится способ сборки, по которому требуется сначала установить лопатки, и только после этого измерить угол их установки. Результаты измерения используют для перестановки лопаток, при которой величина разницы углов установки соседних лопаток стремится к минимально возможному значению.

Авторами способа [27] предлагается расстановка лопаток в сопловом аппарате по результатам измерений площадей горла решётки, причём измерение площади осуществляется для каждой лопатки со стороны корыта и со стороны спинки. Измеренные площади горла решётки сортируют по возрастанию или по убыванию, создавая ряды с максимальной или минимальной площадью горла решётки. Из отсортированных рядов лопатки устанавливают в корпус, учитывая изменения направления обхода.

Далее рассмотрим данный способ более подробно. Его реализация начинается с того, что для лопаток, принятых эталонными, рассчитывается площадь горла решётки $F_{\text{эталон}}$. В свою очередь данная площадь включает в себя площадь $f_{\text{кор эталон}}$ между корытом лопатки и плоскостью радиального клина и площадь $f_{\text{сп эталон}}$ между спинкой лопатки и плоскостью радиального клина.

Перед установкой лопаток в корпус для каждой измеряется площадь $f_{\text{кор}\,i}$ со стороны корыта и площадь $f_{\text{сп}\,i}$ со стороны спинки лопатки. Затем значения этих площадей сортируются по возрастанию или убыванию и формируются упорядоченные по площади ряды.

Затем из отсортированных рядов выбирают лопатку с максимальным или минимальным значением площади и устанавливают в корпус. Далее из ряда

определяется следующая лопатка и устанавливается в корпус рядом с предыдущей лопаткой, после этого направление обхода изменяется на противоположное. Таким образом устанавливаются все лопатки в корпус.

Сортировка и расстановка лопаток может осуществляться как по площади $f_{\text{кор}\,i}$ со стороны корыта, так и по площади $f_{\text{сп}\,i}$ со стороны спинки лопатки. Соответственно, первая устанавливаемая лопатка может быть с минимальной или максимальной величиной площади.

При проведении анализа публикаций не было выявлено метода среди уже существующих, который подходил бы для исследуемого в данной диссертации процесса сборки рабочего колеса, когда ключевую роль играет обеспечение равномерности натягов. Решать задачу по расстановке лопаток предполагается методом индивидуального подбора [28].

Метод индивидуального подбора позволяет осуществлять сборку не из случайных деталей, а из специально подобранных, что существенно снижает процент негодных изделий, поэтому данный метод является наиболее актуальным [29]. Метод предполагает использование компьютерных вычислений [30, 31] для снижения трудоёмкости процесса. Компьютерные расчёты основаны на создании адекватных цифровых моделей сборок [32], которые будут рассмотрены в следующем разделе.

1.3 Требования к цифровой модели сборки рабочего колеса

Достижение опимальной расстановки лопаток в рабочем колесе предполагает создание соответствующего алгоритма формирования плана расстановки и достоверной модели оценки параметров натягов между лопатками. Подобная модель будет описана математически, затем реализована в виде программных алгоритмов, в частности, будет использована в алгоритме расстановки лопаток.

В решение проблемы по обеспечению заданной точности в процессе сборки многозвенных размерных цепей внесли значимый вклад как российские, так и

зарубежные учёные: Базров Б.М. [33, 34], Безъязычный В.Ф. [35–37], Бочкарев П.Ю. [38, 39], Журавлев Д.А. [40, 41], Непомилуев В.В. [42, 43], Семенов А.Н. [44, 45], Слащева Е.С. [46], Сибирский В.В. [47], Чотчаева С.К. [48–49], Kannan S.M. [50-52], Shan H.S. [53] и др.

На сегодняшний день существует два основных подхода в комплектации рабочих колёс. Первый подход основан на пространственных размерных цепях [54]. Второй – на основе так называемого метода «виртуальная сборка» [37].

В первом подходе существует два основных метода моделирования, основанных на получении допусков на размеры деталей: «Статистическое суммирование» и «Наихудший случай». Метод моделирования «Статистическое суммирование» в свою очередь, основан на методе Монте-Карло [55] и позволяет при сборке обеспечивать допуск в заданном интервале [56, 57]. Метод «Наихудший случай» предполагает проведение сборочного процесса на граничных пределах полей допусков [58, 59] размерных цепей, составляющих сборку, и, таким образом, в случае достижения требуемого результата в граничных случаях внутри границ сборочный процесс будет заведомо удачным [60].

Сборка цифровых моделей является так называемой виртуальной сборкой. Согласно работе [29], результатом виртуальной сборки на компьютере является виртуальное изделие, а именно цифровая математическая модель (или набор математических моделей) собранного изделия. Данная математическая модель учитывает все существенные свойства и процессы, характерные для конкретного экземпляра какого-либо реального изделия. В подходе «Виртуальная сборка» сборочные параметры собираемого изделия или узла зависят от адекватности входящих в сборку цифровых математических моделей и моделирования процессов, протекающих при сборке [61]. Адекватность цифровых моделей напрямую зависит от достоверности данных, по которым модели создаются [62].

Существенным преимуществом виртуальной сборки перед традиционным подходом к сборке является возможность перебора множества вариантов комплектации изделий на компьютере, что существенно сокращает этап сборки, традиционно включающий в себя проведение нескольких предварительных сборок до достижения требуемого результата.

Входными параметрами рассмотренных выше и разрабатываемой в исследовании моделей являются данные измерений, получаемых, как правило, с контрольных операций [63, 64, 65]. В настоящее время в производстве рабочих колёс компрессоров измеренные данные получают либо при использовании контрольно-измерительных приспособлений (КИП) [65], либо при использовании координатных средств контроля (координатно-измерительные машины (КИМ), оптические сканеры) [8]. В следующем разделе рассмотрим погрешности этих средств измерений.

1.4 Обзор средств измерений деталей рабочего колеса

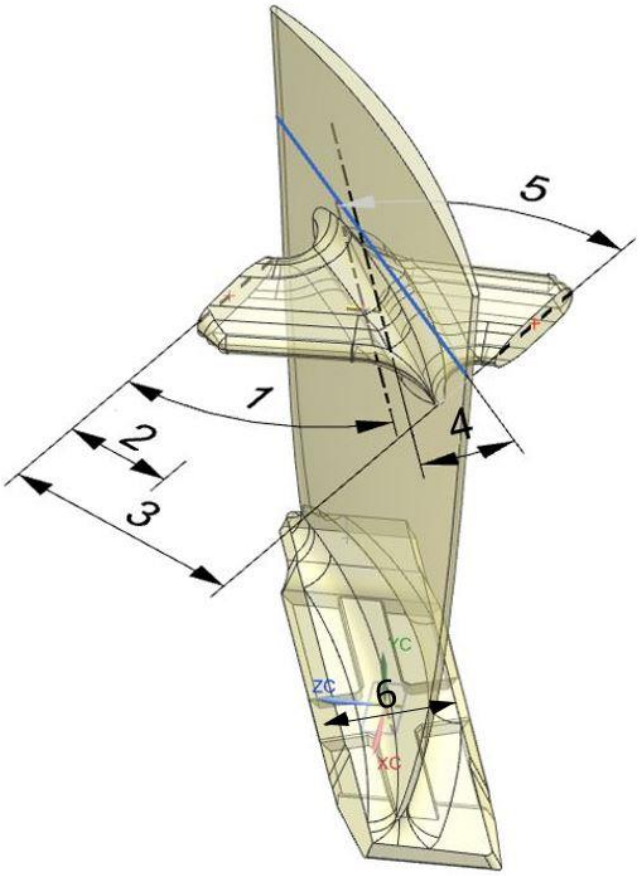
Погрешности измерений средств контроля лопаток и дисков напрямую влияют на адекватность разрабатываемой модели оценки натягов и эффективность результатов работы алгоритма расстановки лопаток.

Измерения лопаток и дисков на предприятиях осуществляются как контактным, так и бесконтактным методами. В свою очередь, методы и средства измерений должны пройти сертификацию в рамках существующей системы качества [66] на предприятиях двигателестроительной отрасли. Параметры методов и средств измерений, которые обеспечивают требуемое качество, контролируются и регистрируются в процессе производства [67].

Рассмотрим по отдельности средства контроля лопаток и дисков в практике производства и погрешности, присущие данным средствам измерений.

1.4.1 Средства измерений лопаток

Контролируемые геометрические параметры рассматриваемой рабочей лопатки приведены на рисунке 1.8, ими являются: а) фактические значения стыковых размеров по рабочим торцам антивибрационных полок [68] лопаток l_{sp}; б) расстояние от центра до рабочего торца со стороны корыта l_p; в) фактические значения угла касательной к профилю в контрольных сечениях лопаток в свободном состоянии γ_b (угол установки); г) ширина хвостовика w_l.



$1 - \varphi_p$, $2 - l_p$, $3 - l_{sp}$, $4 - \gamma_b$, $5 - \varphi_s$; $6 - w_l$

Рисунок 1.8 – Контролируемые параметры лопатки

Кроме того, контролируют непараллельность торцов полок, характеризующуюся углами их профилей – φ_p со стороны корыта и φ_s со стороны спинки в сечении относительно оси симметрии хвостовика.

К существующим средствам и методам измерений лопаток можно отнести следующие: прибор типа ПОМКЛ-4, координатно-измерительные машины [69, 70, 71, 72], оптический метод измерения [73], лазерный метод и контрольно-измерительные приспособления [74, 75]. Важно также учитывать, что перечисленные методы и средства измерений имеют разные погрешности и трудоёмкости измерений, что продемонстрировано в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Сводные характеристики оборудования

№	Наименование оборудования	Погрешность измерений	Трудоёмкость измерения лопатки, мин
1	Прибор типа ПОМКЛ-4, мм	0,02-0,06	0,2-8
2	Координатно-измерительные машины, мм	0,002-0,02	20-150
3	Оптический сканер, мм	0,01-0,1	3-160
4	Лазерный сканер, мм	0,005-0,05	0,2-5
5	КИП (прибор для контроля стыкового размера, прибор для контроля ширины замка ласточкин хвост), мм	0,02-0,05	1-3
6	Оптический угломер (контроль угла установки профиля), мин	5-10	0,5-0,8

Прибор типа ПОМКЛ-4 обладает перед другими приборами рядом преимуществ: невысокая цена, относительная простота в эксплуатации, неприхотливость к цеховым условиям. Но, в свою очередь, у него имеются следующие недостатки: наладка приспособления происходит под конкретный вид

эталонных лопаток, что увеличивает номенклатуру [76], субъективность получаемых результатов измерения.

Преимуществами координатно-измерительных машин являются: универсальность [77], низкая погрешность измерений [78], обработка и хранение результатов измерений на компьютере [79, 80], высокая степень автоматизации. Недостатками являются: высокая стоимость эксплуатации и ремонта, сложность [81], высокие требования к квалификации специалиста-метролога, невозможность использования в цеховых условиях [82].

Оптические сканеры имеют такие же преимущества, как и КИМ [83], но выигрывают в производительности измерений. К недостаткам можно отнести: высокую стоимость программного обеспечения, высокие требования к квалификации сотрудника, зависимость результатов от оптических свойств среды и физических свойств измеряемой поверхности [84].

Сканеры, основанные на использовании лазерного метода, имеют те же преимущества и недостатки, что и оптические сканеры [85]. Как правило, их точность измерения ниже, чем у оптических сканеров.

К контрольно-измерительным приспособлениям, используемым для контроля качества лопаток с антивибрационной полкой, относятся: прибор для контроля ширины замка типа «ласточкин хвост» и прибор для контроля стыкового размера.

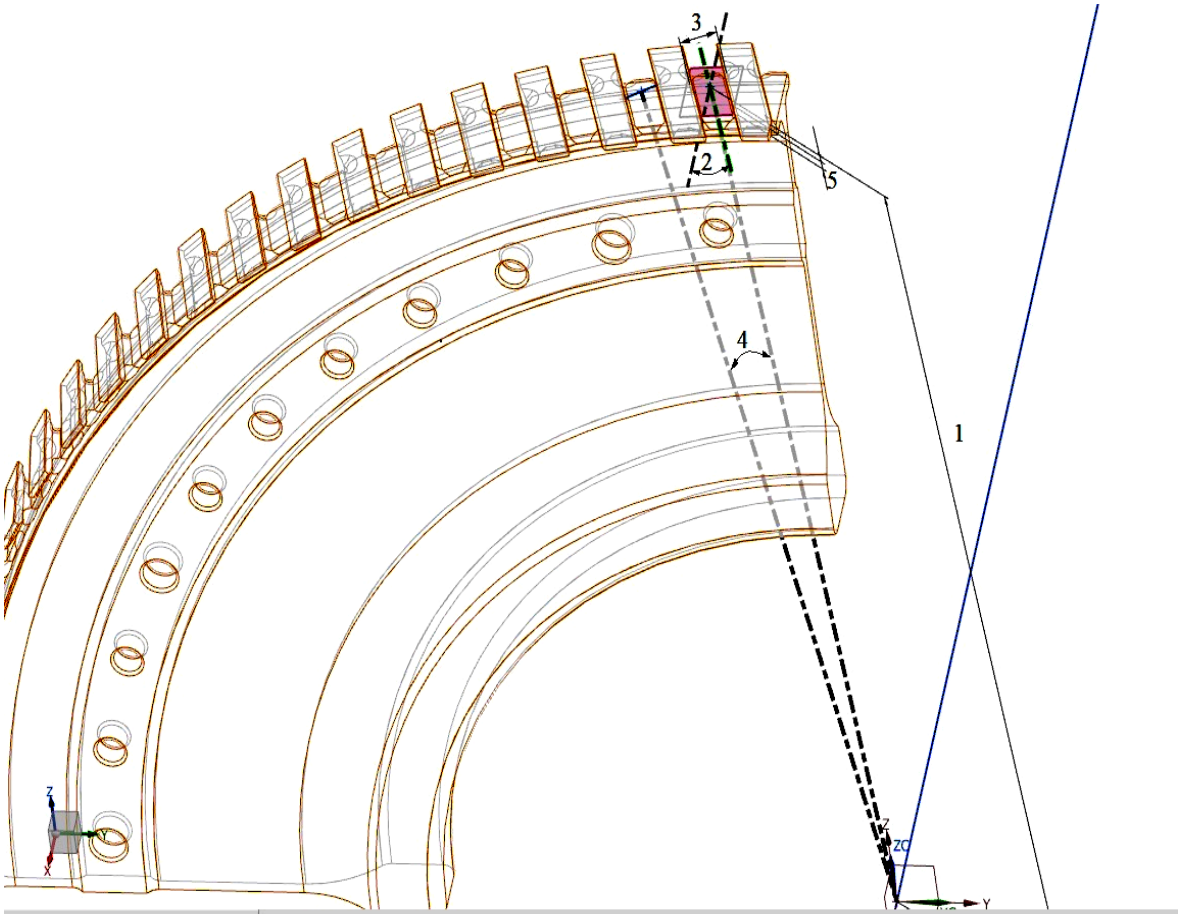
ПОМКЛ-4 позволяет контролировать отклонение профиля пера, но не позволяет контролировать антивибрационные полки и потому не подходит для использования в исследовании. В исследовании для получения параметров лопаток, приведённых в начале раздела, используется КИМ и КИП.

Достоинством КИП, используемых в технологическом процессе, является скорость проведения контрольных операций [86]. Существенными недостатками же являются: влияние человеческого фактора, трудоёмкость содержания оснастки и необходимость держать эталоны. При этом человеческий фактор проявляется и на стадии настройки приборов, и на стадии непосредственно измерения (установка лопатки и снятие размеров), и на стадии записи результатов, которые

вручную заносятся в бланки. Таким образом, результаты контрольных операций на КИП зачастую требуют перепроверки для их дальнейшего использования при расстановке лопаток.

1.4.2 Средства измерений дисков

Контроль дисков сводится к контролю линейных и угловых размеров их пазов, а также отклонения расположения пазов относительно оси диска (рисунок 1.9).



$1 - M_1$, $2 - \beta_s$, $3 - w_s$, $4 - \alpha_{ss}$, $5 - h$

Рисунок 1.9 – Контролируемые геометрические параметры диска

Ключевыми параметрами при контроле пазов являются: расстояние от центра диска до плоскости паза, сопрягаемой с опорной поверхностью хвостовика M_1; углы разворота пазов (между осью вращения диска и осями симметрии

пазов) β_s; ширины пазов диска w_s на расстоянии h от опорной поверхности; величины углов деления пазов α_{ss}. Кроме того, производится измерение сноса первого паза относительно нулевого отверстия на ободе диска. Так же важным параметром является величина угла деления пазов α_{ss}, по существующей технологии он считается одинаковым для всех пазов одного диска. В то же время в исследовании данный параметр был изучен, отклонения проанализированы, так как они влияют на уровень натяга между лопатками.

Традиционно для контроля пазов применяется множество специальных контрольно-измерительных приспособлений. При этом в настоящее время все параметры можно контролировать на КИМ [87, 85], сейчас на них осуществляется переход на производстве [8, 88].

Погрешности и трудоёмкости измерений рассматриваемых методов приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Сводные характеристики оборудования для измерения дисков

№	Наименование оборудования	Погрешность измерений дисков, мм	Трудоёмкость измерений дисков, мин
1	КИП (прибор для измерения ширины паза диска, комбайн, прибор с индикаторными часами)	0,01-0,05	42-168
2	КИМ	0,002-0,005	180-240

Преимуществами измерения дисков на КИМ являются: высокая достоверность контроля, автоматическое сохранение результатов, исключающее человеческий фактор на этой стадии. В то же время существенным недостатком является требование к высокой квалификации специалиста-метролога при написании и отладке управляющей программы. При измерении на КИП недостатков существенно больше.

Основная проблема использования приспособлений заключается в том, что в контроле диска участвуют последовательно все рассмотренные в таблице 1.2

КИП, что увеличивает трудоёмкость измерений. Кроме того, величина погрешности может существенно увеличиться из-за недостаточной квалификации специалиста. Ещё одна проблема заключается в том, что оснастка изнашивается и требуется её замена или ремонт. КИМ не обладает вышеперечисленными недостатками, присущими КИП. Единственным существенным недостатком КИМ является их высокая стоимость, что, впрочем, не является проблемой для двигателестроительных предприятий.

1.5 Выводы по главе 1. Цель и задачи исследования

1. Обзор публикаций и анализ существующих технологических процессов сборки позволил выявить основную проблему, возникающую при сборке рабочих колёс авиационных ГТД – обеспечение равномерности натяга по антивибрационным полкам.

2. Существующим технологиям сборки и комплектации рабочего колеса присущи множество недостатков, среди которых высокая трудоёмкость, изнашивание сопрягаемых поверхностей лопаток и диска и т.д. Для устранения недостатков необходимо создание специальной методики с возможностью автоматизации поиска оптимального положения лопаток в диске, основанной на компьютерных вычислениях, снижающих трудоёмкость процесса.

3. Разрабатываемая методика невозможна без применения метода «виртуальной сборки», который позволит оценить возможные варианты комплектации узла, в частности, рабочего колеса, без непосредственной физической реализации процесса сборки. Таким образом, метод «виртуальной сборки» включает в себя использование цифровых моделей и ведёт к уменьшению затрат времени и ресурсов на комплектацию и сборку лопаток и дисков.

4. Эффективное создание цифровых моделей возможно за счёт использования результатов измерений в цифровом формате. На данный момент предприятия аэрокосмической отрасли оснащены современными координатными

средствами для получения высокоточных результатов измерений изготовляемых деталей в цифровом виде.

В связи с вышеизложенным была сформулирована цель исследования: «Повышение точности и снижение трудоёмкости сборки рабочих колёс компрессоров ГТД за счёт разработки модели оценки натягов по антивибрационным полкам лопаток, алгоритма расстановки лопаток и методики сборки с автоматизацией формирования схемы расстановки лопаток».

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Создать модель оценки натягов по антивибрационным полкам лопаток при их сборке в рабочем колесе, в которой используются отклонения геометрических параметров лопаток, пазов диска и учитывается влияние соседних лопаток.

2. Разработать алгоритм расстановки лопаток в рабочем колесе, направленный на минимизацию рассеивания величин натягов между лопатками, в котором в качестве критерия используются отклонения натяга по антивибрационной полке со стороны корыта и со стороны спинки от конструкторских значений.

3. Разработать методику сборки рабочих колёс компрессора ГТД с автоматизацией формирования схемы расстановки лопаток, позволяющую добиться снижения количества предварительных сборок.

4. Провести теоретико-экспериментальные исследования погрешностей сборки рабочего колеса с использованием разработанных модели оценки натягов, алгоритма расстановки лопаток и методики сборки рабочих колёс.

5. Реализовать модель оценки натягов и алгоритм расстановки лопаток в рабочем колесе в виде программной системы, позволяющей их использование в цеховых условиях.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И МОДЕЛИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ И СНИЖЕНИЯ ТРУДОЁМКОСТИ СБОРКИ РАБОЧИХ КОЛЁС

В данной главе представлена разработанная методика сборки рабочих колёс компрессора ГТД с автоматизацией формирования схемы расстановки лопаток. Методика основывается на использовании математической модели оценки натягов по антивибрационным полкам и алгоритма расстановки лопаток в рабочем колесе. Модель оценки натягов позволяет выполнить расчёт комплексных параметров – отклонение натяга со стороны спинки и отклонение натяга со стороны корыта, обобщающих отклонения пазов и лопаток. Алгоритм расстановки лопаток позволяет уменьшать рассеивание величин натягов и повышать минимальную величину натягов. Проведены теоретические исследования, в которых было выполнено моделирование большого количества сборок рабочих колёс, определены и проанализированы значения натягов между лопатками, расставленными в комплектах с использованием алгоритма расстановки лопаток и случайным образом.

2.1 Разработка методики сборки рабочих колёс компрессора ГТД с автоматизацией формирования схемы расстановки лопаток

Как отмечалось в главе 1, автоматизация сборочных процессов рабочего колеса возможна с использованием цифровых (математических) моделей [89] и специальных алгоритмов для расстановки лопаток в диске [90]. Кроме того, необходимо получение и анализ измеренных данных. Для объединения всех составляющих была разработана методика сборки рабочих колёс компрессора ГТД с автоматизацией формирования схемы расстановки лопаток, основанная на использовании измеренных данных и разработанной цифровой модели. Методика позволяет выполнить расстановку комплекта лопаток в одном рабочем колесе.

Разработанная методика состоит из следующих этапов:

1) проведение измерений геометрических параметров лопаток и пазов диска рабочего колеса компрессора;

2) обработка результатов измерений;

3) расстановка лопаток в рабочих колёсах по разработанному алгоритму;

4) оценка натягов по антивибрационным полкам лопаток с использованием разработанной математической модели;

5) проведение измерений сборочных параметров рабочего колеса;

6) принятие решения о годности комплекта или отправки на перекомплектацию.

Блок-схема разработанной методики приведена на рисунке 2.1.

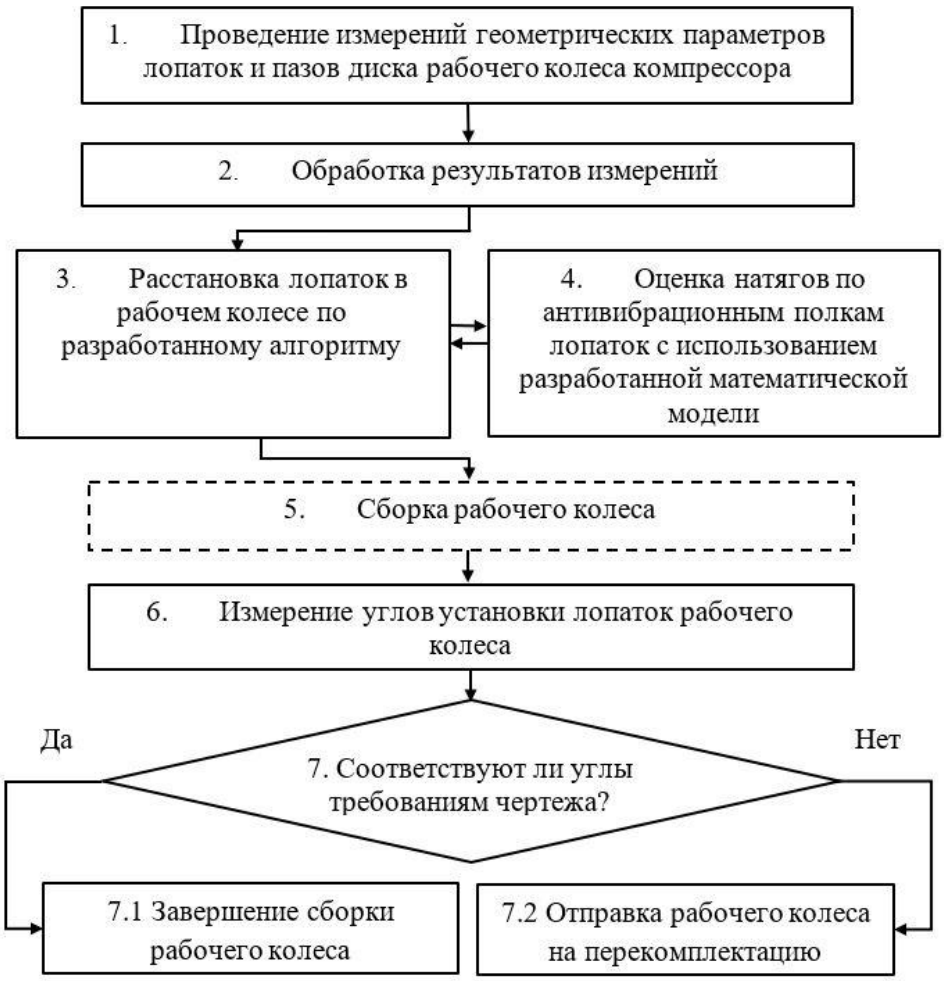


Рисунок 2.1 – Блок-схема методики сборки рабочих колёс компрессора ГТД с автоматизацией формирования схемы расстановки лопаток

Рассмотрим подробнее каждый этап методики.

На первом этапе методики проводятся измерения геометрических параметров лопаток и пазов диска, характеризующих их геометрическую точность. А именно: фактические значения стыковых размеров по рабочим торцам антивибрационных полок лопаток l_{sp}; расстояние от центра до рабочего торца со стороны корыта l_p; угол установки γ_b; ширина хвостовика w_l; углы профилей торцов φ_p со стороны корыта и φ_s со стороны спинки в сечении относительно оси симметрии хвостовика; расстояние от центра диска до плоскости паза, сопрягаемой с опорной поверхностью хвостовика M_1; углы разворота пазов (между осью вращения диска и осями симметрии пазов) β_s; ширины пазов диска w_s на расстоянии h от опорной поверхности; величины углов деления пазов a_{ss}. Измерения осуществляются с использованием специальных приборов, приспособлений и оснастки, согласно серийной технологии изготовления компрессора.

Вторым этапом является обработка полученных на первом этапе геометрических параметров лопаток и пазов, вычисление отклонения и статистических характеристик параметров.

На третьем этапе методики, на основании полученных в результате обработки отклонений параметров, выполняется формирование плана расстановки лопаток в пазах диска.

Натяги между торцами антивибрационных полок в рабочем колесе характеризуются величинами геометрических параметров лопаток и пазов, а также взаимным положением лопаток в диске. Опишем математическую постановку задачи оптимальной расстановки лопаток в рабочем колесе.

Пусть $x_{ij} = \left\{\delta\alpha_{ss}^{i}, \delta\beta_{s}^{i}\right\}_{j}$ – варианты установки лопатки j в пазы диска с отклонениями расположения $\delta\alpha_{ss}^{i}$ и $\delta\beta_{s}^{i}$, где $i = 1...N$ – количество пазов в диске.

Тогда $X = \{x_{ij}\}$ – множество всех возможных вариантов установки $j = 1...N$ лопаток в пазы диска.

Обозначим $G_{ij}(X)$ – натяг по антивибрационной полке при установке j-й лопатки в i-й паз.

$\bar{G} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} G_{ij}(X)$ – среднее выборочное всех натягов для одного из вариантов расстановки лопаток в пазах.

Положим, что расстановка будет оптимальной, если $G_{ij}(X) \to \bar{G}$.

В этом случае имеет место функционал, равный сумме квадратов отклонений от $\overline{G}$:

$$SS(X) = \sum_{j=1}^{N}(G_{ij}(X) - \bar{G})^2, \quad (2.1)$$

Тогда оптимизационная задача запишется в виде:

$$\underset{x}{argmin}\, SS(X) = \{x_{ij} \mid \forall\, x_{ik}: i = 1 \dots N, k \neq j,\ SS(\{x_{ik}\}) > SS(\{x_{ij}\})\} \quad (2.2)$$

Натяг по антивибрационным полкам между двумя лопатками можно представить как функцию:

$$G = f\left(G_i^{к}, G_j^{с}\right), \quad (2.3)$$

где $G_i^{к}$ – натяг i-й со стороны корыта; $G_j^{с}$ – натяг -й со стороны спинки.

В свою очередь, натяги на лопатках со стороны спинки и корыта можно представить как функции, зависящие от отклонений параметров лопаток и пазов, в которых они находятся:

$$\left\{G_i^{к}, G_j^{с}\right\} = f\left(l_{sp}, l_p, \varphi_p, \varphi_s, \beta_s, \alpha_{ss}, M_1\right). \quad (2.4)$$

Системой ограничений в задаче минимизации является:

$$\begin{cases} f\left(G_i^{к}, G_j^{с}\right) \leq G_{max}, \\ f\left(G_i^{к}, G_j^{с}\right) \geq G_{min}; \end{cases} \quad (2.5)$$

где G_{max} и G_{min} – допустимые максимальный и минимальный натяги в соединениях.

Точное решение задачи минимизации (2.2) достигается путём перебора всех возможных вариантов размещения лопаток в пазах. Таким образом, задача (2.2) является NP-полной и может быть успешно решена с использованием жадного алгоритма.

Для выполнения расстановки используется модель оценки натягов по антивибрационным полкам [91], на блок-схеме рисунка 2.1 обозначена в четвёртом блоке. Алгоритм расстановки лопаток позволяет получить вариант раскладки лопаток, удовлетворяющий требованиям технологии сборки рабочего колеса [92]. Выходные данные представляются в виде массивов порядковых номеров лопаток и соответствующих им массивам порядковых номеров пазов. Расстановка лопаток в комплекте по порядку, рассчитанному с помощью алгоритма, позволяет добиться повышения равномерности натягов по антивибрационным полок лопаток.

На пятом этапе разработанной методики выполняется сборка рабочего колеса на основе порядковых номеров, полученных в ходе выполнения третьего и четвёртого этапов. На шестом – измеряются углы установки лопаток в сборке и их разности с начальными значениями.

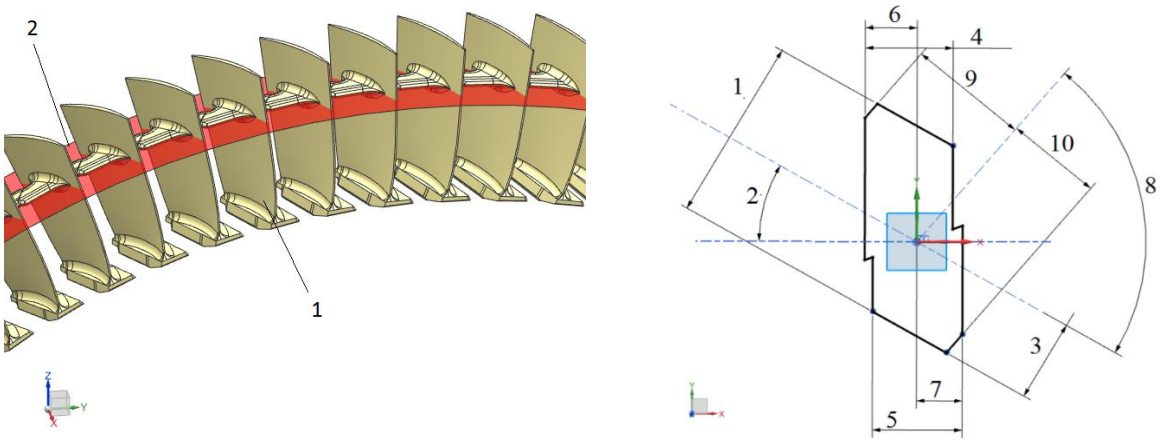
На седьмом этапе осуществляется принятие решения о годности комплекта. Если комплект соответствует требованиям сборочного чертежа, то процесс сборки рабочего колеса завершается, если не соответствует, то рабочее колесо отправляют на перекомплектацию.

В последующем разделе будет приведено подробное описание разработанной модели оценки натягов по антивибрационным полкам лопаток при их сборке в рабочем колесе.

2.2 Разработка модели оценки натягов по антивибрационным полкам лопаток

В рассматриваемом рабочем колесе конструкцией заложены натяги в стыках антивибрационных полок лопаток. В собираемом рабочем колесе величины натягов отличаются от заложенных в чертеже и зависят от сочетания

геометрических отклонений размеров соседних лопаток и пазов диска. Лопаточный венец рабочего колеса приведён на рисунке 2.2, а.



а б

Рисунок 2.2 – Пояснение к разработанной модели:

а) сборка рабочего колеса компрессора: 1 – лопатка; 2 – сечение в месте антивибрационной полки; б) сечение лопатки в месте антивибрационной полки:

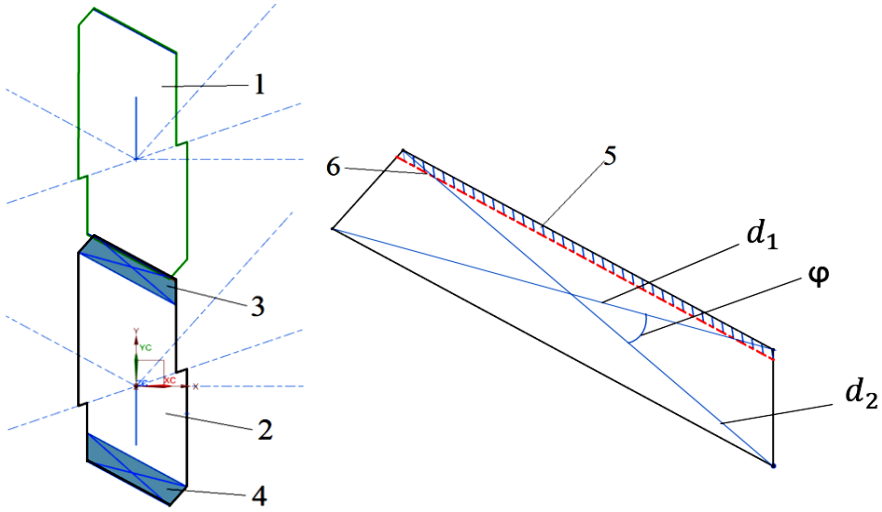
$1 - l_{sp}$; $2 - \gamma_b$; $3 - l_p$; $4 - t_s$; $5 - t_p$; $6 - t_{hp}$; $7 - t_{hs}$; $8 - \alpha_s$; $9 - d_s$; $10 - d_p$

При создании модели необходимо исходить из набора геометрических параметров лопаток и пазов, контролируемых в производственном процессе. Они перечислены в разделе 1.4: фактические значения стыковых размеров по рабочим торцам антивибрационных полок [68] лопаток l_{sp}; расстояние от центра до рабочего торца со стороны корыта l_p; отклонения от параллельности торцов, характеризующаяся углами их профилей – φ_p со стороны корыта и φ_s со стороны спинки в сечении относительно оси симметрии хвостовика.

При рассечении лопатки в месте антивибрационной полки на определённом расстоянии от опорной поверхности хвостовика (рисунок 2.2, а) получится сечение, указываемое на конструкторском чертеже, все вышеперечисленные параметры лопатки контролируются в нем. Ввиду наличия только параметров, находящихся в сечении, трёхмерная задача определения натягов сводится к задаче на плоскости [93], при этом исходим из допущения, что стык лопаток по высоте полки будет пропорционален стыку в рассматриваемом сечении. Остальными

допущениями, принятыми в модели, являются: 1) лопатка представляет собой абсолютно жёсткое тело; 2) учитываются только отклонения параметров, влияющих на натяг, прочие геометрические параметры берутся номинальными по чертежу; 3) допускается, что средний натяг распределён равномерно в контакте между полками. На рисунке 2.2, б приведено сечение лопатки в месте антивибрационной полки.

Для описания модели кроме контролируемых параметров, были использованы остальные геометрические параметры сечения, их величины были взяты с чертежа: конструкторские значения толщин полки со стороны спинки t_s и часть этой толщины со стороны входной кромки до оси t_{hs}; толщина полки со стороны корыта t_p и часть этой толщины со стороны выходной кромки до оси t_{hp}; угол среза полок α_s; расстояние до плоскости среза со стороны спинки d_s и корыта d_p.



1 – первая лопатка; 2 – вторая лопатка; 3 – отклонения натяга со стороны спинки, δS_{s2}; 4 – отклонения натяга со стороны корыта, δS_{p1}; 5 – отклонения натяга со стороны спинки; 6 – линия номинального натяга; d_1, d_2 – диагонали получающегося четырёхугольника; φ – угол между диагоналями

Рисунок 2.3 – Графическая иллюстрация модели оценки натягов

Модель оценки натягов основана на расчёте комплексных параметров – отклонений натяга со стороны спинки и корыта двух соседних лопаток по

антивибрационным полкам в двумерной постановке. На рисунке 2.3 приведена геометрическая интерпретация модели оценки натягов.

Модель сводится к расчёту в плоскости отклонения натяга между лопатками от конструкторского значения – фактически, к расчёту площади взаимного пересечения полок. Отклонение натяга G между двумя лопатками (отклонение натяга со стороны корыта первой лопатки δS_{p1} и спинки второй δS_{p2}) вычисляется по формуле:

$$G = \delta S_{p1} + \delta S_{s2}. \quad (2.6)$$

Для расчёта отклонения натяга рассчитываются координаты точек четырёхугольника, образованного пересечением антивибрационной полки с линией номинального натяга (рисунок 2.3). В зависимости от параметров l_{sp} и γ_b, вершины четырёхугольника, представляющего собой часть антивибрационной полки со стороны спинки, перемещаются. Линия номинального натяга остаётся на прежнем месте, а фактическое отклонение натяга меняется. Аналогичные изменения натяга происходят и со стороны корыта.

Расчёт площадей для вычисления отклонений натягов производится по формуле:

$$S = d_1 \cdot d_2 \cdot \sin(\varphi)\ /2, \quad (2.7)$$

где d_1, d_2 – диагонали получающегося четырёхугольника; φ – угол между диагоналями.

В результате, используя в качестве входных параметров измеренные значения параметров лопаток и конструкторские размеры, на выходе из модели для каждой лопатки рассчитываются отклонения натяга со стороны спинки и корыта.

Отклонение δS рассчитанной площади S от номинальной её величины S_d, характеризующее отклонение натяга, рассчитывается по формуле:

$$\delta S = S - S_d. \quad (2.8)$$

Ввиду того, что пазы диска также имеют значимые погрешности, необходимо учитывать их влияние на сдвиг и разворот лопаток и, соответственно, влияние на формируемые натяги. Отклонение угла разворота паза $\delta\beta_s$ по сути разворачивает точки профиля, угловая погрешность деления пазов $\delta\alpha_{ss}$ – сдвигает сечение. Для расчёта величины сдвига необходимо преобразовать угловую погрешность $\delta\alpha_{ss}$ в линейную величину l_{ss}, используя выражение:

$$l_{ss} = (M_1 + h_b) \cdot \tan(\delta\alpha_{ss}), \tag{2.9}$$

где M_1 – расстояние от оси вращения диска до опорной плоскости паза (331,5 мм); h_b – высота от опорной поверхности хвостовика лопатки до рассматриваемого сечения в месте антивибрационной полки (51 мм).

Каждая точка сечения лопатки с вектором координат $p_{n\times 2}$, устанавливаемой в пазу с погрешностями l_{ss} и $\delta\beta_s$, сдвигается и разворачивается на эти величины, новый вектор координат $\vec{p}_{n1\times 2}$ вычисляется по выражению:

$$\vec{p}_{n1\times 2} = (\vec{p}_{\mathrm{n}\times 2} \cdot \mathbf{R}_{2\times 2}) + \vec{t}_{1\times 2}, \tag{2.10}$$

где $\mathbf{R}_{2\times 2}$ – матрица разворота профиля:

$$\mathbf{R}_{2\times 2} = \begin{bmatrix} \cos(\delta\beta_s) & -\sin(\delta\beta_s) \\ \sin(\delta\beta_s) & \cos(\delta\beta_s) \end{bmatrix}, \tag{2.11}$$

а $\vec{t}_{1\times 2}$ – вектор перемещения:

$$\vec{t}_{1\times 2} = [0 \quad l_{ss}]. \tag{2.12}$$

Соответственно, всё сечение перемещается относительно номинальных линий, что приводит к изменению отклонения натяга в зависимости от погрешностей пазов.

Разработанная модель подходит для оценки натягов различных типоразмеров рабочих лопаток компрессоров по антивибрационным полкам.

Оперируя массивами отклонений натягов и формулой (2.6) можно выполнить расстановку лопаток, при которой натяги между парами лопаток будут распределены равномерно.

2.3 Разработка алгоритма расстановки лопаток в рабочем колесе

В серийных производствах часто применяют методы расстановки лопаток, основанные на одном или нескольких параметрах их отклонений [94, 43].

Был разработан алгоритм применительно к расстановке лопаток в роторе компрессора среднего давления, в котором в качестве ключевых параметров используются величины отклонений натяга по антивибрационной полке со стороны спинки и корыта, рассчитываемые с использованием разработанной математической модели [99].

Блок-схема разработанного алгоритма приведена на рисунке 2.4.

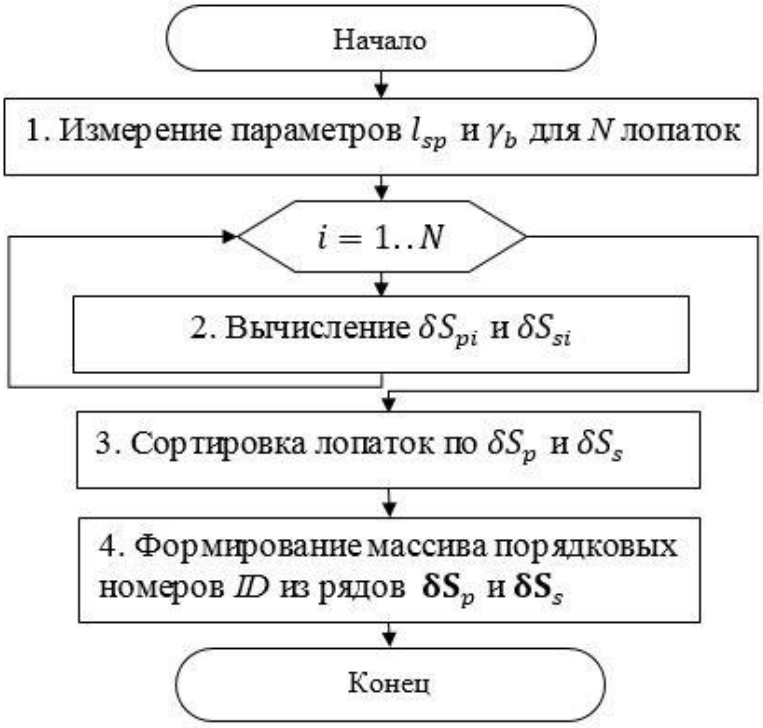


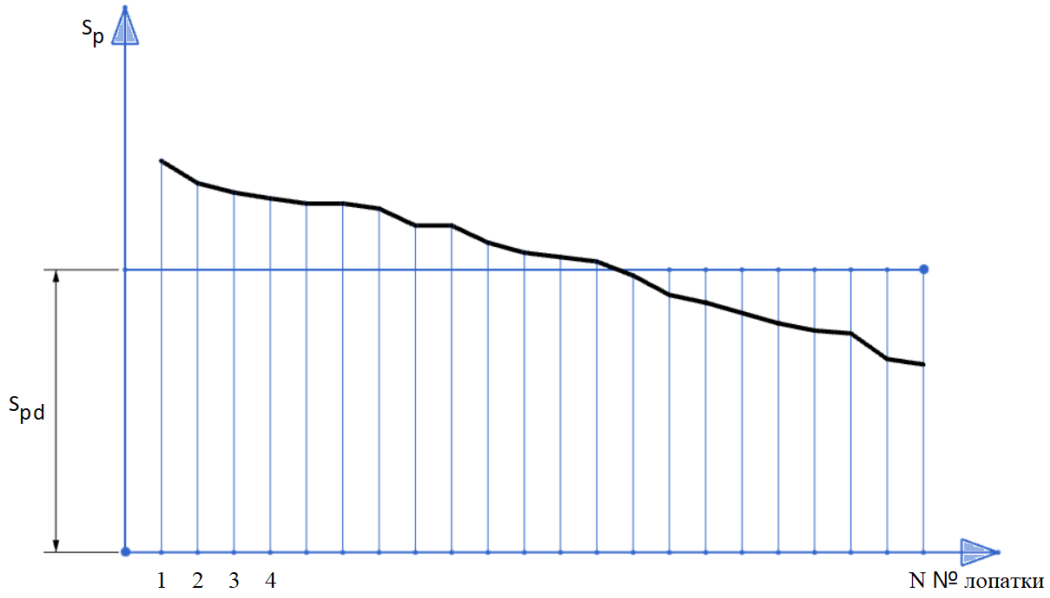
Рисунок 2.4 – Блок-схема алгоритма расстановки лопаток комплекта

Рассмотрим более подробно этапы разработанного алгоритма.

На первом этапе производится измерение необходимых параметров лопаток и диска, описанных в разделе 1.4.

На втором этапе вычисляются величины отклонений натягов для каждой лопатки с использованием разработанной модели, описанной в разделе 2.2. Величины отклонений натягов характеризуют натяги в соединениях между антивибрационными полками δS_p со стороны корыта и δS_s со стороны спинки. Как отмечалось ранее, отклонения натягов являются ключевым параметром для их расстановки.

На третьем этапе производится сортировка лопаток по возрастанию отклонений натягов со стороны спинки и по убыванию со стороны корыта. Образуется два ряда упорядоченных по параметру отклонений натягов лопаток (рисунок 2.5).



δS_{pd} – заданный по чертежу натяг на корыте лопатки

Рисунок 2.5 – Ряд лопаток по убыванию отклонения натяга со стороны корыта

Отсортированные лопатки можно расставлять разными способами. Важно понимать, что задача расстановки лопаток является NP-полной и решать прямым перебором с учётом существующих возможностей вычислительной техники её не целесообразно. На четвёртом этапе алгоритма разработан и использован

подчинённый алгоритм (подалгоритм) для формирования массива порядковых номеров лопаток из отсортированных на предыдущем этапе рядов отклонений.

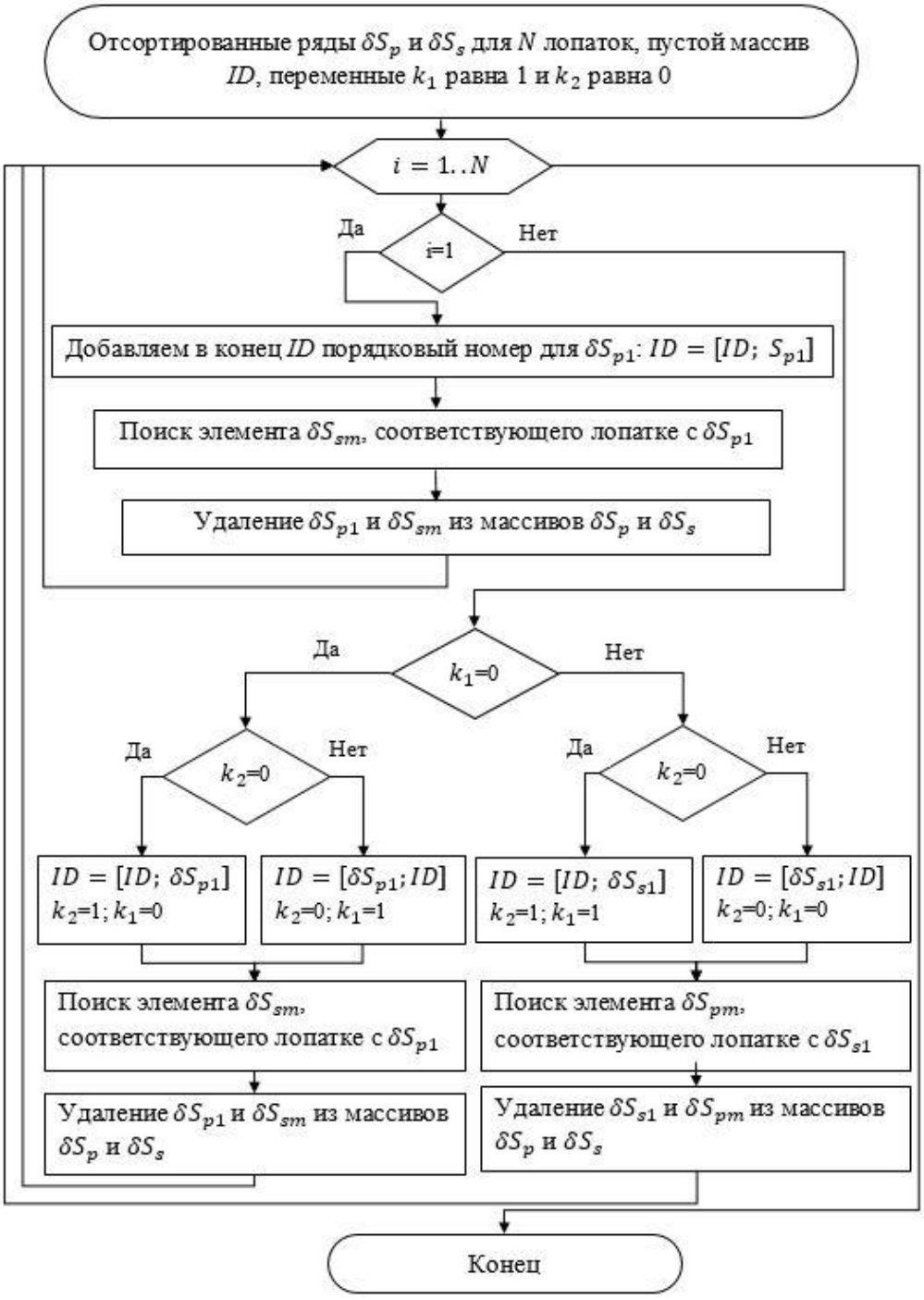


Рисунок 2.6 – Блок-схема этапа формирования массива порядковых номеров

Подалгоритм реализует жадную стратегию поиска, основанную на последовательном отборе из отсортированных по параметрам δS_p и δS_s рядов лопаток с максимальными и минимальными величинами отклонений натягов для установки в определённом порядке. Подалгоритм формирования массива

порядковых номеров лопаток, представляющий собой четвёртый этап общего алгоритма расстановки, приведён на рисунке 2.6.

Поясним работу алгоритма, изображённого на рисунке 2.6.

Сначала выбирается первая по порядковому номеру лопатка из убывающего ряда по величине δS_p. Лопатка убирается из обоих рядов. Вторая лопатка выбирается как первая по порядку из возрастающего ряда по величине δS_s и ставится рядом с первой лопаткой со стороны корыта.

Выбранная лопатка так же убирается из обоих рядов. Третья лопатка выбирается как первая по порядку из ряда δS_s, ставится рядом с первой лопаткой в другом направлении от второй. Выбранная лопатка убирается из обоих рядов. Четвёртая выбирается как первая по порядку из ряда δS_p и устанавливается рядом со второй. В целом в диске чередуются лопатки из двух рядов, при этом обеспечивая постоянство натягов между полками. На рисунке 2.7 приведены схематично лопатки и их порядковые номера в рядах δS_s и δS_p.

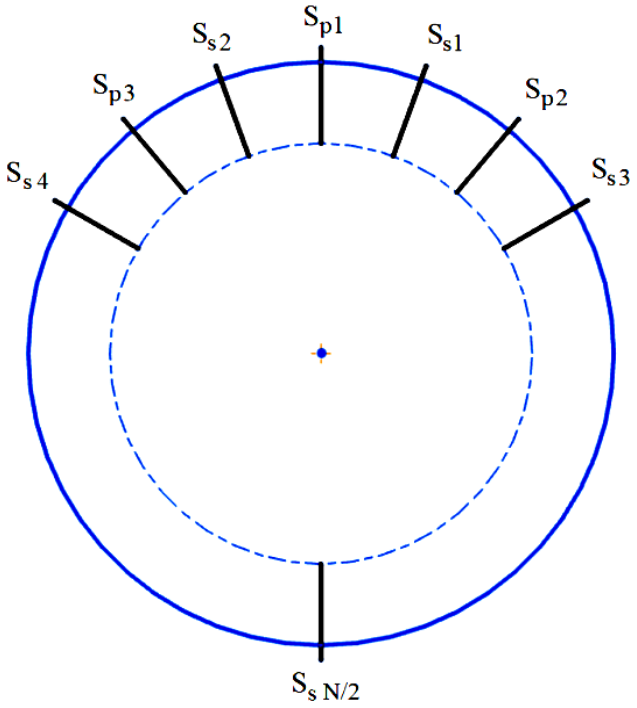


Рисунок 2.7 – Схема расстановки лопаток в корпусе

В случае измеренных отклонений пазов диска в каждом цикле алгоритма, приведённого на рисунке 2.6, выполняется уточнение величины отклонения

натягов для каждой лопатки в соответствие с коррекцией координат точек сечения по выражению (2.10).

Разработанный алгоритм может быть использован для расстановки лопаток в рабочих колёсах или направляющих аппаратов при замене критерия расстановки (например, отклонение площадь горла решётки для направляющего аппарата).

С использованием разработанного алгоритма ожидается уменьшение рассеивания величин натягов, а также повышение минимальной величины натягов. В следующем подразделе и главе 3 будут показаны результаты проведённых теоретических и экспериментальных исследований.

2.4 Теоретические исследования неравномерностей натягов по антивибрационным полкам

Как отмечалось выше, использование разработанного алгоритма позволяет добиться минимизации рассеивания величин натягов между лопатками. В то же время из практики производства известно, что отклонения размеров лопаток зачастую превышают поле допуска, и отсюда встаёт вопрос о получении годной сборки в подобных ситуациях. Для оценки степени снижения рассеивания и величины превышения поля допуска в различных ситуациях распределения отклонений размеров лопаток и пазов были проведены теоретические исследования. Кроме того, с помощью теоретических исследований оценивается величина влияния отклонений пазов на итоговый результат.

Теоретические исследования представляют собой многократное моделирование сборок [100] с использованием различных сочетаний геометрических отклонений деталей, расчёт величин натягов и оценку статистических характеристик их отклонений, сравнение их с величинами допусков на отклонение от номинального натяга.

Согласно статистическим данным, рассматриваемые параметры лопаток и пазов на диске (раздел 1.4) зачастую подчиняются нормальному закону

распределения. Параметры отклонений пазов и лопаток моделировались исходя из величин отклонений, полученных в производстве. Было выделено 4 случая: 1) величина l_{sp} не превышает допуск; 2) значения l_{sp} выходят за нижнюю границу поля допуска; 3) значения l_{sp} выходят за верхнюю границу поля допуска; 4) значения l_{sp} выходят как за нижнюю, так и за верхнюю границы. Остальные параметры находятся в границах полей допусков на их изготовление [101]. В таблице 2.1 приведены среднее выборочное μ и среднеквадратические отклонения σ рассматриваемых величин геометрических отклонений.

Таблица 2.1 – Статистические характеристики параметров

Параметр	α_{ss}, мин	β_s, мин	φ, мин	Случай 1	Случай 2	Случай 3	Случай 4
				l_{sp}, мм	l_{sp}, мм	l_{sp}, мм	l_{sp}, мм
μ	0	0	0	0,03	-0,08	0,22	0,11
σ	0,43	1,72	1,53	0,04	0,07	0,11	0,17

Было проведено моделирование 10 000 параметров для каждого случая из таблицы 2.1. В каждом из четырёх случаев было случайным образом отобрано 84 лопатки на 1 000 комплектов. Таким образом, было выполнено моделирование сборки 4 000 рабочих колёс.

Для каждого комплекта был применён разработанный алгоритм расстановки лопаток. Вычислены величины натягов для каждого комплекта в трёх случаях: 1) предварительная сборка (лопатки устанавливаются случайным образом); 2) сборка по разработанному алгоритму (учитывались только отклонения размеров лопаток); 3) сборка по разработанному алгоритму с учётом отклонений размеров лопаток и пазов. Оценены статистические характеристики (среднеквадратические отклонения, минимальное и максимальное значения) натягов для каждого комплекта в каждом из трёх случаев.

Минимально допустимое отклонение от номинального значения натяга в сечении оценено в -1,118 мм^2, максимально допустимое – 1,669 мм^2. На рисунке 2.8 приведены максимальные значения рассчитанных натягов 4 000 комплектов рабочих колёс по трём случаям расстановок, описанным выше.

На рисунке 2.9 приведены минимальные значения рассчитанных натягов 4 000 комплектов рабочих колёс по трём случаям расстановок, описанным выше.

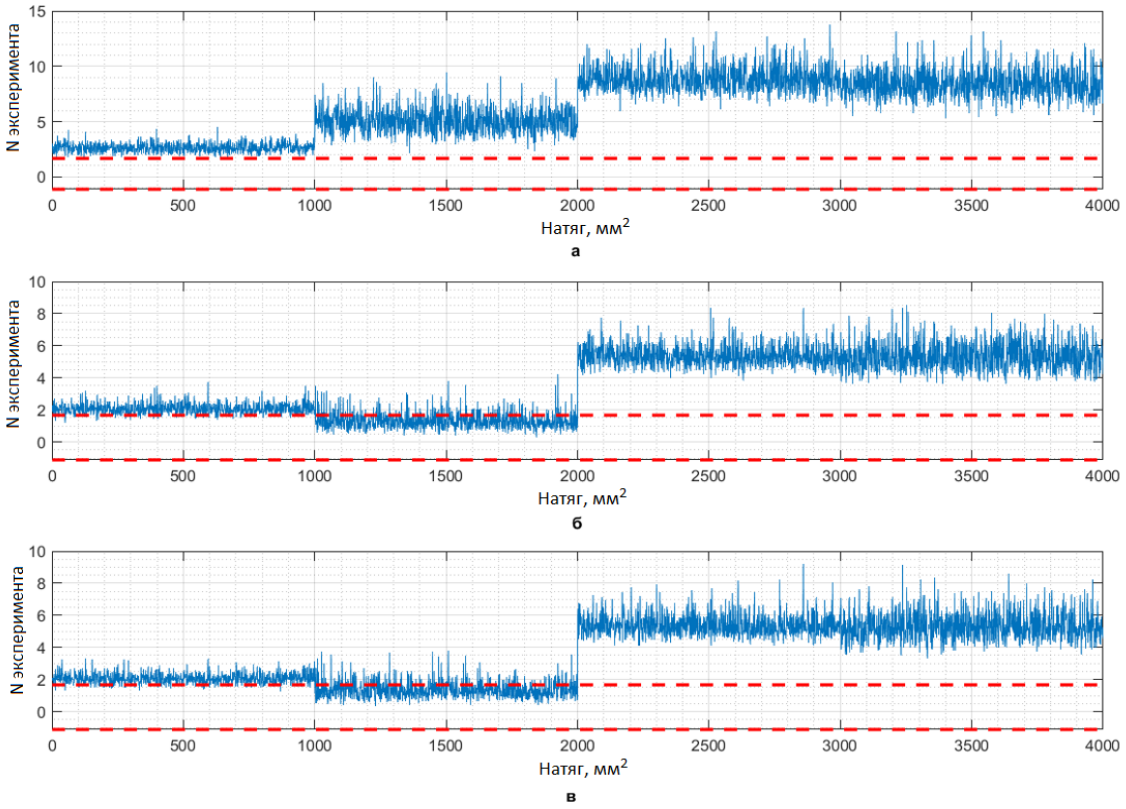


Рисунок 2.8 – Максимальные значения в выборках: а) случайная расстановка; б) расстановка без учёта пазов; в) расстановка с учётом пазов

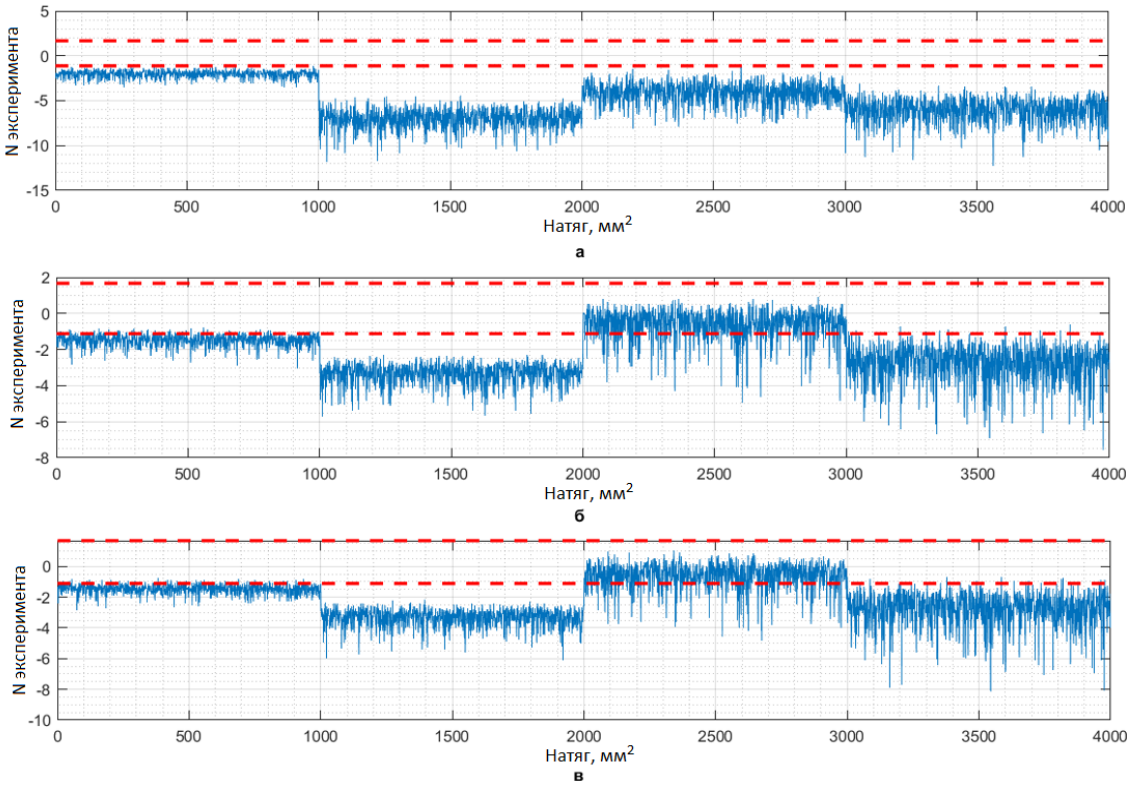


Рисунок 2.9 – Минимальные значения в выборках: а) случайная расстановка; б) расстановка без учёта пазов; в) расстановка с учётом пазов

В таблице 2.2 приведены средние величины рассчитанных статистических характеристик (среднеквадратические отклонения, минимальное и максимальное значения) натягов для каждого из четырёх случаев распределения величина l_{sp} (по 1000 комплектов) в каждом из трёх случаев расстановок.

Таблица 2.2 – Средние величины статистических оценок отклонений натягов от номинальной величины во всех выборках для четырёх экспериментов

Вид расстановки	Случайная расстановка			Расстановка без учёта пазов			Расстановка с учётом пазов		
Характеристика	σ	min	max	σ	min	max	σ	min	max
1-й эксперимент	0,965	-2,053	2,642	0,726	-1,496	2,074	0,726	-1,490	2,069
2-й эксперимент	2,473	-7,019	5,073	0,884	-3,339	1,318	0,886	-3,343	1,356
3-й эксперимент	2,635	-4,116	8,855	1,099	-0,631	5,384	1,100	-0,637	5,380
4-й эксперимент	2,972	-6,113	8,377	1,485	-2,803	5,337	1,486	-2,804	5,335

Согласно полученным результатам, разработанный алгоритм позволяет добиться существенного снижения рассеивания натягов (до 2,8 раз) при выходе за величины поля допуска параметров отклонений лопаток. Для первой тысячи комплектов (отклонения деталей в рамках поля допуска) снижение рассеивания составило в среднем 1,3 раза. Выявлено, что погрешности пазов оказывают незначительное влияние на результат сборки.

2.5 Выводы по главе 2

1. Представлена методика сборки рабочих колёс компрессора ГТД с автоматизацией формирования схемы расстановки лопаток. Разработанная методика позволяет сократить время на получение годного рабочего колеса.

2. Разработана математическая модель оценки натягов по антивибрационным полкам лопаток при их сборке в рабочем колесе. Модель основана на расчёте отклонений натягов со стороны спинки и корыта двух соседних лопаток в двумерной постановке.

3. Разработан алгоритм расстановки лопаток в рабочем колесе компрессора среднего давления ГТД. Алгоритм основан на жадной стратегии поиска, основанной на использовании отклонений натягов, вычисленных с использованием модели оценки натягов по антивибрационным полкам лопаток.

4. Проведены теоретические исследования по определению влияния геометрических отклонений лопаток и пазов диска на получаемые в результате сборки натяги по антивибрационным полкам. Выявлено, что в результате применения разработанного алгоритма расстановки лопаток происходит уменьшение рассеивания распределения натягов за счёт снижения СКО в два раза. Кроме того, исследования показали, что влияние погрешности пазов слабо влияет на получаемый сборочный параметр.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЧНОСТИ СБОРКИ РАБОЧИХ КОЛЁС

Для апробации разработанной методики сборки рабочих колёс компрессора ГТД с автоматизацией формирования схемы расстановки лопаток, модели оценки натягов и алгоритма расстановки лопаток в рабочем колесе были выполнены экспериментальные исследования.

На рисунке 3.1 представлена блок-схема этапов экспериментальных исследований.

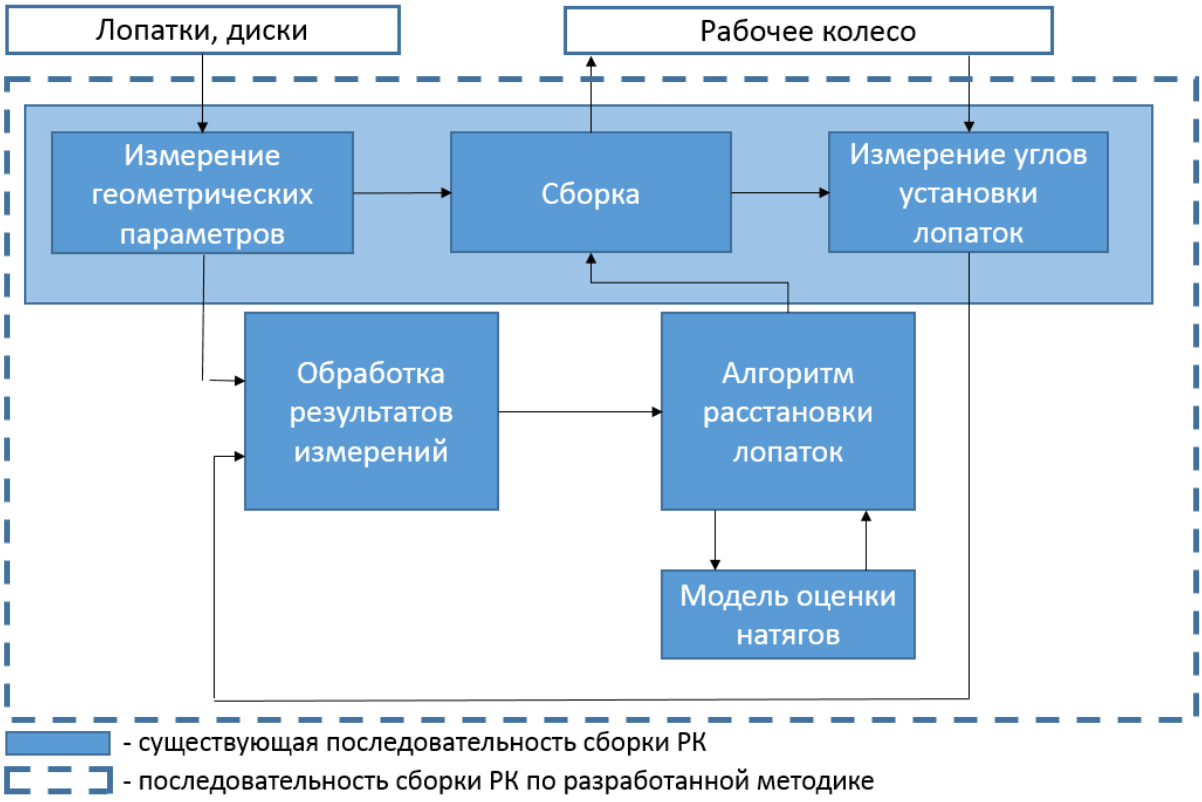
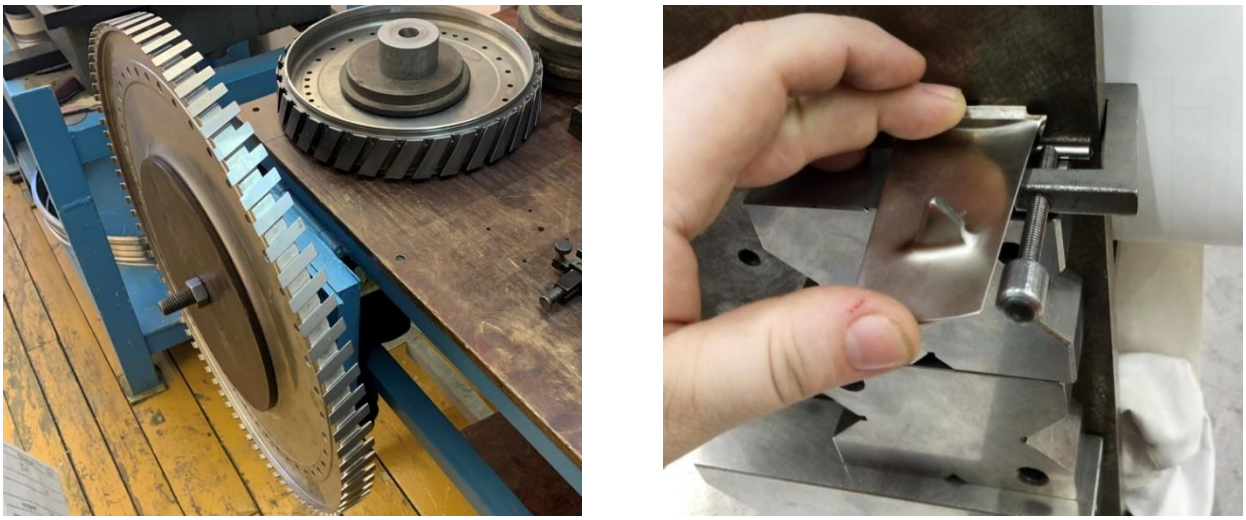


Рисунок 3.1 – Блок-схема последовательности этапов экспериментальных исследований

Проведённые исследования включают в себя: измерения геометрических параметров лопаток и дисков, проведение сборок рабочих колёс и обработку результатов измерений лопаток, дисков и сборочных параметров двух комплектов рабочих колёс восьмой ступени компрессора среднего давления при их ремонте.

3.1 Измерения геометрических параметров лопаток и диска

Сборка рабочего колеса может происходить или при его производстве, или при ремонте после эксплуатации. Фотографии диска и лопатки компрессора (восьмая ступень колеса среднего давления) приведены на рисунке 3.2.



а б

Рисунок 3.2 – Рассматриваемые детали: а) диск; б) лопатка

Согласно технологии изготовления, и на диске, и на лопатках проводится контроль геометрических параметров, характеризующих их качество, таких как: расстояние от центра диска до плоскости паза M_1; углы разворота пазов β_s; ширины пазов диска w_s; величины углов деления пазов α_{ss}. Схема расположения контролируемых параметров диска представлена в разделе 1.4.2.

Измерения перечисленных выше параметров для двух дисков производились на контактной КИМ DEA Global Advantage. На рисунке 3.3 приведён снимок экрана управляющей программы для измерения пазов диска в среде PC-DMIS, используемой для работы на КИМ.

На рисунке 3.4 приведён снимок протокола контроля геометрии диска. В протоколе указывается название параметра, номинальное (конструкторское) значение, верхняя и нижняя границы поля допуска, измеренное значение параметра, отклонение и величина выхода за поле допуска. Протокол сохраняется

в формате *.pdf, но измеренные значения экспортируются в формат *.csv и *.xls для анализа и дальнейшего использования.

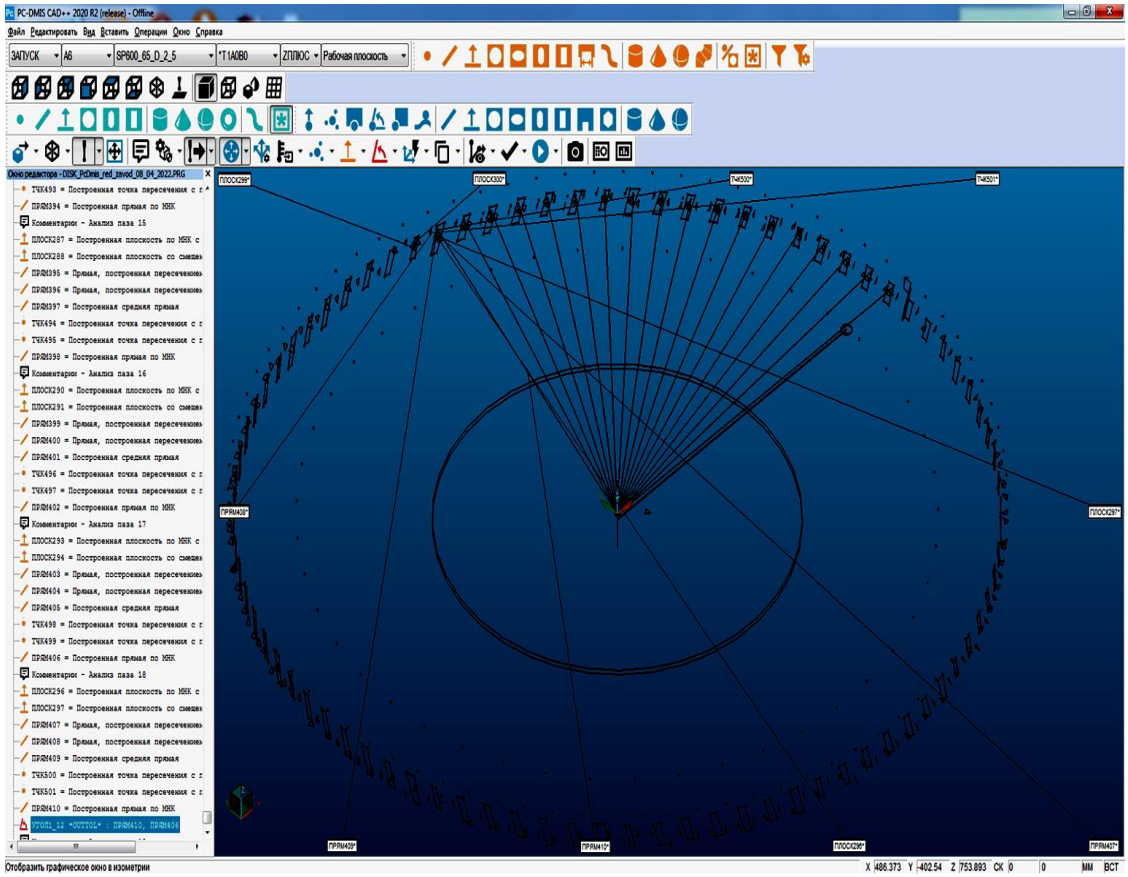


Рисунок 3.3 – Управляющая программа измерения для всех пазов диска

После измерения был выполнен расчёт отклонений измеренных параметров p_{meas} от параметров p_t, заданных по чертежу:

$$\delta_{as} = p_{meas} - p_t, \tag{3.1}$$

где p_{meas} – величина измеренного параметра;

p_t – величина параметра, заданного по чертежу.

Контролируемые геометрические параметры лопатки приведены в разделе 1.4.1, ими являются: а) значения стыковых размеров по торцам антивибрационных полок l_{sp}; б) расстояние от центра до рабочего торца со стороны корыта l_p; в) угол установки γ_b; г) ширина хвостовика w_l; д) углы

профилей торцов полок φ_p со стороны корыта и φ_s со стороны спинки в сечении относительно оси симметрии хвостовика.

Pc	ИМЯ ДЕТАЛИ : 02.02.2022				апреля 12, 2022	13:58	
	НОМЕР РЕДАКЦИИ :		ПОРЯДК. НОМЕР :		СТАТИСТ. СЧЕТЧИК :	1	
Точки паза, его угловое положение							
Доработка для анализа параметров							
Анализ паза 1							
∠	ГРАД	УГОЛ1 - ПРЯМ349 ОТНОСИТ. ПРЯМZ					
ОСЬ	НОМИНАЛ	+В.О.	-Н.О.	ИЗМЕР.	ОТКЛ	ВНЕ ДОП	
A	20.000	0.080	0.080	19.968	-0.032	0.000	
↔	ММ	DIST1 - ТЧК467 ОТНОСИТ. ПРЯМ347					
ОСЬ	НОМИНАЛ	+В.О.	-Н.О.	ИЗМЕР.	ОТКЛ	ВНЕ ДОП	
M	13.316	0.060	0.120	13.265	-0.051	0.000	
↔	ММ	DIST3 - ТЧК468 ОТНОСИТ. O					
ОСЬ	НОМИНАЛ	+В.О.	-Н.О.	ИЗМЕР.	ОТКЛ	ВНЕ ДОП	
M	334.500	0.000	0.150	334.499	-0.001	0.000	
Анализ паза 2							
∠	ГРАД	УГОЛ2 - ПРЯМ341 ОТНОСИТ. ПРЯМZ					
ОСЬ	НОМИНАЛ	+В.О.	-Н.О.	ИЗМЕР.	ОТКЛ	ВНЕ ДОП	
A	20.000	0.080	0.080	20.001	0.001	0.000	
↔	ММ	DIST4 - ТЧК469 ОТНОСИТ. ПРЯМ339					
ОСЬ	НОМИНАЛ	+В.О.	-Н.О.	ИЗМЕР.	ОТКЛ	ВНЕ ДОП	
M	13.217	0.060	0.120	13.269	0.052	0.000	
↔	ММ	DIST6 - ТЧК466 ОТНОСИТ. O					
ОСЬ	НОМИНАЛ	+В.О.	-Н.О.	ИЗМЕР.	ОТКЛ	ВНЕ ДОП	
M	334.500	0.060	0.120	334.463	-0.037	0.000	
∠	ГРАД	УГОЛ1_2 - ПРЯМ350 ОТНОСИТ. ПРЯМ342					
ОСЬ	НОМИНАЛ	+В.О.	-Н.О.	ИЗМЕР.	ОТКЛ	ВНЕ ДОП	
A	4.286	0.080	0.080	4.278	-0.008	0.000	
Анализ паза 3							
∠	ГРАД	УГОЛ1_4 - ПРЯМ345 ОТНОСИТ. ПРЯМZ					
ОСЬ	НОМИНАЛ	+В.О.	-Н.О.	ИЗМЕР.	ОТКЛ	ВНЕ ДОП	
A	20.000	0.080	0.080	19.973	-0.027	0.000	
↔	ММ	DIST8 - ТЧК471 ОТНОСИТ. ПРЯМ343					
ОСЬ	НОМИНАЛ	+В.О.	-Н.О.	ИЗМЕР.	ОТКЛ	ВНЕ ДОП	

Рисунок 3.4 – Вид протокола измеренных на КИМ параметров диска

Углы установки лопаток γ_b измеряются в сборе с диском. Лопатки устанавливаются в пазы через одну, контроль осуществляется оптическим угломером по разметке (раздел 1.2.1). Натяги в сборке лопаток определяют по изменению значения угла установки в сборке всех лопаток, контроль угла так же осуществляется оптическим угломером.

Все параметры лопаток, кроме γ_b, измерялись на портативной КИМ CimCore. На рисунке 3.5 показан процесс измерения лопаток. Всего было

измерено 168 лопаток, необходимых для комплектования двух дисков. Измеренные значения так же, как и в случае с дисками, были экспортированы в формате *.csv и *.xls для анализа и дальнейшего использования.

Рисунок 3.5 – Контроль лопатки на КИМ CimCore

В следующем подразделе приведены результаты обработки и анализа результатов измерений.

3.2 Проведение предварительных сборок рабочих колёс по существующей технологии

Согласно этапам 2-8 технологии сборки рабочего колеса, приведённой в разделе 1.2.1 (рисунок 1.3), была проведена предварительная сборка двух комплектов рабочих колёс.

Рисунок 3.6 – Собранные рабочие колеса

Лопатки в комплектах располагались по порядку их номеров, то есть в том же порядке, что они были до ремонта. На рисунке 3.6 приведены фотографии сборок дисков.

Были измерены углы установки в свободном состоянии (лопатки на чётных нечётных пазах) и в собранном состоянии с использованием оптического угломера с ценой деления в 5 угловых минут.

3.3 Обработка результатов измерений

Для выполнения анализа результатов экспериментальных исследований сборки рабочего колеса компрессора была разработана методика обработки результатов экспериментальных исследований.

На рисунке 3.7 приведена блок-схема методики обработки результатов экспериментальных исследований.

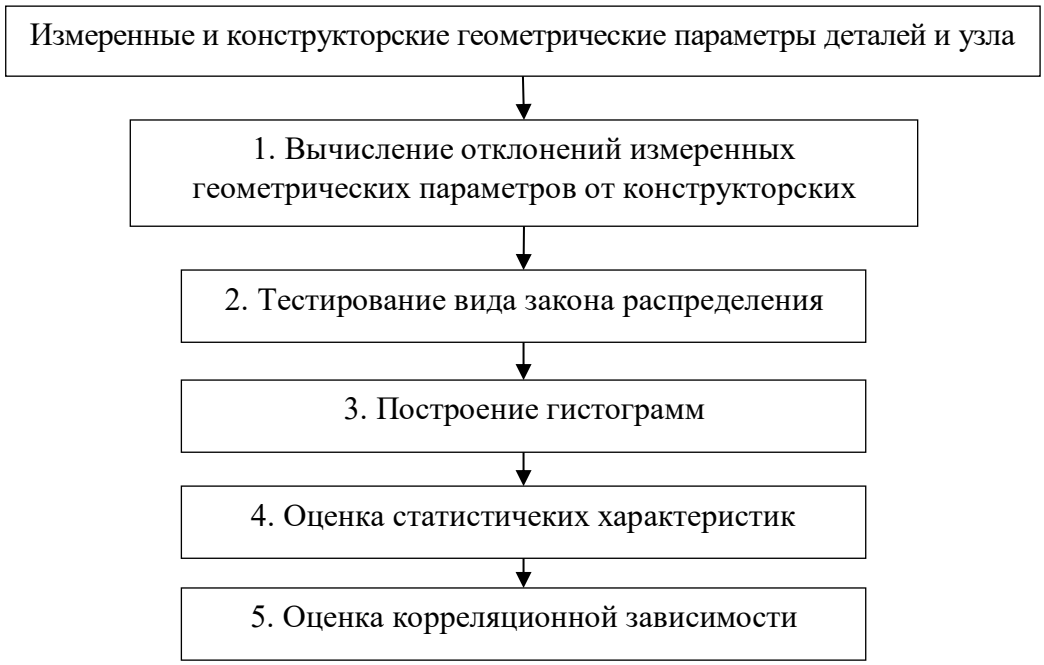


Рисунок 3.7 – Блок-схема методики обработки результатов экспериментальных исследований

Здесь и далее описание пойдёт на примере одного из контролируемых параметров. Кроме того, в методике используется результирующий сборочный

параметр – натяг между антивибрационными полками соседних лопаток, оцениваемый по разности углов установки лопаток до и после сборки $\gamma_{b_н}$.

Измеренные геометрические параметры детали (партии деталей) записываются в виде массива чисел. Обозначим измеренный геометрический параметр как p_{meas}, соответствующий конструкторский параметр (размер, заданный по чертежу) как p_t.

На первом этапе выполняется вычисление отклонений δ_{as} каждого элемента массива измеренных геометрических параметров от конструкторского по формуле:

$$\delta_{as} = p_{meas} - p_t. \quad (3.2)$$

На втором этапе выполняется анализ соответствия распределения массива отклонений δ_{as} нормальному закону. Для выполнения анализа выполняется расчёт модификации статистического критерия Колмогорова–Смирнова – критерия Лилиефорса для проверки нулевой гипотезы о соответствии нормальному закону распределения. Нулевая гипотеза проверяется в несколько этапов, а именно: 1) выполняется оценка дисперсии и среднего значения по выборке; 2) рассчитывается максимальное отклонение между выборочной и теоретической интегральными функциями распределения; 3) в случае, если отклонение выборочной функции распределения от теоретической является статистически значимым, тогда нулевая гипотеза отвергается.

На третьем этапе выполняется построение гистограммы распределения для p_{meas}, а именно:

1) выполняется вычисление размаха выборки R по формуле:

$$R = p_{meas_max} - p_{meas_min}, \quad (3.3)$$

где p_{meas_max} и p_{meas_min} – максимальная и минимальная величина параметра;

2) по формуле Стерджесса производится определение количества интервалов m на гистограмме, в зависимости от количества измерений n:

$$m = 1 + \log_2 n, \quad (3.4)$$

3) размах делится на равные интервалы, соответственно подбираются длины интервалов h по формуле:

$$h = R/n, \tag{3.5}$$

4) выполняется определение значений границ интервалов, начиная с первого интервала. В качестве нижней границы первого интервала выбирается величина $p_{meas_\min}$, к ней прибавляется значение h и получаются границы между первым и вторым интервалами и т.д. Верхняя граница последнего интервала совпадает с значением $p_{meas_\max}$;

5) выполняется подсчёт количества значений в каждом интервале, вычисляются частоты;

6) выполняется построение осей графика с выбранными масштабами на них;

7) на заключительном шаге выполняется построение графика гистограммы, заключающееся в нанесении границ интервалов по горизонтальной оси. Выполняется построение прямоугольников с высотами соответствующими частотам, вычисленным на пятом шаге, и ширинами равными длинам интервалов. Кроме того, в виде вертикальных линий можно построить границы поля допуска и среднее арифметическое $\overline{p}_{meas}$ измеренных значений в выборке.

На четвёртом этапе производится оценка статистических характеристик, а именно среднего выборочного μ и среднеквадратического отклонения σ, минимального $p_{meas_\min}$ и максимального $p_{meas_\max}$ значений параметра.

На пятом этапе выполняется оценка наличия и силы взаимосвязей между геометрическим параметром p_{meas} и величинами разностей углов установки лопаток до и после сборки $\gamma_{b_н}$ с использованием методов корреляций. Рассчитывается коэффициент корреляции Пирсона r по формуле:

$$r = \frac{\sum_1^n (p_{meas} - \overline{p_{meas}}) \cdot (\gamma_{b_н} - \overline{\gamma_{b_н}})}{n \cdot \sigma_p \cdot \sigma_\gamma} \tag{3.6}$$

где n – количество измеренных параметров;

σ_p, σ_γ – среднеквадратические отклонения p_{meas} и $\gamma_{b_н}$;

$\overline{p_{meas}}, \overline{\gamma_{b_н}}$ – среднее арифметическое для p_{meas} и $\gamma_{b_н}$.

Перейдём непосредственно к рассмотрению обработки результатов. Сначала будут рассмотрены результаты контроля отдельно дисков и лопаток, затем результаты контроля комплектов рабочих колёс в собранном состоянии.

3.3.1 Лопатки и диски

Для выполнения обработки результатов был написан программный скрипт в системе MATLAB. Измеренные параметры пазов диска были обработаны (экспортированы из управляющих программ в электронные таблицы) и загружены в программу. С использованием программного скрипта были вычислены отклонения δ_{as} пазов дисков. Затем отклонения δ_{as} были статистически проанализированы. Согласно тесту Лилиефорса выявлено, что отклонения параметров w_s и α_{ss} подчиняются нормальному закону распределения для первого диска, в то время как для второго – нормальному закону подчиняются только отклонения параметра α_{ss}. Данный факт свидетельствует о разлаженном процессе производства или изменении размеров (M_1) для пригонки лопаток. На рисунках 3.8, 3.9 приведены гистограммы распределения измеренных параметров.

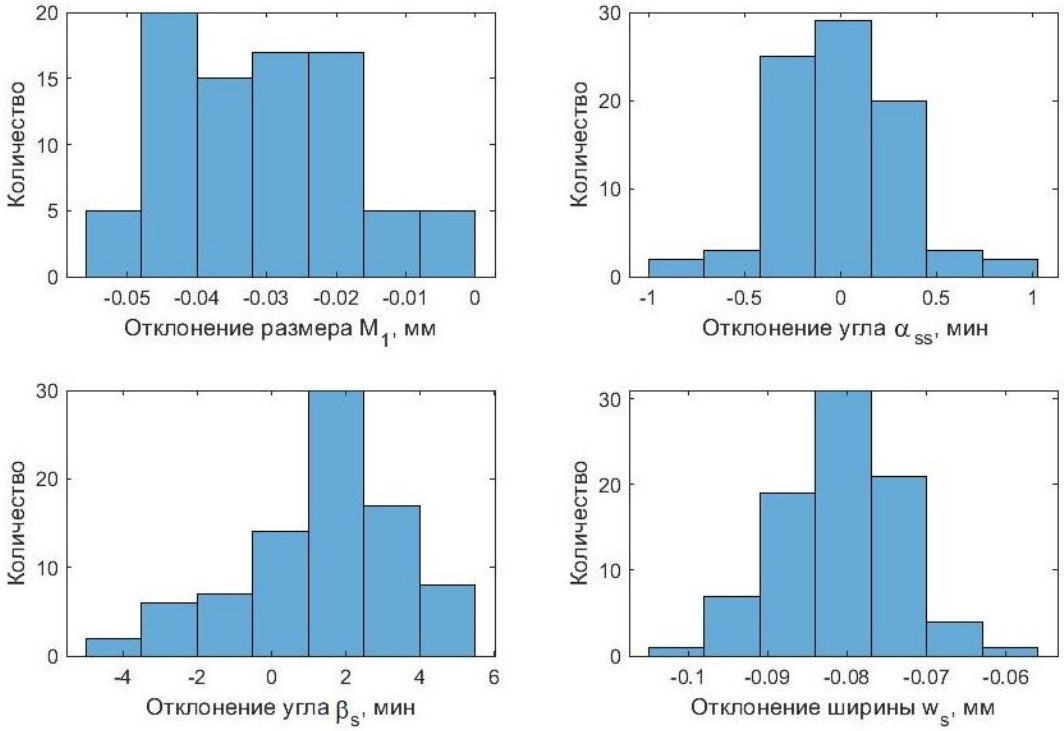


Рисунок 3.8 – Гистограммы распределения отклонений пазов первого диска

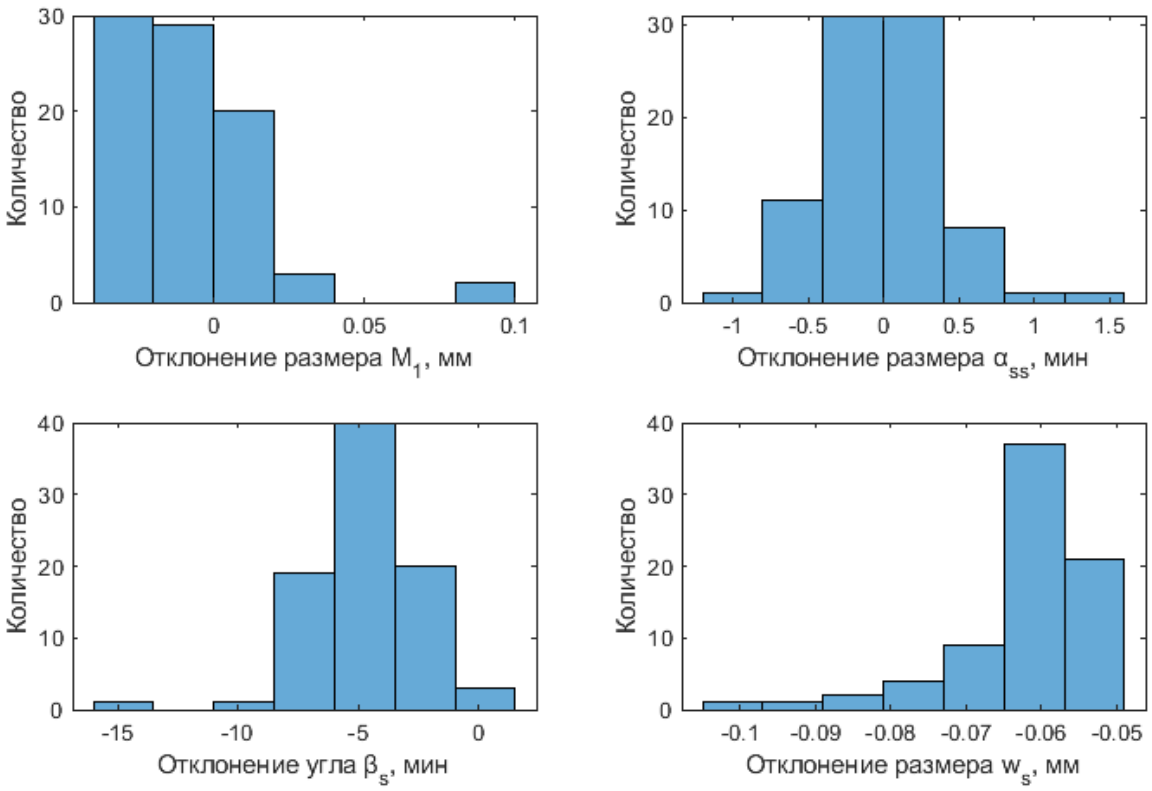


Рисунок 3.9 – Гистограммы распределения отклонений пазов второго диска

Параметры первого рабочего колеса находятся в пределах полей допусков на изготовление, для второго есть немного выходящие за поле допуска значения параметра β_s. В таблице 3.1 приведены значения минимального L_{CL}, максимального U_{CL} отклонений, а также статистических характеристик: среднее выборочное μ и среднеквадратическое отклонение σ для измеренных пазов двух дисков.

В таблице 3.2 приведены допуски на измеренные параметры.

Измеренные параметры лопаток аналогично пазам диска были обработаны и загружены в программу на MATLAB, где вычислены их отклонения от конструкторских размеров δ_{as}. Согласно тесту Лилиефорса, нормальному закону подчиняются все параметры лопаток, кроме погрешности угла установки лопаток γ_b, очевидно из-за влияния угловых погрешностей пазов β_s, суммирующихся с величиной γ_b исходя из особенностей измерения. При построении моделей значения угловой погрешности пазов β_s были вычтены с учётом знака из общих

измеренных величин углов, после чего распределение отклонений углов γ_b стало подчиняться нормальному закону распределения согласно тесту Лилиефорса.

Таблица 3.1 – Статистические значения параметров геометрических отклонений пазов диска

Параметры диска первого рабочего колеса							
δM_1, мм				$\delta\alpha_{ss}$, мин			
μ	σ	L_{CL}	U_{CL}	μ	σ	L_{CL}	U_{CL}
-0,031	0,012	-0,053	-0,004	0,008	0,339	-0,88	0,98
$\delta\beta_s$, мин				δw_s, мм			
μ	σ	L_{CL}	U_{CL}	μ	σ	L_{CL}	U_{CL}
1,320	2,161	-4,2	5,46	-0,0811	0,0076	-0,104	-0,062
Параметры диска второго рабочего колеса							
δM_1, мм				$\delta\alpha_{ss}$, мин			
μ	σ	L_{CL}	U_{CL}	μ	σ	L_{CL}	U_{CL}
-0,008	0,023	-0,038	0,099	-0,003	0,389	-1,003	1,577
$\delta\beta_s$, мин				δw_s, мм			
μ	σ	L_{CL}	U_{CL}	μ	σ	L_{CL}	U_{CL}
-4,761	2,237	-14,280	1,200	-0,062	0,01	-0,101	-0,05

Таблица 3.2 – Допуски на значения параметров пазов диска

Параметр	Допуски на размеры	
	T_-	T_+
M_1, мм	-0,08	0
β_s, мин	-5	5
α_{ss}, мин	-3	3
w_s, мм	-0,12	0,06

На рисунках 3.10, 3.11 приведены гистограммы геометрических отклонений лопаток, измеренных на КИМ, и угла, измеренного с использованием оптического угломера.

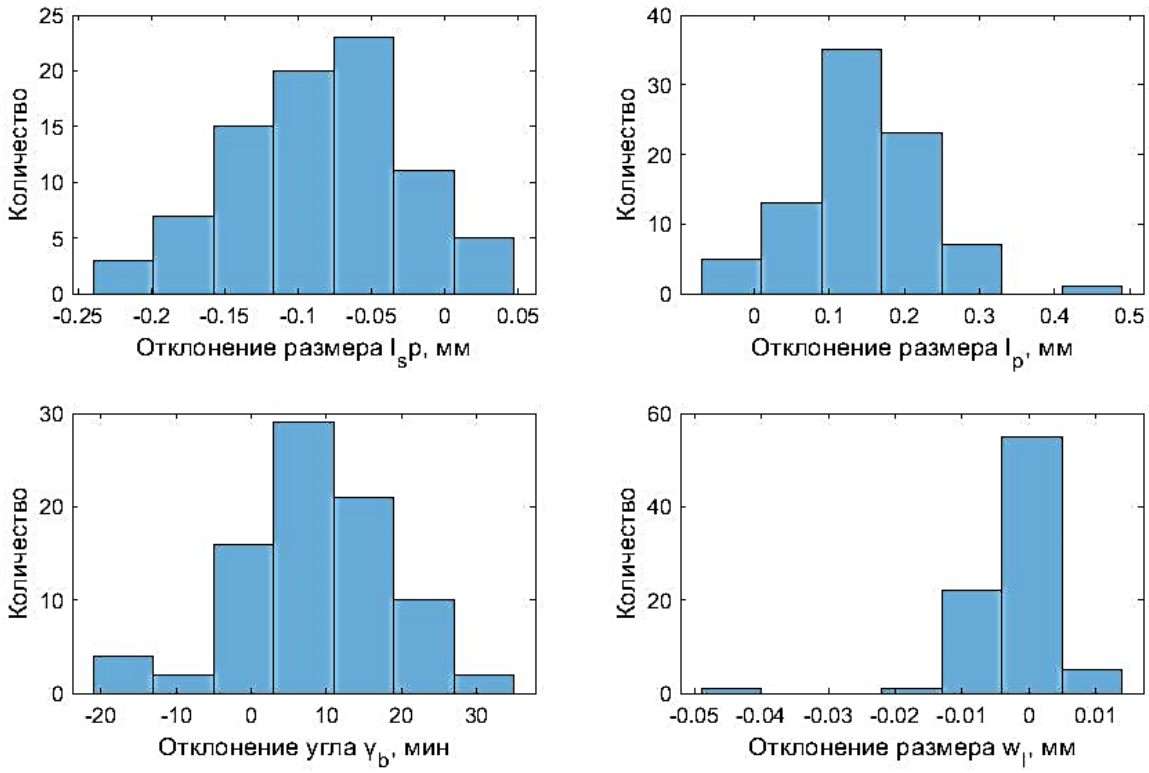


Рисунок 3.10 – Гистограммы распределения отклонений параметров лопаток первого рабочего колеса

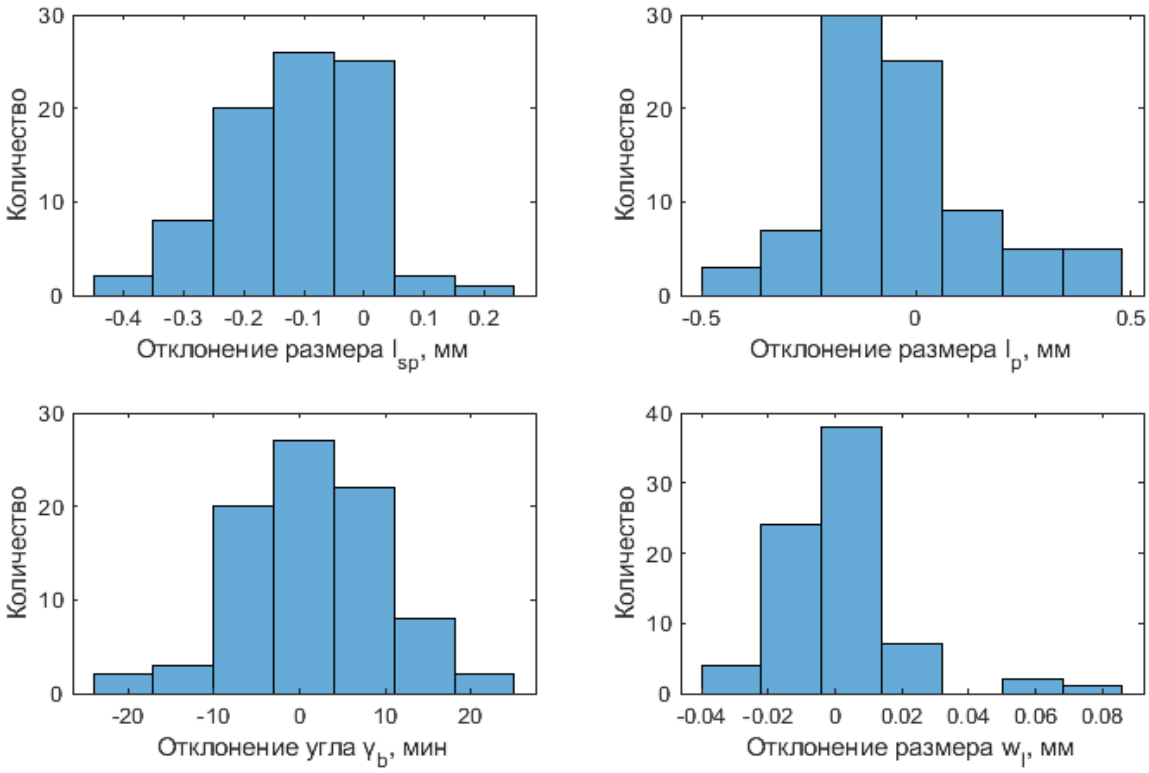


Рисунок 3.11 – Гистограммы распределения отклонений параметров лопаток второго рабочего колеса

Можно отметить, что величины отклонений параметров l_p и γ_b лопаток превышают допустимые величины в 2-3 раза. Согласно измеренным значениям w_s пазов и w_l хвостовиков в их соединении обеспечивается 100% натяг. В таблице 3.3 приведены статистические обобщения отклонений измеренных параметров, в таблице 3.4 – допуски на их изготовление.

Таблица 3.3 – Статистические значения параметров геометрических отклонений лопаток

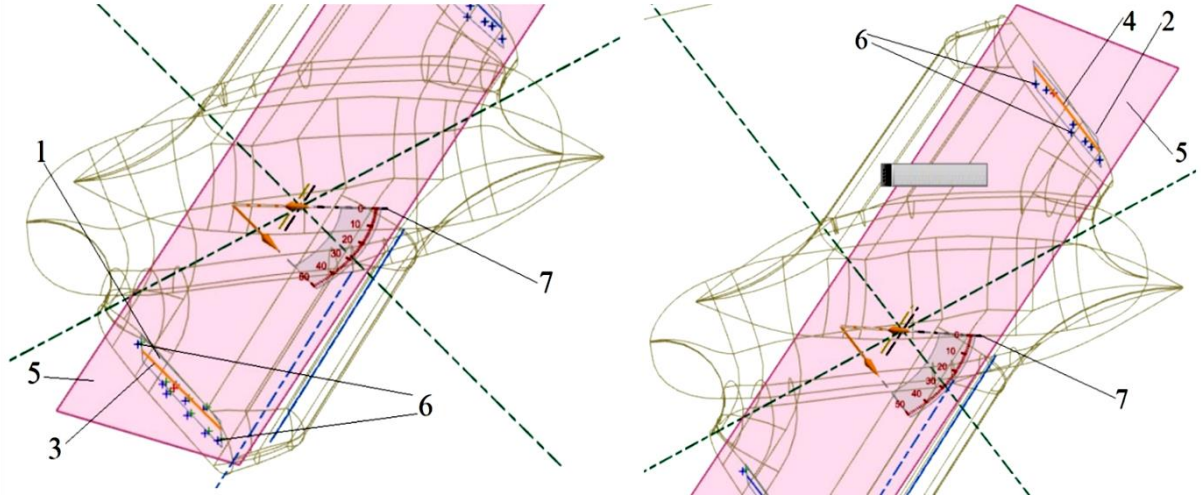
Лопатки первого комплекта рабочего колеса							
δl_{sp}, мм				δl_p, мм			
μ	σ	L_{CL}	U_{CL}	μ	σ	L_{CL}	U_{CL}
-0,085	0,058	-0,215	0,046	0,146	0,087	-0,065	0,483
δw$_l$, мм				$\delta\gamma_b$, град			
μ	σ	L_{CL}	U_{CL}	μ	σ	L_{CL}	U_{CL}
-0,002	0,007	-0,045	0,011	0,166	0,181	-0,333	0,583
Лопатки второго комплекта рабочего колеса							
δl_{sp}, мм				δl_p, мм			
μ	σ	L_{CL}	U_{CL}	μ	σ	L_{CL}	U_{CL}
-0,113	0,115	-0,430	0,228	-0,043	0,185	-0,500	0,464
δw$_l$, мм				$\delta\gamma_b$, град			
μ	σ	L_{CL}	U_{CL}	μ	σ	L_{CL}	U_{CL}
0,002	0,018	-0,039	0,082	0,028	0,145	-0,401	0,416

Таблица 3.4 – Значения допусков на размеры параметров геометрических отклонений лопаток

Параметр	Допуски на размеры	
	T_-	T_+
l_{sp}, мм	-0,1	0,15
l_p, мм	-0,1	0,15
γ_b, мин	-5	5
w_l, мм	-0,06	0,12

Так как плоскости торцов были измерены с использованием КИМ CimCore (отклонение от плоскостности не превышает 0,02 мм), были измерены углы профилей торцов в сечении на высоте 51 мм от опорной поверхности замка

относительно оси симметрии замка φ. Конструкторское значение данного угла составляет 50°. На рисунке 3.12 приведены пояснения к расчёту углов φ_p и φ_s.



а б

1, 2 – измеренные плоскости торцов; 3, 4 – линии пересечения секущей плоскости 5 на высоте 51 мм и плоскостей торцов; 6 – измеренные точки; 7 – ось симметрии хвостовика

Рисунок 3.12 – Геометрическое отображение измерения угла φ:
а) φ_p – со стороны корыта; б) φ_s – со стороны спинки

На рисунке 3.13 приведено сравнение графиков и гистограмм величин углов φ_p и φ_s для первого комплекта.

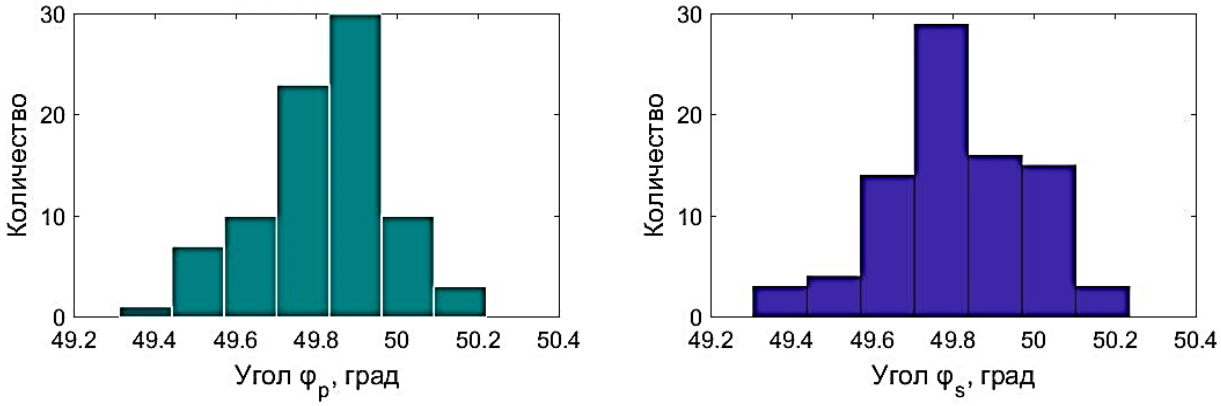


Рисунок 3.13 – Гистограммы параметра φ, измеренные со стороны корыта и спинки первого комплекта

На рисунке 3.14 приведены гистограммы распределений величин углов φ_p и φ_s для второго комплекта.

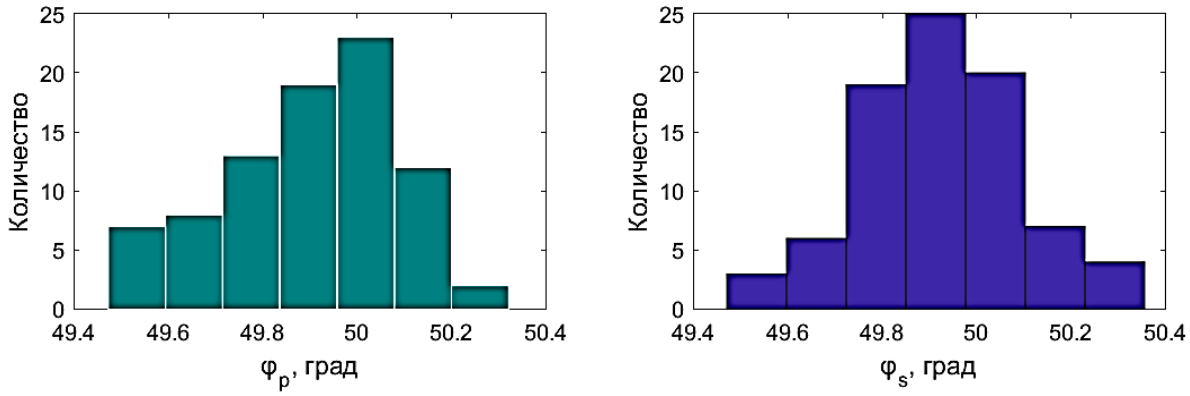


Рисунок 3.14 – Гистограммы параметра φ, измеренные со стороны корыта и спинки первого комплекта

Отклонения между двумя углами на одной лопатке довольно существенны и фактически равны величине отклонений данного параметра от конструкторского размера. Коэффициент корреляции углов на рассматриваемом комплекте лопаток равен 0,16, что говорит об отклонении от параллельности торцов после обработки. Предположение о корреляции углов φ и изменении углов установки профиля $\gamma_{b_н}$ будет проверено в следующем подразделе. В таблице 3.5 приведены статистические характеристики углов для двух комплектов.

Таблица 3.5 – Статистические характеристики углов

Лопатки первого комплекта рабочего колеса							
φ_p, град				φ_s, град			
μ	σ	L_{CL}	U_{CL}	μ	σ	L_{CL}	U_{CL}
-0,186	0,164	-0,688	0,220	-0,187	0,173	-0,696	0,235
Лопатки второго комплекта рабочего колеса							
φ_p, град				φ_s, град			
μ	σ	L_{CL}	U_{CL}	μ	σ	L_{CL}	U_{CL}
-0,101	0,183	-0,528	0,321	-0,084	0,172	-0,530	0,356

3.3.2 Сборочные параметры рабочих колёс

Измеренные разности углов установки в сборке лопаток $\gamma_{b_н}$, называемой «предварительной» (лопатки были расставлены и собраны согласно расстановке до ремонта) были статистически проанализированы.

В таблице 3.6 приведены значения минимального L_{CL}, максимального U_{CL} натягов $\gamma_{b_н}$, а также статистических характеристик: среднее выборочное $\mu_{\gamma_{b_н}}$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma_{\gamma_{b_н}}$ для двух собранных комплектов рабочих колёс.

Таблица 3.6 – Обработка результатов измерений собранного рабочего колеса до выполнения расстановки лопаток

№ комплекта	Оценка				Допуски на размеры	
	$\mu_{\gamma_{b_н}}$	$\sigma_{\gamma_{b_н}}$	L_{CL}	U_{CL}	T_-	T_+
1-й комплект	78,93	18,63	30	155	60′	160′
2-й комплект	77,8	16,58	35	110	60′	160′

Согласно пятому этапу методики, приведённой на рисунке 3.7, была выполнена оценка наличия и силы взаимосвязей между геометрическими параметрами лопаток, дисков и значениями параметра $\gamma_{b_н}$ с использованием методов корреляций. В таблице 3.7 приведены значения коэффициентов корреляции Пирсона *r*.

Таблица 3.7 – Коэффициенты корреляции между $\gamma_{b_н}$ и параметрами лопаток

№ комплекта	Параметры лопаток			
	l_{sp}	l_p	$\delta\varphi_p$	$\delta\varphi_s$
1-й комплект	0,22	-0,15	-0,10	-0,21
2-й комплект	0,26	0,15	-0,19	-0,13

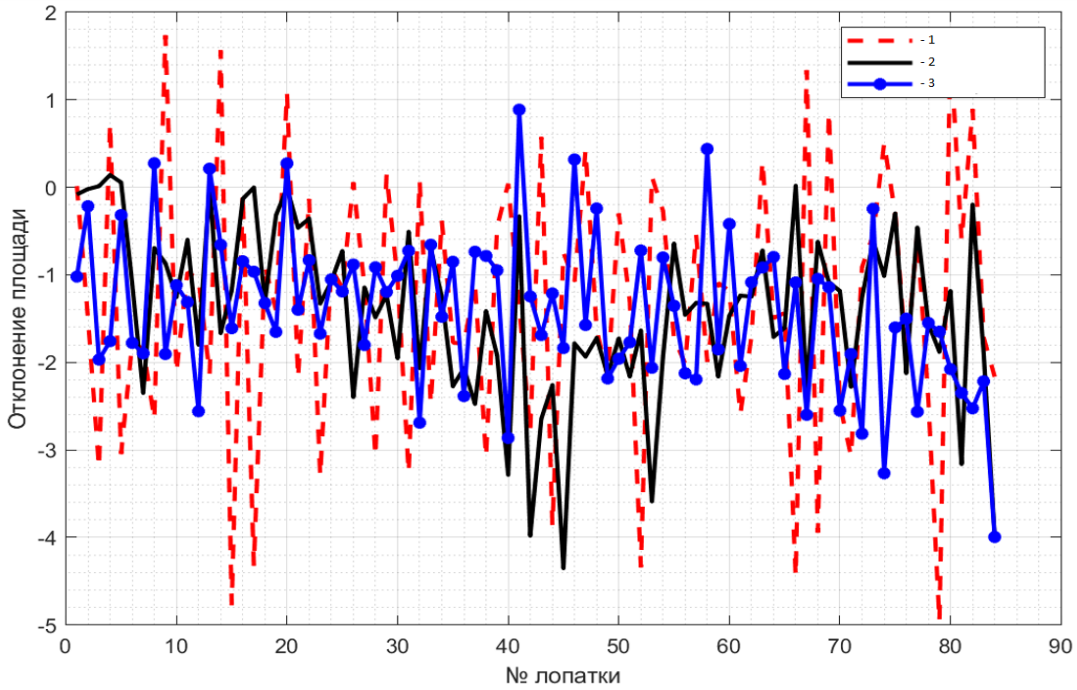
Корреляция углов $\gamma_{b_н}$ непосредственно с параметрами отклонений лопаток весьма низкая. Объясняется это тем, что на углы оказывают влияние натяги в

соседних соединениях, и, кроме того, картину натяга формирует совместный результат отклонений стыкующихся лопаток.

3.4 Формирование планов расстановки лопаток по разработанной методике сборки рабочих колёс компрессора ГТД

Было выполнено имитационное моделирование сборки диска, рассчитаны отклонения натягов со стороны антивибрационных полок до и после сборки. Расстановка лопаток проводилась без учёта погрешности пазов и с учётом погрешности пазов для первого комплекта (эксперименты 1, 2) и второго комплекта (эксперименты 3, 4). В приложениях А-Г приведены планы расстановок лопаток в экспериментах 1-4.

На рисунке 3.15 приведены графики отклонений натягов в модели от номинальной величины при предварительной сборке первого комплекта и в первом, втором экспериментах.

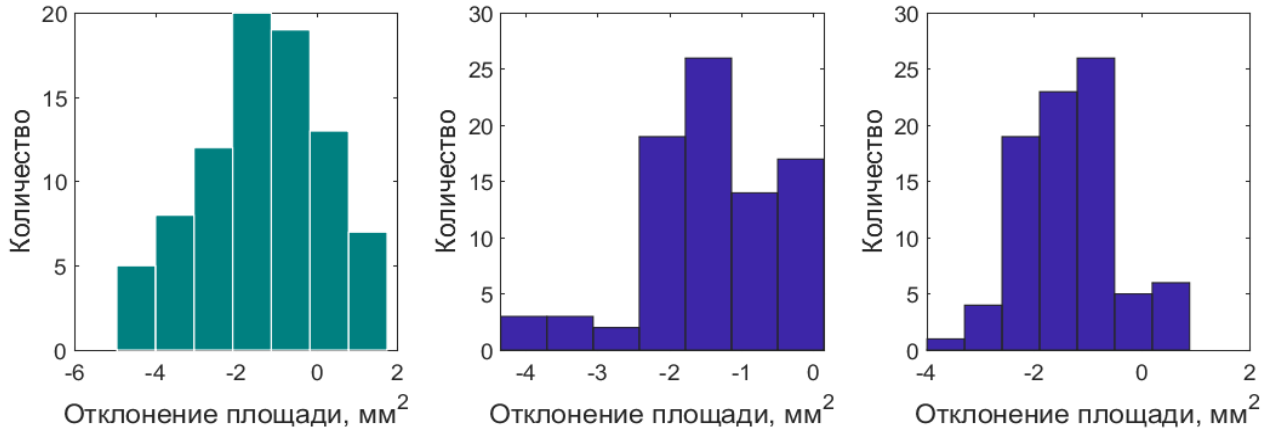


1 – предварительная сборка; 2 – первый эксперимент; 3 – второй эксперимент

Рисунок 3.15 – Результирующий график величин натягов первого комплекта

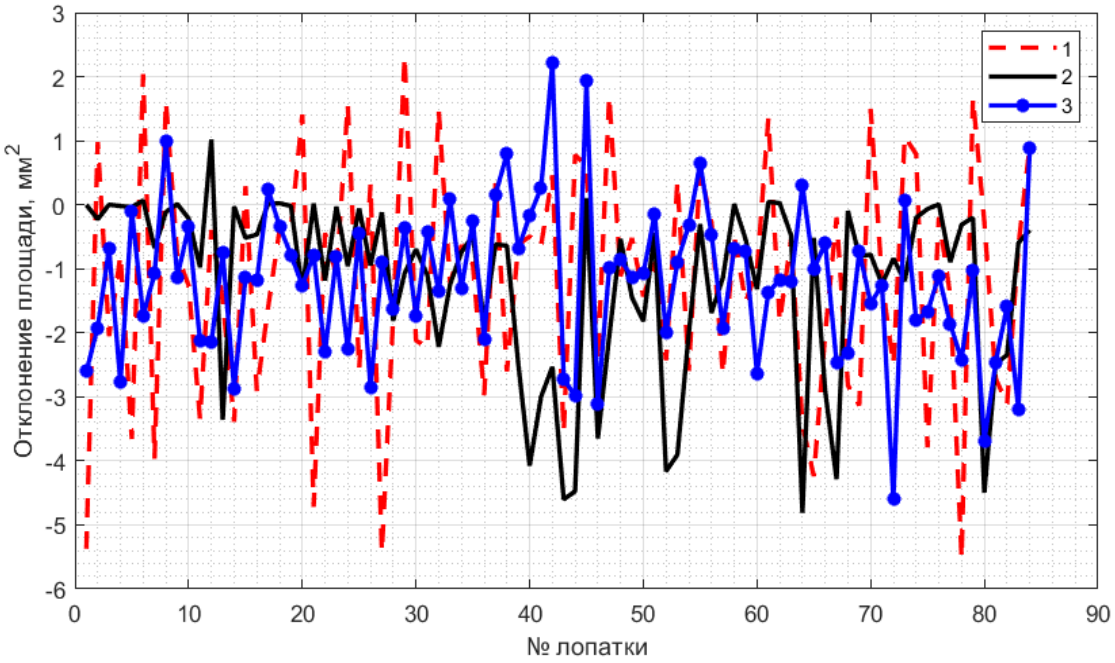
На рисунке 3.16 приведены гистограммы распределений натягов, приведённых на рисунке 3.15.

На рисунке 3.17 приведены графики отклонений натягов в модели от номинальной величины при предварительной сборке второго комплекта и в третьем и четвёртом экспериментах.



а б в

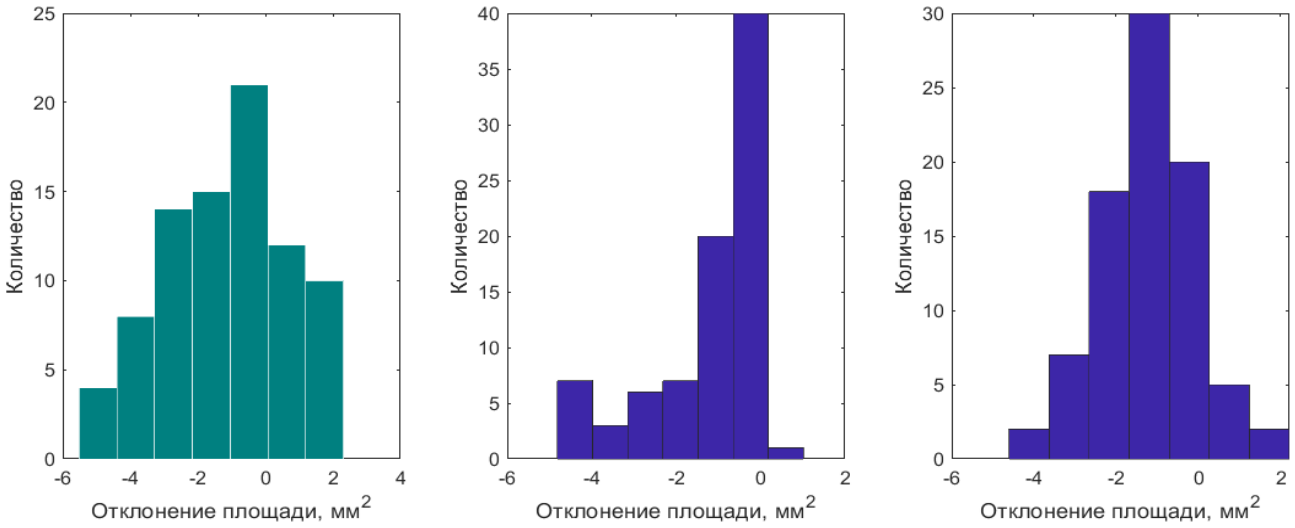
Рисунок 3.16 – Гистограммы натягов первого комплекта:
а) предварительная сборка; б) первый эксперимент; в) второй эксперимент



1 – предварительная сборка; 2 – третий эксперимент; 3 – четвёртый эксперимент

Рисунок 3.17 – Результирующий график величин натягов второго комплекта

На рисунке 3.18 приведены гистограммы распределений натягов, приведённых на рисунке 3.17.



а б в

Рисунок 3.18 – Гистограммы натягов второго комплекта:
а) предварительная сборка; б) третий эксперимент; в) четвёртый эксперимент

В таблице 3.8 приведены статистические характеристики отклонений натягов модели, характеризующих натяг, для шести проведённых виртуально сборок.

Таблица 3.8 – Статистические характеристики рассчитанных отклонений натягов (мм^2) для сборок

Параметр	Первый комплект			Второй комплект		
	Предварительная сборка	1 эксп.	2 эксп.	Предварительная сборка	3 эксп.	4 эксп.
$\mu_{\gamma_{b_н}}$	-1,400	-1,400	-1,400	-1,174	-1,173	-1,172
$\sigma_{\gamma_{b_н}}$	1,507	0,984	0,880	1,852	1,370	1,196
L_{CL}	-4,939	-4,352	-3,996	-5,518	-4,811	-4,603
U_{CL}	1,750	0,139	0,885	2,316	1,020	2,216

Теоретические расчёты позволяют говорить о вероятном превышении нижней границы поля допуска в экспериментах даже после оптимизации расстановки. Среднеквадратическое отклонение величин натягов при моделировании удалось снизить на 35–42%. Учёт погрешности пазов даёт результаты лучше, чем если не учитывать данные погрешности.

3.5 Обобщение и анализ полученных результатов сборок рабочих колёс

По технологии сборки рабочего колеса были проведены четыре сборки двух комплектов рабочих колёс согласно схемам расстановки лопаток, полученным с использованием разработанного алгоритма и модели.

Для всех сборок были выполнены измерения углов установки в свободном состоянии (лопатки установлены в чётных и нечётных пазах) и в собранном состоянии с использованием оптического угломера.

На рисунке 3.19 приведены обобщающие графики распределений углов и их разностей на двух комплектах в предварительной сборке (без использования разработанного алгоритма расстановки лопаток).

В обоих комплектах наблюдается наличие натяга в соединении ниже допустимого предела в 60 минут, что может привести к излишней вибронагруженности и вызвать разрушение лопаток.

На рисунке 3.20 приведены обобщающие графики распределений углов и их разностей для первого комплекта при расстановке лопаток с использованием разработанного алгоритма и модели в первом и втором экспериментах.

Оптимизация расстановок лопаток позволила в обоих случаях сократить рассеивание параметров. Следует отметить, что во втором эксперименте удалось существенно снизить количество углов вне поля допуска, повысив минимальный $\gamma_{b_н}$ с 30 до 55 минут.

На рисунке 3.21 приведены обобщающие графики распределений углов и их разностей для второго комплекта при расстановке лопаток с использованием разработанного алгоритма и модели в третьем и четвёртом экспериментах.

В третьем и четвёртом экспериментах наблюдается постепенное повышение средней величины натяга и снижение рассеивания по сравнению с предварительной сборкой. Четвёртый эксперимент показал лучшие результаты в сравнении с третьим экспериментом.

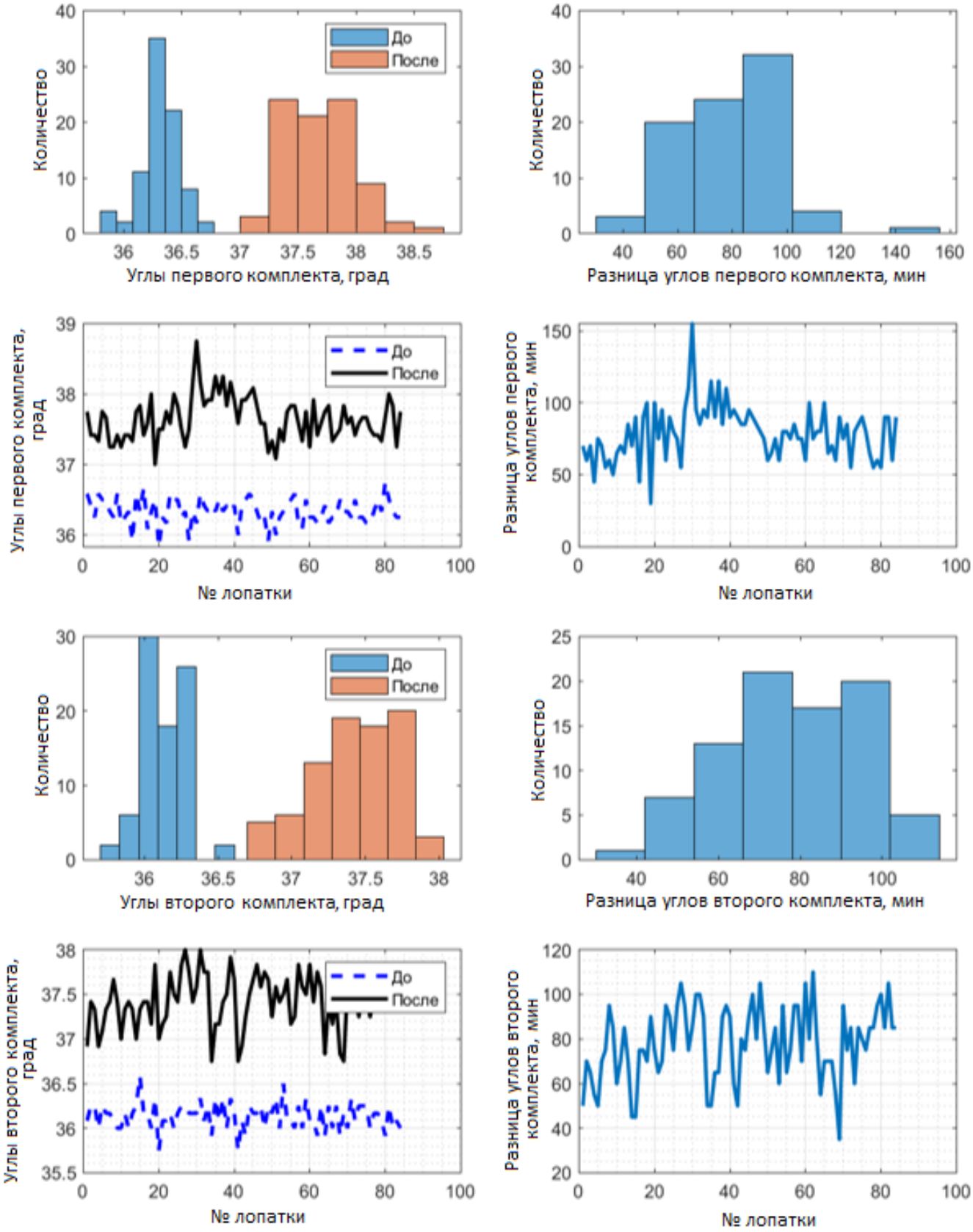


Рисунок 3.19 – Графики углов установки по результатам предварительной сборки

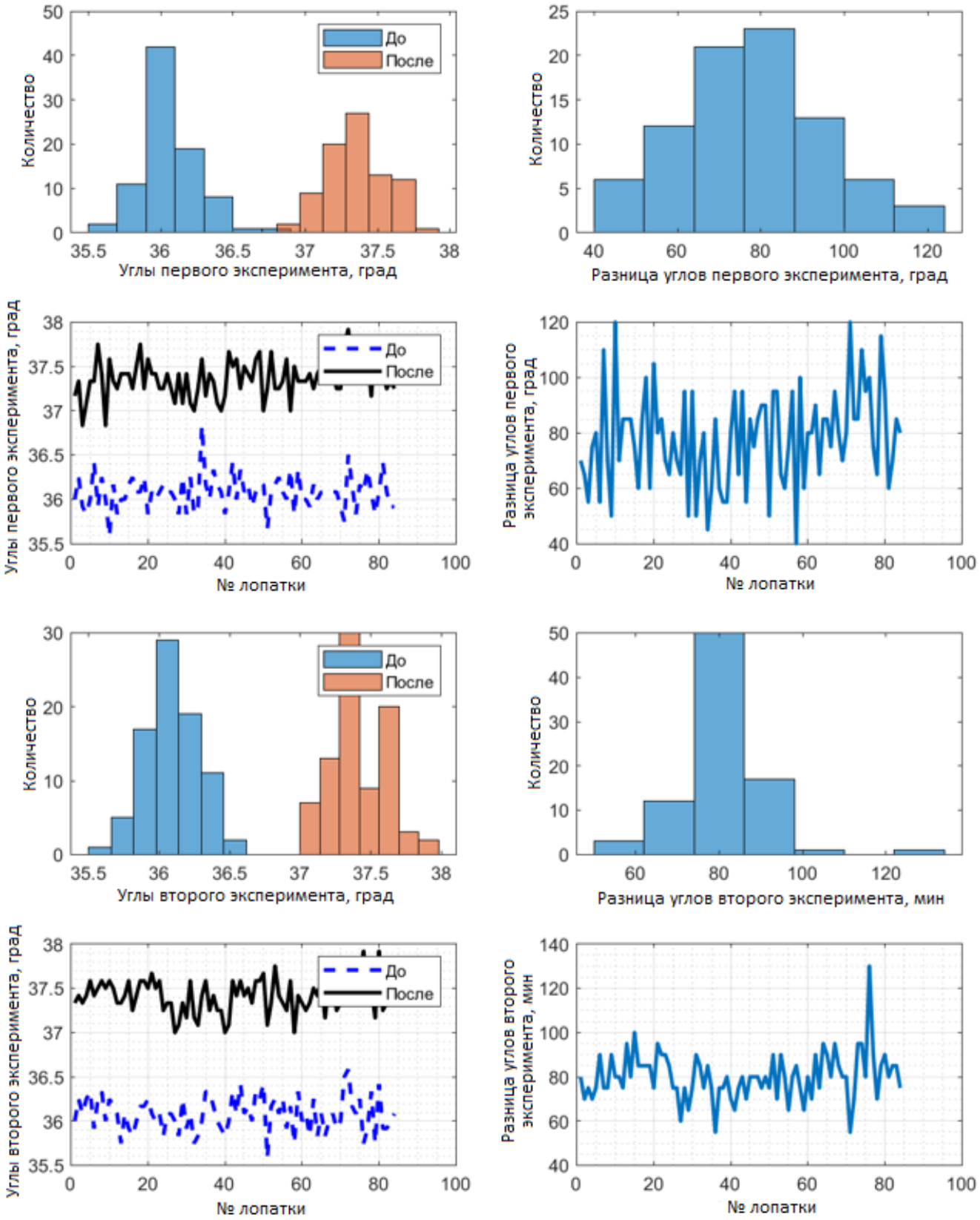


Рисунок 3.20 – Графики углов установки по результатам первого и второго экспериментов

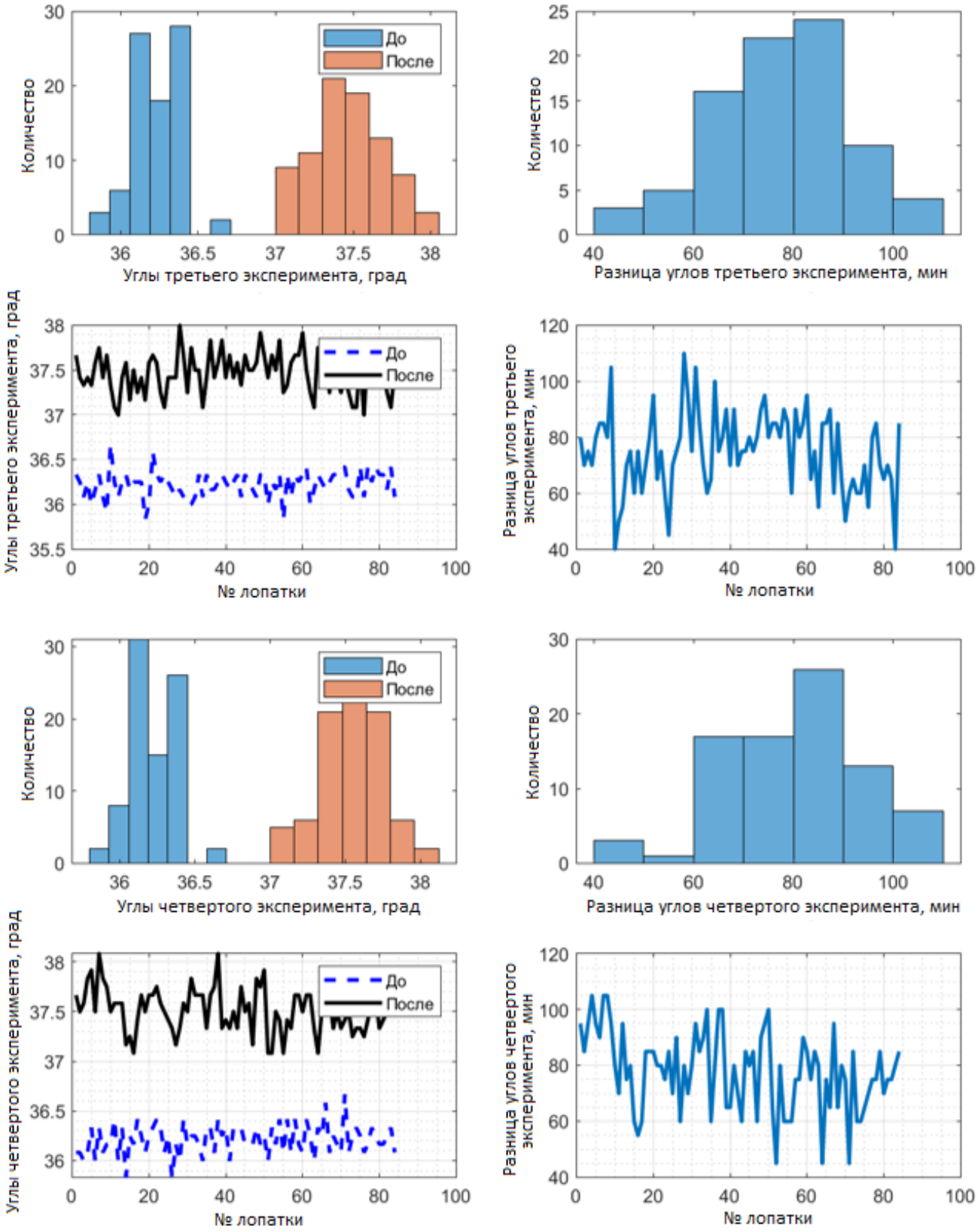


Рисунок 3.21 – Графики углов установки по результатам третьего и четвёртого экспериментов

В таблице 3.9 приведены статистические характеристики измерений углов $\gamma_{b_н}$, характеризующих натяг, для шести проведённых сборок. Кроме того, приведена доля углов $\gamma_{b_н}$, выходящих за границы поля допуска на натяг (ниже 1°).

Таблица 3.9 – Характеристики измеренных углов $\gamma_{b_н}$ (мин) для сборок

Параметр	Первый комплект			Второй комплект		
	Предварительная сборка	1 эксп.	2 эксп.	Предварительная сборка	3 эксп.	4 эксп.
$\mu_{\gamma_{b_н}}$	78,93	77,98	80,24	77,8	75	78,04
$\sigma_{\gamma_{b_н}}$	18,63	17,51	10,7	16,58	14,27	14,19
L_{CL}	30	40	55	35	40	45
U_{CL}	155	120	130	110	110	105
% не в допуске	11,9	15,5	2,4	13,1	9,5	4,8

В первом комплекте благодаря сборке по разработанному алгоритму математическое ожидание повысилось на 1,5′, среднеквадратическое отклонение снизилось с 18,63′ до 10,7′. Существенно снизилась доля лопаток, натяг которых находится ниже допустимой границы допуска: с 11,9% до 2,4%.

При сборке второго комплекта после оптимизации расстановки лопаток математическое ожидание незначительно повысилось, в то время как среднеквадратическое отклонение снизилось с 16,58′ до 14,19′. Существенно снизилась доля лопаток, лежащих ниже допустимой границы допуска: с 13,1% до 4,8%. Использование значений отклонений параметров пазов диска позволило достичь снижения величин углов $\gamma_{b_н}$, выходящих за поле допуска на 4,7 %.

Сравнивая результаты, полученные в эксперименте и при моделировании, можно отметить, что в первом эксперименте ожидалось снижение $\sigma_{\gamma_{b_н}}$ натягов на 34,7%, а получилось снижение на 6%; во втором эксперименте при моделировании $\sigma_{\gamma_{b_н}}$ снизилось на 41,6%, а на практике снижение составило 42,57%. Для третьего и четвёртого экспериментов при моделировании снижение $\sigma_{\gamma_{b_н}}$ составило 26% и 35,4% соответственно, на практике – 13,9% и 14,4%. В

среднем при моделировании результаты получаются лучше, чем в экспериментах. Расхождение можно объяснить погрешностями измерения входных и выходных параметров, а также отсутствием учёта жёсткости лопаток при моделировании. Тем не менее полученные при моделировании данные позволяют прогнозировать результаты, получаемые в реальных сборках.

3.6 Анализ снижения трудоёмкости сборок рабочих колёс

Предложенная методика дополняет технологический процесс сборки рабочих колёс тем, что процесс формирования плана расстановки лопаток производится с использованием разработанных модели и алгоритма, реализованных в программной системе. По этой причине было выполнено сравнение непосредственно времени выполнения формирования плана расстановки, сборочных и контрольных операций (этапы 2-9 технологии на рисунке 1.3, раздел 1.2.1) для двух рассматриваемых рабочих колёс.

Время, затрачиваемое на проведение одной сборки рабочего колеса, можно рассчитать по формуле:

$$t_{\text{шт}-\text{к}} = t_{\text{о}} + t_{\text{в}} + t_{\text{п.з.}}, \tag{3.7}$$

где $t_{\text{о}}$ – основное время, затрачиваемое на сборку;

$t_{\text{в}}$ – вспомогательное время (измерение углов установки, установка и перенос рабочего колеса);

$t_{\text{п.з.}}$ – подготовительно-заключительное время (ознакомление с работой, раскладка лопаток в таре согласно плану расстановки, получение инструмента). В рассматриваемом случае равно 16,8 мин.

Основное время рассчитывается по формуле:

$$t_{\text{о}} = t_{\text{сб_л}} \cdot N_{\text{л}} \cdot 2 + t_{\text{с_л}} \cdot N_{\text{л}}, \tag{3.8}$$

где $t_{\text{сб_л}}$ – среднее время для установки одной лопатки в паз (0,5 мин);

$t_{\text{с_л}}$ – среднее время для извлечения одной лопатки из паза (0,5 мин);

$N_{л}$ – количество лопаток в комплекте (84).

Как отмечалось в главе 1, каждая лопатка проходит этап сборки два раза.

Вспомогательное время рассчитывается по формуле:

$$t_{в} = t_{к_л} \cdot N_{л} \cdot 2 + t_{п} \cdot 5, \quad (3.9)$$

$t_{к_л}$ – среднее время для контроля угла установки одной лопатки (0,3 мин);

$t_{п}$ – время на перенос и установку рабочего колеса (2 мин).

Таким образом, среднее время полной сборки комплекта с контролем углов установки в свободном и собранном состоянии составило

$$t_{шт-к} = 16{,}8 + 0{,}5 \cdot 84 \cdot 2 + 0{,}5 \cdot 84 + 0{,}3 \cdot 84 \cdot 2 + 2 \cdot 5 = 203{,}2 \text{ мин.}$$

Следовательно, одна сборка рабочего колеса в цехе составляет порядка 3,4 часов. Экспериментально измерено, что процесс формирования плана расстановки от формирования таблиц с измеренными данными до выдачи отчёта составляет не более 30 мин. При проведении экспериментов, рассмотренных в главе 3 аналогичная точность расстановки (без использования разработанной методики) достигалась за 2-3 предварительные сборки.

В большинстве случаев для получения годного колеса некоторые лопатки требуют доработки или замены из другого комплекта. В связи с этим потребуется ещё одна предварительная сборка.

Согласно выполненным расчётам, от 1 до 2 часов уходит на формирование уточнённого плана расстановки специалистом-технологом без расчётов с использованием предложенного алгоритма и модели. Таким образом, трудоёмкость сборки при использовании традиционной технологии составила для первого комплекта 16,5 часов. При этом при пересборках ухудшается качество поверхностей хвостовиков и антивибрационных полок лопаток. Все расчёты по трудоёмкости приведены в таблице 3.10.

В итоге можно говорить о том, что трудоёмкость сборки рабочего колеса для достижения сходных показателей качества снижается с 12-16,5 часов до 7,1-7,2 часов, то есть на 41-56%.

Таблица 3.10 – Трудоёмкость проведения сборки для двух комплектов, минуты

Наименование работы	Существующая технология сборки РК		С применением разработанной методики	
	РК № 1	РК № 2	РК № 1	РК № 2
Формирование плана расстановки	-	-	27	22
Первая предварительная сборка	203,2	203,2	203,2	203,2
Формирование плана расстановки	105	111	-	-
Вторая предварительная сборка	203,2	203,2	-	-
Формирование плана расстановки	72	-	-	-
Третья предварительная сборка	203,2	-	-	-
Сборка после доработки лопаток	203,2	203,2	203,2	203,2
Итого	989,8	720,6	433,4	428,4

Разработанная методика сборки рабочих колёс компрессора ГТД с автоматизацией формирования схемы расстановки лопаток использовалась для улучшения производственного процесса на предприятии АО ОДК «НИИД» (Научно-исследовательский институт технологии и организации производства двигателей)» (приложение Д).

3.7 Выводы по главе 3

1. Проведены экспериментальные исследования, включающие в себя контроль основных геометрических параметров лопаток и дисков для двух комплектов рабочих колёс. Измерения параметров дисков проводились с использованием контактной КИМ DEA Global Advantage, параметры лопаток измерялись на портативной КИМ CimCore, угол установки лопаток измерялся с использованием оптического угломера.

2. Выполнена обработка измеренных данных лопаток и дисков. Выявлено, что параметры дисков находятся внутри полей допусков на их изготовление. Параметры лопаток выходят за поля допусков в 2-3 раза. При этом средняя величина ключевого параметра, влияющего на натяги в соединениях, – стыкового размера по рабочим торцам антивибрационных полок в среднем ниже на 0,1 мм середины поля допуска, что позволяет говорить о предполагаемых недостаточных натягах в соединениях лопаток при сборке.

3. Выполнены предварительные сборки двух комплектов, в которых находится соответственно 11,9 % и 13,1 % лопаток с недостаточными натягами.

4. Проведена расстановка лопаток с использованием разработанных алгоритма и модели оценки натягов для обоих комплектов, при этом были выполнены вычисления с учётом погрешности пазов и без них.

5. Выполнены сборки комплектов по планам расстановок, полученных в результате использования разработанного алгоритма и модели. В итоге величины рассеивания снизились на 43% для первого комплекта и на 14% для второго комплекта; доли лопаток, натяг которых находится ниже допустимой границы допуска, снизились до 2,4% и 4,8% для первого и второго комплектов, соответственно.

6. Использование разработанной методики позволяет снизить трудоёмкость сборки рабочего колеса на 41-56%.

ГЛАВА 4. РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМА В ВИДЕ ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЫ

Для практического использования разработанных модели определения натягов и алгоритма расстановки лопаток технологом в цехе была выполнена разработка и техническая реализация программной системы. Программная система предназначена повышения точности и снижения трудоёмкости комплектования рабочих колёс при их сборке или ремонте. Опишем этапы разработки и технической реализации программной системы.

4.1 Разработка программной системы

Разработка программной системы включает в себя разработку технического задания, формирование архитектуры системы, разработку модели данных и базы данных, а также разработку модуля интерфейса пользователя.

В процессе работы над проектом технического задания были проведены консультации со специалистами профильных предприятий, в частности с ПАО «ОДК-Кузнецов». В итоге был определён список функций, которые должна реализовывать разрабатываемая программная система, а именно:

– задание исходных данных, либо их загрузка из внешних источников;

– ручная и автоматическая расстановка лопаток в рабочем колесе;

– моделирование процесса сборки и вычисление параметров, характеризующих её качество;

– визуализация рассчитанных параметров оценки качества сборки рабочего колеса;

– сохранение результатов работы приложения в файл;

– формирование отчётов с рекомендациями по расстановке лопаток для использования в процессе сборки рабочих колёс.

Исходя из перечисленного выше списка, были формализованы входные воздействия, необходимые для выполнения программной системой заданных функций, а именно: внесение информации по геометрическим отклонениям, таким как угол установки лопаток γ_b, стыковой размер по рабочим торцам антивибрационных полок лопаток l_{sp} и l_p, значения углов между пазами дисков α_{ss} и другим параметрам. Внесение информации может быть автоматизировано при наличии базы данных, содержащих «электронные паспорта» изготавливаемых деталей.

Далее были формализованы выходные реакции, обеспечиваемые программной системой в результате выполнения своих функций: 1) визуализации входных данных в графическом интерфейсе; 2) автоматического определения оптимального варианта расстановки лопаток исходя из условия обеспечения равномерности распределения натягов; 3) возможности корректировать расстановку лопаток в ручную; 4) визуализации распределения формирующихся натягов с возможностью фиксации произвольного числа лопаток, не подлежащих перестановке в пазах диска; 5) формирования печатных отчётов с указанием оптимальных вариантов расстановки лопаток для последующего использования в процессе сборки.

Учитывая практику производства, описанные функции были дополнены численными показателями. В частности, максимальное время для автоматизированного расчёта расстановки одного комплекта лопаток после введения исходных данных – не более 5 минут.

После создания технического задания было проведено описание архитектуры разрабатываемой системы. Прототип программной системы реализован с использованием клиент-серверной архитектуры, конкретнее – парадигмы MVC (Model-View-Controller), при которой производится разделение данных на компоненты: модель, представление и контроллер. Этот подход делает программную систему расширяемой, так как модификация каждого компонента

осуществляется независимо. На рисунке 4.1 приведена схема разработанной архитектуры программной системы.

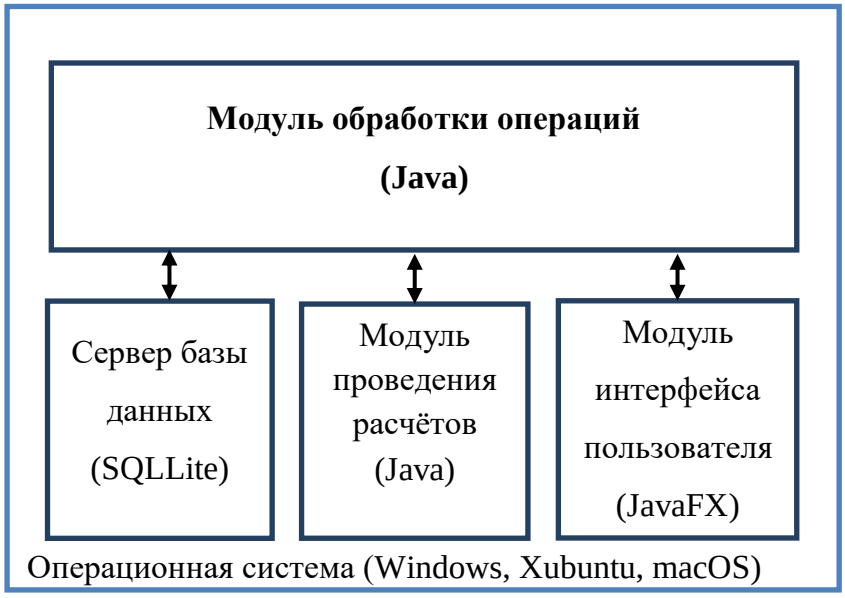


Рисунок 4.1 – Архитектура разработанной программной системы

Серверная часть должна содержать модуль работы с базой данных, модуль получения запросов с клиентской части и отправки ответов. Серверная и клиентская части могут функционировать под управлением любой операционной системы, то есть являются кроссплатформенными.

Клиентская часть системы функционирует на персональных компьютерах непосредственно в местах проведения сборочных работ, содержит графический пользовательский интерфейс и модуль отправки запросов на сервер и получения ответов. Клиентская часть реализована на языке JAVA с применением JavaFX – платформы для создания GUI (графического интерфейса пользователя).

Модуль проведения расчётов, функционирующий в составе серверной части, реализуется на языке JAVA. Модуль, осуществляющий взаимодействие между клиентом и сервером, также реализован на языке JAVA.

На серверной части находится модуль обращения к базе данных (SQLLite), в которой содержатся данные по лопаткам, дискам и их геометрическим отклонениям. Для решения задач объектно-реляционного отображения (управления сохранением JAVA объектов в таблицы реляционных баз данных) в

разрабатываемом модуле используется библиотека Hibernate, реализующая спецификацию JPA (Java Persistence API).

После разработки архитектуры программной системы были определены интегрированные среды разработки (IDE): компонент сервера и клиентской части. Для модулей серверной и клиентской части системы используется среда IntelliJ IDEA. Для удобства редактирования дизайна GUI приложения используется Scene Builder – визуальный инструмент создания и редактирования для JavaFX.

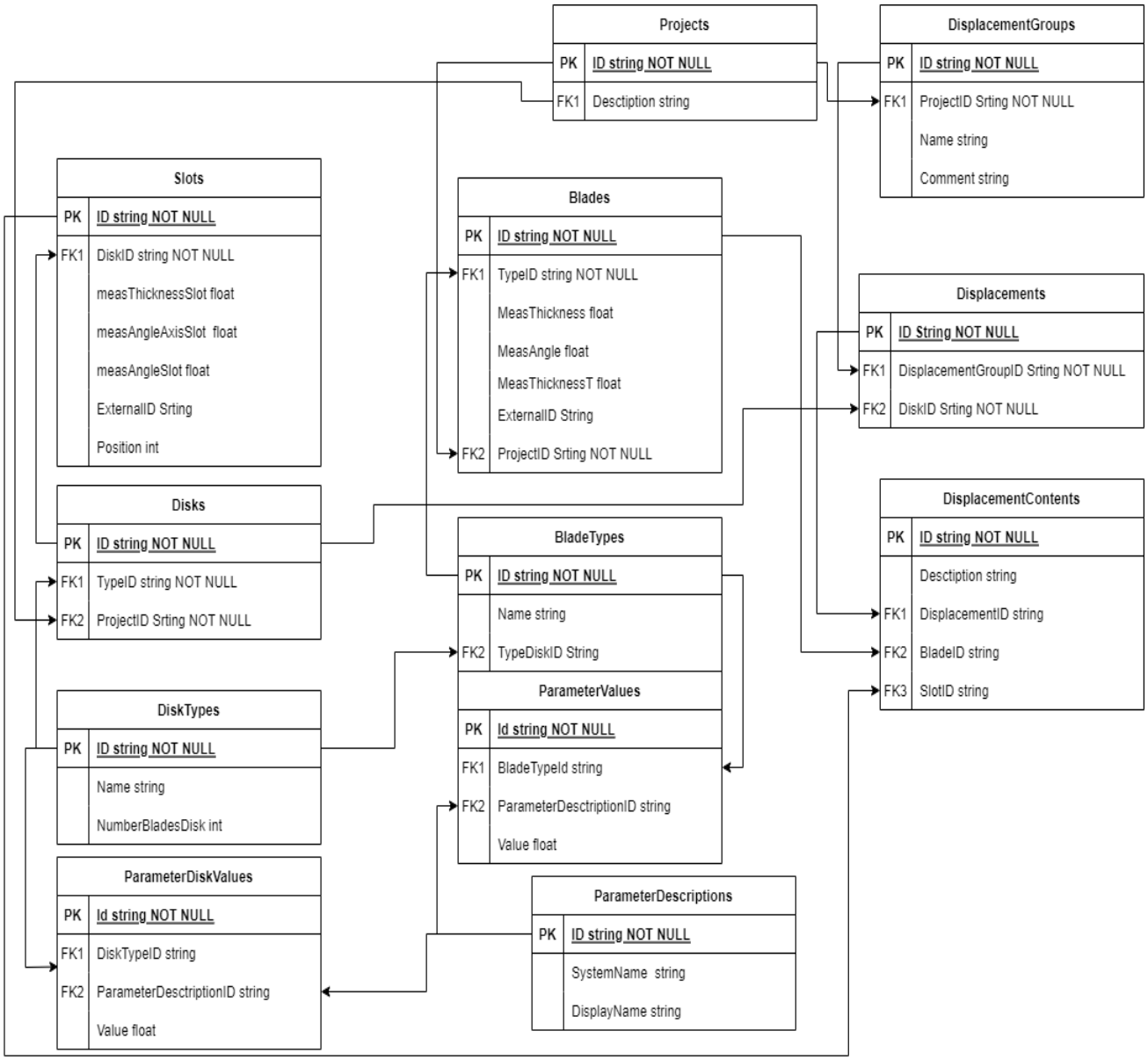


Рисунок 4.2 – ER-диаграмма базы данных системы

Неотъемлемой составляющей программной системы также являются модель данных и база данных, поскольку используемая в ходе работы информация хранится в реляционной базе данных. На рисунке 4.2 приведена ER-диаграмма (сущность-связь) спроектированной для системы базы данных.

Модель данных содержит двенадцать сущностей, которые могут быть реализованы в виде таблиц будущей базы данных. Каждый экземпляр сущности содержит уникальный идентификатор ID, данное поле не будем описывать у каждой сущности, так как оно у неё есть по умолчанию.

Сущность *Projects* отвечает за хранение информации о названии проекта, её идентификатор. Имеет поле *Desctiption* (описание) для записи.

Сущность *ParameterDescriptions* отвечает за хранение поясняющей информации по каждому из конструкторских параметров для дисков и лопаток. Имеет два поля: *SystemName* (системное имя параметра) и *DisplayName* (отображаемое для пользователя имя параметра).

Сущности *DiskTypes* и *BladeTypes* хранят названия видов дисков и лопаток соответственно. У сущности *DiskTypes* два поля: *Name* (имя) и *NumberBladesDisk* (количество лопаток в этом виде диска). Сущность *BladeTypes* имеет так же два поля: *Name* (имя) и *TypeDiskID* (идентификатор соответствующей записи из *DiskTypes*). Тип связи между *DiskTypes* и *BladeTypes* – один ко многим.

Сущности *ParameterDiskValues* и *ParameterValues* хранят значения конструкторских параметров для дисков и лопаток соответственно. У сущности *ParameterDiskValues* три поля: *DiskTypeID* (идентификатор соответствующей записи из *DiskTypes*), *ParameterDesctriptionID* (идентификатор соответствующей записи из *ParameterDescriptions*) и *Value* – значение параметра для диска. У сущности *ParameterValues* так же три поля, поля *ParameterDesctriptionID* и *Value* аналогичны *ParameterDiskValues* и есть поле *BladeTypeID* (идентификатор соответствующей записи из *BladeTypes*).

Сущность *Disks* хранит идентификаторы записей сущностей *DiskTypes* (*TypeID*) и *Projects* (*ProjectID*) показывая какие и сколько дисков находятся в соответствующем проекте.

Сущность *Slots* хранит информацию по каждому пазу каждого диска в соответствующем проекте. Имеет поля: *DiskID* (идентификатор соответствующей записи из *Disks*), *measThicknessSlot* (ширина паза w_s), *measAngleAxisSlot* (угол разворота паза β_s), *measAngleSlot* (величина угла деления паза α_{ss}), *ExternalID* (уникальный внешний номер паза в диске, при наличии), *Position* (порядковый номер паза в диске).

Сущность *Blades* хранит информацию по каждой лопатке в соответствующем проекте. Содержит поля: *TypeID* (идентификатор соответствующей записи из *BladeTypes*), *MeasThickness* (стыковой размер по рабочим торцам антивибрационных полок лопатки l_{sp}), *MeasAngle* (угол касательной к профилю в контрольном сечении в свободном состоянии γ_b), *MeasThicknessT* (расстояние от центра до рабочего торца со стороны корыта l_p), *ExternalID* (уникальный внешний номер лопатки), *ProjectID* (ID соответствующей записи в сущности *Projects*).

Сущность *DisplacementGroups* представляет собой группу расстановок лопаток в одном или нескольких дисках. Содержит поля: *ProjectID* (ID соответствующей записи в сущности *Projects*), *Name* (название группы), *Comment* (комментарий, дополнительная информация по группе).

Каждая запись в сущности *Displacements* хранит информацию об идентификаторе ID сущности *DisplacementGroups* (поле *DisplacementGroupID*) и идентификаторе ID сущности *Disks* (поле *DiskID*), связывая таким образом группу расстановок с входящими в неё дисками.

Сущность *DisplacementContents* показывает, какая лопатка в каком пазе стоит в конкретной группе расстановок. Имеет поля: *Desctiption* (текстовое описание), *DisplacementID* (идентификатор соответствующей записи из *Displacements*), *BladeID* (идентификатор лопатки из *Blades*), *SlotID* (идентификатор паза из *Slots*).

Исходя из разработанной модели данных программной системы, была подобрана система управления базами данных (СУБД) для её реализации. В

качестве СУБД для реализации базы данных была выбрана SQLLite. База данных имеет формат в виде одного файла, с которым можно работать на любой платформе. Соответственно, скорость и производительность работы с базой данных повышается. Данная СУБД была выбрана по причине того, что она не имеет сервера и позволяет хранить всю базу локально на одном компьютере, на котором установлена система, что при необходимости позволит сохранить секретность для режимных двигателестроительных предприятий.

Для взаимодействия пользователя с составляющими программной системы разрабатывается модуль интерфейса пользователя, который является также важной составляющей программной системы, поскольку от правильности интерфейса будет зависеть работа пользователя с системой и качество выполненной работы.

Модуль интерфейса пользователя включает в себя: *.fxml файлы и файлы для стилей *.css; изображения для форм (логотип продукта); контроллеры для обработки событий, происходящих на элементах форм FXML; классы для обеспечения визуализации интерактивных меню (появляющихся при нажатии на правую кнопку мыши); класс прокси-сервера со вспомогательными классами, через которые проходят все запросы и приходят ответы на контроллеры интерфейса.

Как отмечалось в разделе 4.1, разработка дизайна файлов FXML велась в Scene Builder.

4.2 Описание работы программной системы

Система является кроссплатформенной и может быть установлена на любой операционной системе (Windows, Linux и MacOS).

При запуске программы появляется окно с пустым проектом.

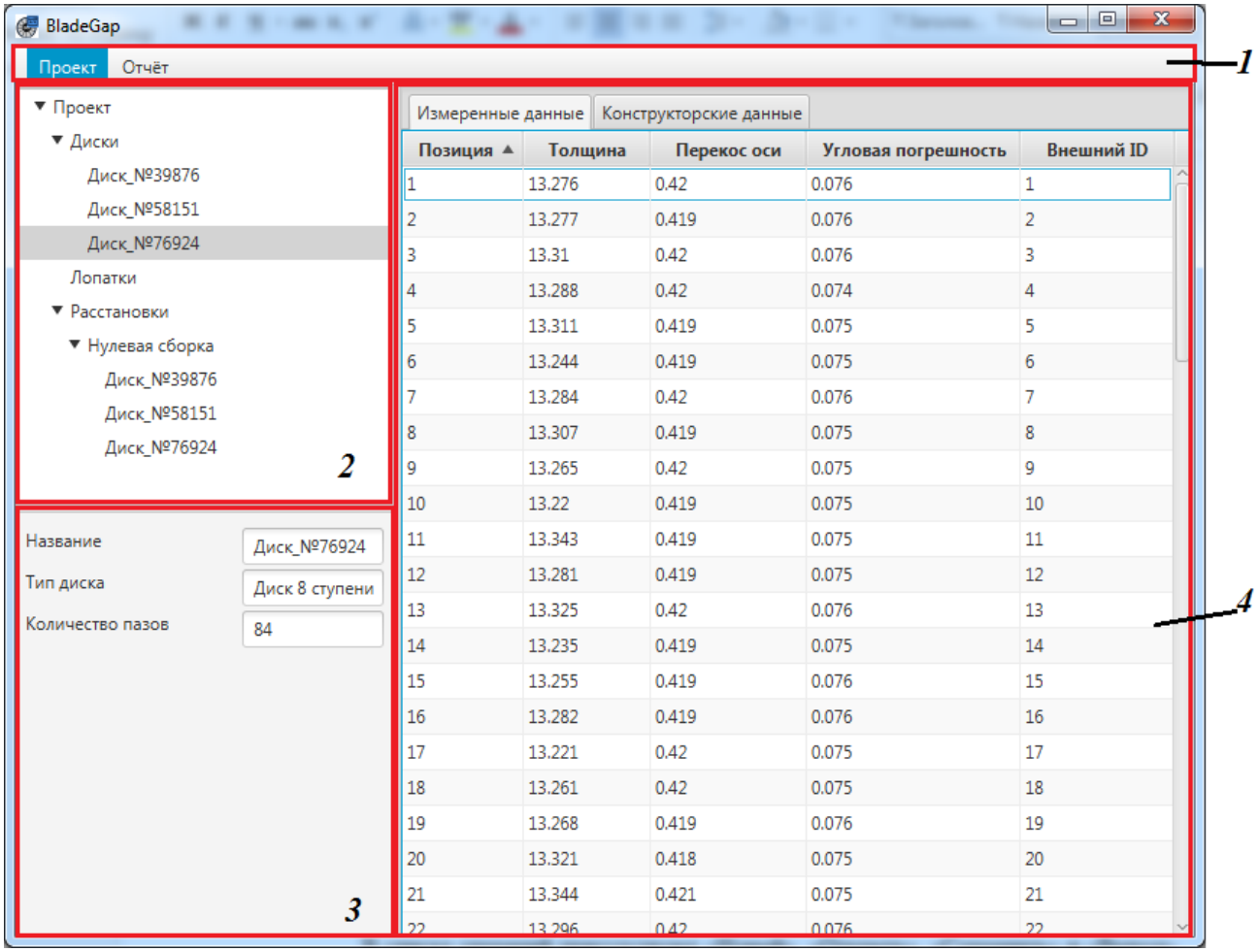
В интерфейсе программы есть верхняя панель инструментов, где находится список доступных операций над проектом, а также кнопка формирования отчёта.

В списке операций присутствуют «Новый», «Открыть», «Сохранить» и «Выход», то есть пользователь может создать новый проект, открыть существующий проект для редактирования, сохранить изменения в проекте и выйти из программы.

Кроме панели инструментов есть окно дерева проекта, корневыми элементами которого являются «Проект», «Диски», «Лопатки» и «Расстановки».

При нажатии на кнопку «Открыть» появляется список доступных проектов, хранящихся в базе данных.

При выборе проекта загружаются данные по нему. Страница проекта, кроме панели инструментов и дерева проекта, содержит ещё две ключевых области, обозначенные на рисунке 4.3 цифрами 3-4.



Позиция	Толщина	Перекос оси	Угловая погрешность	Внешний ID
1	13.276	0.42	0.076	1
2	13.277	0.419	0.076	2
3	13.31	0.42	0.076	3
4	13.288	0.42	0.074	4
5	13.311	0.419	0.075	5
6	13.244	0.419	0.075	6
7	13.284	0.42	0.076	7
8	13.307	0.419	0.075	8
9	13.265	0.42	0.075	9
10	13.22	0.419	0.075	10
11	13.343	0.419	0.075	11
12	13.281	0.419	0.075	12
13	13.325	0.42	0.076	13
14	13.235	0.419	0.075	14
15	13.255	0.419	0.076	15
16	13.282	0.419	0.076	16
17	13.221	0.42	0.075	17
18	13.261	0.42	0.075	18
19	13.268	0.419	0.076	19
20	13.321	0.418	0.075	20
21	13.344	0.421	0.075	21
22	13.296	0.42	0.076	22

1 – панель инструментов; 2 – дерево проекта; 3 – свойства элемента дерева; 4 – числовые и графические данные

Рисунок 4.3 – Загруженный проект:

Область 3 на рисунке 4.3 представляет собой набор свойств элемента дерева. В дальнейшем будем называть эту область областью свойств. Для элемента «Проект» свойством является *название* проекта, которое можно задавать и редактировать; для элемента «Диск» свойствами являются *название* диска, которое можно редактировать; *тип диска*; *количество пазов* в диске. Для элемента «Лопатки» свойствами являются тип лопатки; количество лопаток в проекте; количество свободных лопаток, не находящихся ни в одном комплекте. В дочерних элементах «*Расстановки*» свойствами являются *название* и *комментарий*, которые можно редактировать.

Область 4 содержит измеренные и конструкторские данные по дискам и лопаткам, а также сборочные результаты (натяги), график и гистограмму распределения натягов в каждом комплекте. В дальнейшем будем её называть областью данных.

Действиями пользователя внутри проекта являются: добавление нового диска или группы лопаток; загрузка измеренных данных по дискам и лопаткам; комплектация лопаток по дискам (ручная); удаление выбранного диска или лопаток; работа с расстановками (дублирование, удаление, выполнение расстановки и экспорт отчёта); расчёт углов по величинам натягов. Опишем рассмотренные этапы работы в проекте.

При нажатии левой кнопки мыши на корневом элементе «*Диски*» появляется возможность «*Добавить диск*».

Название диска по умолчанию «*Новый диск*», это название можно редактировать. При нажатии левой кнопки мыши на конкретный диск в дереве проекта появляется доступные операции над ним: «*Удалить диск*» и «*Импорт результатов измерения диска*».

До импорта результатов измерения диска раздел области данных – «Измеренные данные» – является не заполненным. Конструкторские данные отражают конструкторские параметры диска, загруженные из базы данных (рисунок 4.4).

Импорт данных осуществляется из файла *.xlsx с помощью использования кнопки радиального меню «*Импорт результатов измерения диска*», в результате чего заполняется вкладка «*Измеренные данные*» раздела области данных (рисунок 4.5).

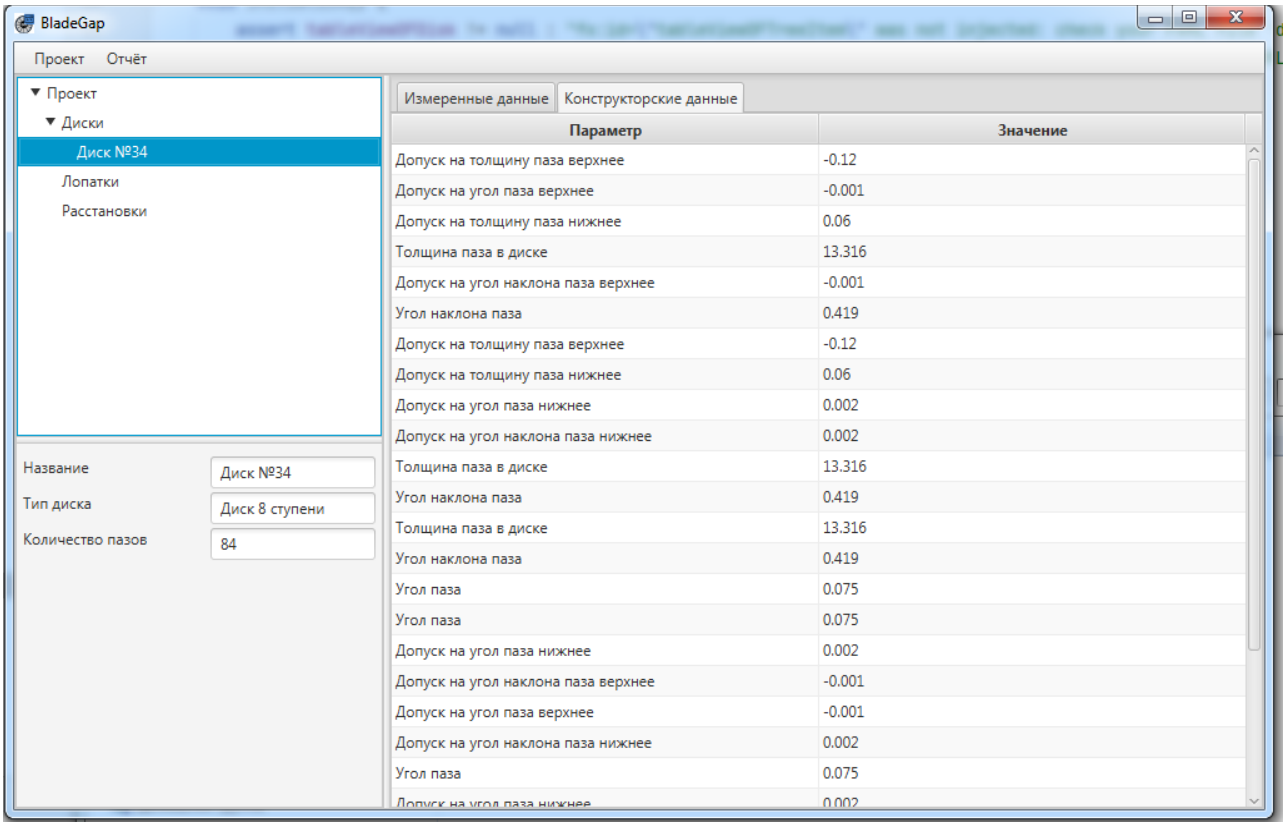


Рисунок 4.4 – Вкладка «Конструкторские данные» для диска

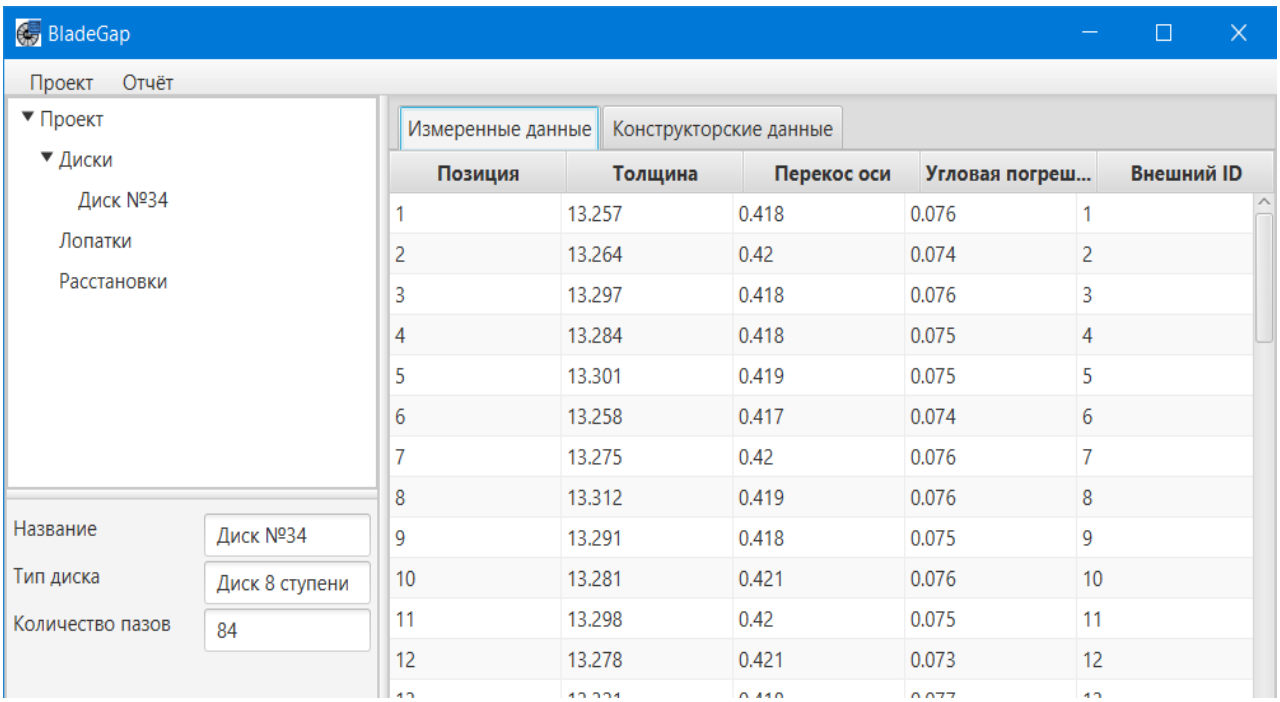


Рисунок 4.5 – Заполнение вкладки «Измеренные данные» для диска

Корневой элемент «*Лопатки*», изначально пустой в проекте, заполняется элементами при выборе кнопки радиального меню «*Добавить лопатки*». При этом в возникающем окне диалога можно выбрать, сколько новых лопаток требуется добавить в проект.

После добавления требуемого количества лопаток во вкладке «*Измеренные данные*» области данных появляется такое же количество незаполненных строк. При нажатии на кнопку радиального меню «*Импорт результатов измерения лопаток*» появляется файловый менеджер, с помощью которого выбирается нужный файл *.xlsx и производится импорт измеренных данных по лопаткам.

На вкладке «*Конструкторские данные*» области данных содержится список конструкторских размеров и допусков, загруженных из базы данных (рисунок 4.6).

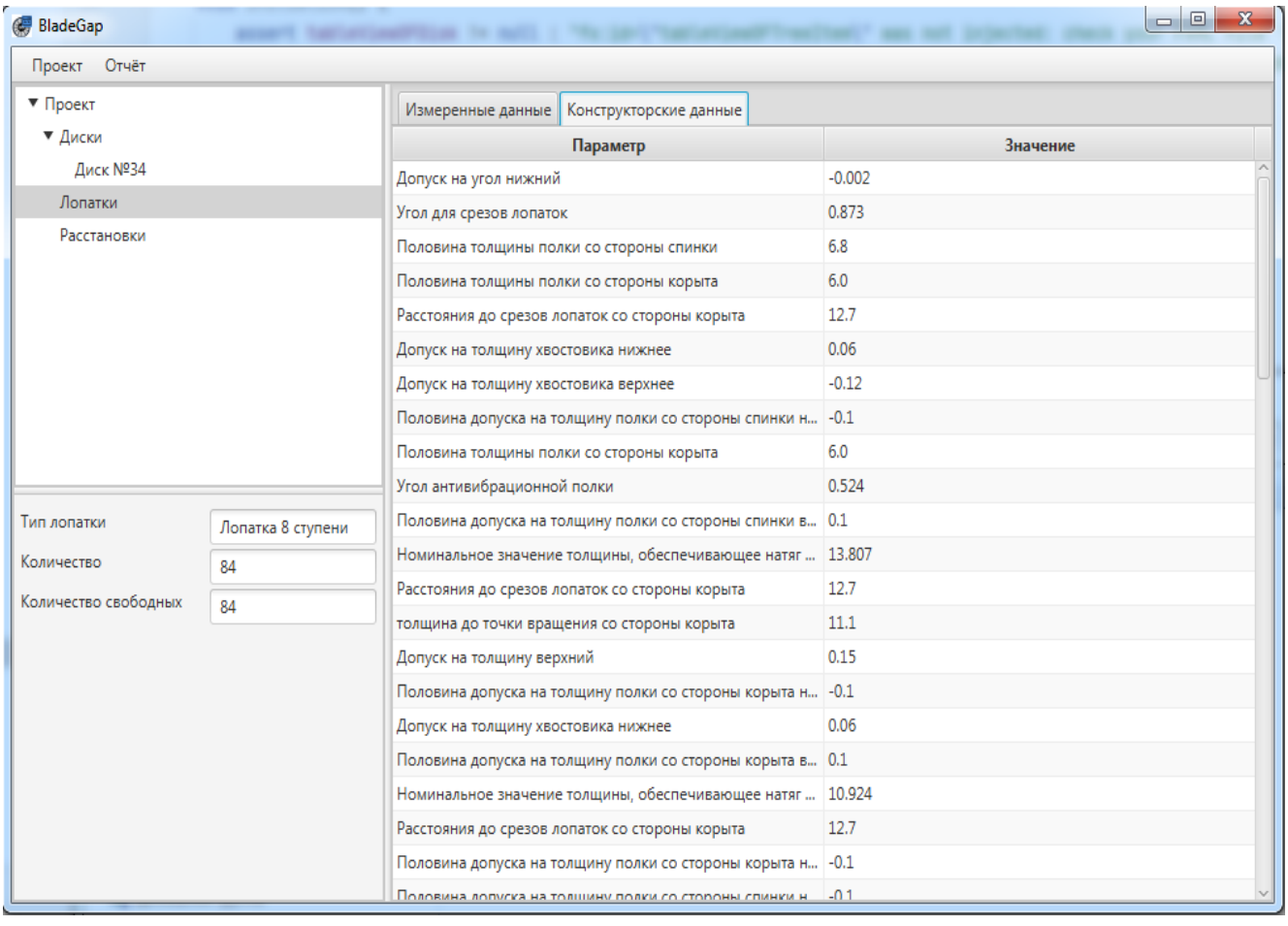


Рисунок 4.6 – Вкладка «Конструкторские данные» для лопаток

После того, как в проекте создан хотя бы один диск и необходимое для его комплектации количество лопаток, можно создавать комплекты (заполнять дочерними элементами элемент дерева «*Расстановки*»).

Для создания расстановок (проведения комплектации) выбирается элемент дерева «*Расстановки*», и при нажатии на правую кнопку мыши из контекстного меню выбирается команда «*Провести комплектацию дисков*». В дереве будет создан элемент «*Предварительная расстановка*» (название расстановки можно изменить) с дочерними элементами, количество которых равно количеству дисков в проекте. К дискам в комплекты присоединяются имеющиеся в проекте лопатки случайным образом (по порядку).

Все сборочные комплекты объединены в группы расстановок. Группу расстановок можно дублировать, удалить, а также можно выполнить оптимальную расстановку лопаток в комплектах или сформировать и экспортировать отчёт. Данные опции доступны из контекстного меню, которое появляется при нажатии правой кнопки мыши на выделенном элементе дерева.

Кнопка «*Расставить лопатки*» доступна как для всей группы, так и для каждой отдельной расстановки в группе. При этом в области данных появляется информация по натягам в соединениях лопаток на двух вкладках – «*Числовая информация*» и «*Графическая информация*». Натяги рассчитываются с использованием разработанной математической модели.

Для проверки времени выполнения операции расстановки были выполнены тестовые испытания. Испытания проводились на компьютере с процессором Intel Core i5-3470 (количество ядер 4, тактовая частота процессора 3,2 ГГц) и оперативной памятью 16 ГБ с операционной системой Windows 7. Были выполнены 30 расстановок, максимальное время выполнения операции составило 38 мс, максимальная загрузка процессора составила 0,7%.

В группе расстановок может быть элемент «*СВОБОДНЫЕ ЛОПАТКИ*» с указанным количеством свободных лопаток.

Свободные лопатки в группе расстановок могут появиться по двум причинам: 1) общее количество лопаток в проекте превышает требуемое количество для комплектации всех дисков проекта; 2) лопатки были сняты с комплекта (конкретной расстановки) вручную оператором с помощью кнопки радиального меню «*Снять лопатку*».

Расстановка, в которой не хватает лопаток до полного комплекта, выделена в дереве проекта красным цветом, а пустые пазы диска расстановки – розовым цветом в области данных. Над лопатками в расстановках можно выполнять четыре действия: уже отмеченное ранее «*Снять лопатку*»; «*Установить лопатку*»; «*Отметить лопатку для замены*»; «*Поменять с отмеченной лопаткой*».

С помощью команды «*Установить лопатку*» в выбранный пустой паз расстановки устанавливается лопатка из числа свободных, выбираемых оператором в специальном диалоговом окне.

С помощью команд «*Отметить лопатку для замены*» и «*Поменять с отмеченной лопаткой*» выполняется перестановка лопаток внутри расстановки. Сначала выбирается лопатка, которая отмечается для замены; при этом паз, где установлена данная лопатка, выделяется зелёным цветом. Затем выбирается лопатка, которую надо поменять местами с отмеченной лопаткой. Лопатки меняются местами внутри расстановки.

На вкладке «*Графическая информация*» для каждой выбранной расстановки создаются два графика: 1) линейный график натягов; 2) гистограмма распределения натягов в расстановке.

Изначально лопатки в дисках расставлены не оптимально. Для снижения вариативности натягов и повышения минимальных значений в расстановке нажимается кнопка «Расставить лопатки», которая автоматически переставляет лопатки внутри расстановки по разработанной методике расстановки. Лопатки переставляются в пазах, числовая и графическая информация при этом изменяются (рисунок 4.7).

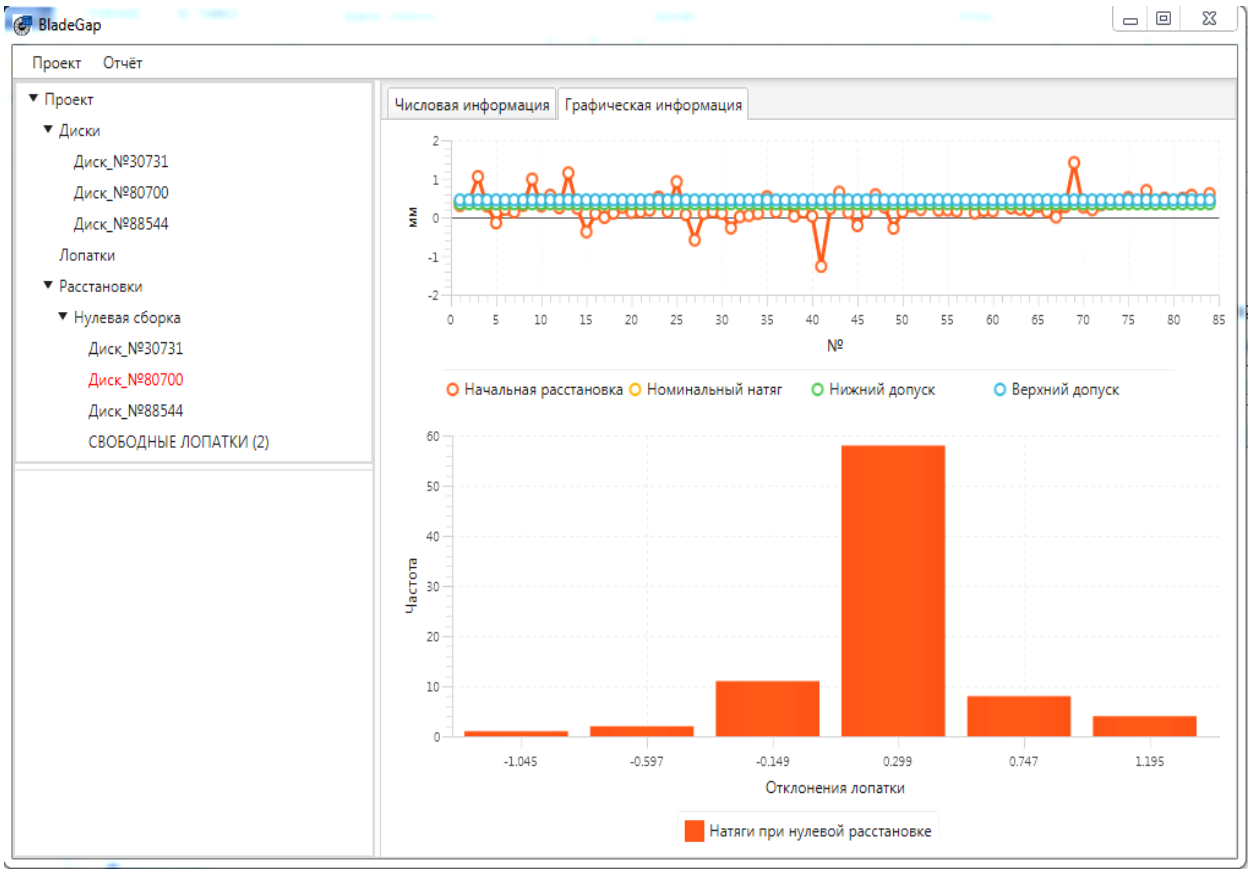


Рисунок 4.7 – Результат оптимальной расстановки лопаток на диске

Для формирования отчётов с рекомендациями по расстановке лопаток для использования в процессе сборки дисков из контекстного меню элемента выбирается действие «*Экспорт отчёта*». Указывается каталог для экспорта и название протокола. Если все прошло успешно, то появляется соответственное сообщение.

Отчёт сохраняется в формате PDF, каждая страница пронумерована, а также указывается название группы расстановок, название диска, дата и время формирования отчёта. На рисунке 4.8 приведена одна из страниц сформированного отчёта.

Отчёт также содержит информацию: номер паза, соответствующий ему уникальный номер лопатки, величины натягов (рассчитанных по разработанной модели) в мм^2: общий, со стороны корыта, со стороны спинки. В отчёт можно добавить величину изменения угла установки профиля каждой лопатки, измеренные в процессе сборки и так же характеризующие возникающий натяг.

	Название расстановки	Название диска	13 октября 2022	09:21
	Сборка 1	Диск_№30731		

№ паза	Внешний № лопатки	Натяг			Изменение угла установки профиля, град
		Общий	Со стороны корыта	Со стороны спинки	
1	850	0,304	-1,032	1,037	-2,7
2	778	0,402	-0,410	1,337	-2,5
3	824	1,055	-0,350	0,812	-2,3
4	597	0,296	-0,273	1,405	-2,7
5	691	-0,143	-0,683	0,569	-2,8
6	953	0,207	-0,209	0,540	-2,7
7	779	0,138	-0,523	0,417	-2,7
8	681	0,309	-0,017	0,661	-2,5
9	804	0,991	-0,237	0,326	-2,4
10	782	0,297	0,041	1,229	-2,7
11	185	0,571	0,045	0,257	-2,6
12	210	0,249	0,075	0,527	-2,6
13	828	1,148	0,121	0,174	-2,3
14	524	0,234	0,185	1,027	-2,7
15	493	-0,374	-0,294	0,049	-2,8
16	906	0,097	0,246	-0,080	-2,7
17	15	-0,001	0,099	-0,149	-2,7
18	544	0,109	0,270	-0,099	-2,7
19	627	0,262	0,228	-0,160	-2,7
20	370	0,124	0,314	0,034	-2,7
21	776	0,144	-0,036	-0,190	-2,7
22	253	0,186	0,390	0,180	-2,7
23	897	0,523	0,155	-0,203	-2,6
24	988	0,150	0,445	0,368	-2,7
25	76	0,922	0,460	-0,294	-2,5

Рисунок 4.8 – Первая страница отчёта с рекомендациями по расстановке лопаток для использования в процессе сборки дисков

Разработанная программная система внедрена в учебный процесс Самарского университета (приложение Е) и на предприятии ООО «Самарские турбомоторы» (приложение Ж), к ней прилагается технологическая инструкция (приложение З).

4.3 Выводы по главе 4

1. В главе представлена реализация разработанных модели и алгоритма в виде программной системы для повышения точности и снижения трудоёмкости сборки рабочих колёс компрессора ГТД.

2. Была выполнена разработка программной системы, а именно: описана последовательность и результаты разработки технического задания и выполнено проектирование архитектуры системы.

3. Проведена техническая реализация программной системы, являющейся совокупностью описания реализаций отдельных частей программной системы: базы данных; модуля обработки операций; модуля проведения расчётов; модуля интерфейса пользователя (клиентской части).

4. Выполнено описание работы с программной системой. Внедрение и использование разработанной программной системы на предприятиях, выпускающих лопаточные машины, позволит уменьшить стоимость и повысить эксплуатационный ресурс рабочих колёс компрессоров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлено решение значимой научно-технической задачи повышения точности и снижения трудоёмкости сборки рабочих колёс компрессоров ГТД за счёт разработки методики сборки с автоматизацией формирования схемы расстановки лопаток, модели оценки их оценки натягов, и алгоритма расстановки лопаток.

В процессе выполнения работы были получены следующие результаты:

1. Создана математическая модель оценки натягов по антивибрационным полкам лопаток при их сборке в рабочем колесе, её отличительной особенностью является использование данных по отклонениям геометрических параметров лопаток, пазов диска и учёт влияния соседних лопаток. Данная модель позволяет на основании результатов измерений геометрических параметров рассчитывать величины натягов.

2. Разработан алгоритм расстановки лопаток в рабочем колесе, позволяющий минимизировать рассеивание величин натягов между лопатками по антивибрационным полкам, учитывающий отклонения натяга со стороны корыта и со стороны спинки от конструкторских значений. Результаты теоретических расчётов сравнивались с данными, полученными в ходе сборок рабочих колёс по существующей на предприятии технологии. Применение алгоритма расстановки лопаток в 2 раза позволило снизить рассеивание величины натягов между лопатками, при этом величина минимального натяга повысилась, а максимального – снизилась.

3. Разработана методика сборки рабочих колёс компрессора ГТД с автоматизацией формирования схемы расстановки лопаток, отличающаяся тем, что при расстановке лопаток используются отклонения геометрических параметров лопаток, пазов диска, обобщённые в виде математической модели. Использование разработанной методики позволило сократить количество предварительных сборок в 2 раза, снизить рассеивание натягов по антивибрационным полкам, увеличить минимальную разность угла установки,

характеризующую минимальный натяг, с 30 до 55 угловых минут. В результате достигается повышение точности и снижение трудоёмкости сборочного процесса на 41-56%.

4. Проведены экспериментальные исследования по сборке рабочих колёс 8 ступени компрессора среднего давления в цеховых условиях с применением разработанной методики. Результаты теоретических расчётов показали снижение среднеквадратического отклонения натягов на 35-42%, а данные экспериментальной апробации методики – на 14-43%. Расхождение теории и эксперимента не превысило 21%.

5. Разработанная модель и алгоритм реализованы в виде программной системы на языке программирования JAVA. Предельное время, необходимое на формирование программой плана расстановки лопаток в рабочем колесе, составило 38 мс. Реализованная программная система позволяет использовать разработанную методику сборки рабочих колёс технологами авиадвигателестроительных предприятий.

Перспектива дальнейшего развития темы состоит в разработке и апробации методики комплектования лопатками нескольких рабочих колёс компрессора.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Сокращения

ГТД – газотурбинный двигатель;

КИП – контрольно-измерительное приспособление;

КИМ – координатно-измерительные машины;

СКО – среднеквадратическое отклонение;

NP – non-deterministic polynomial (англ.) – недетерминированные с полиномиальным временем;

ISO – International Organization for Standardization (англ.) – Международная организация по стандартизации;

ПОМКЛ-4 – прибор оптико-механического контроля профиля пера лопаток;

MATLAB – Matrix Laboratory (англ.) – сокращение, обозначающее пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений и одноимённый язык программирования, используемый в этом пакете.

Условные обозначения

$\gamma_{b_н}$ – разница угла установки до и после сборки;

$F_{эталон}$ – площадь горла решётки эталонных лопаток;

$f_{кор\ эталон}$ – площадь между корытом лопатки и плоскостью радиального клина;

$f_{сп\ эталон}$ – площадь между спинкой лопатки и плоскостью радиального клина;

$f_{кор\ i}$ – площадь со стороны корыта лопатки;

$f_{сп\ i}$ – площадь со стороны спинки лопатки;

l_{sp} – стыковой размер по рабочим торцам антивибрационных полок;

l_p – расстояние от центра до рабочего торца со стороны корыта;

γ_b – угол установки лопаток – угол касательной к профилю в контрольных сечениях лопаток в свободном состоянии;

w_l – ширина хвостовика;

φ_p – угол профиля торца со стороны корыта лопатки;

φ_s – угол профиля торца со стороны спинки лопатки;

M_1 – расстояние от центра диска до плоскости паза, сопрягаемой с опорной поверхностью хвостовика;

β_s – углы разворота пазов (между осью вращения диска и осями симметрии пазов);

w_s – ширина пазов диска;

h – расстояние от опорной поверхности;

α_{ss} – величина углов деления пазов;

$\delta\alpha_{ss}$ – угловая погрешность деления пазов;

$\delta\beta_s$ – погрешность угла разворота пазов (между осью вращения диска и осями симметрии пазов);

t_s – толщина полки со стороны спинки лопатки;

t_{hs} – часть толщины антивибрационной полки со стороны входной кромки до оси;

t_p – толщина полки со стороны корыта;

t_{hp} – часть толщины антивибрационной полки со стороны выходной кромки до оси;

α_s – угол среза полок;

d_s – расстояние до плоскости среза со стороны спинки лопатки;

d_p – расстояние до плоскости среза со стороны корыта лопатки;

G – натяг;

δS_{p1} – отклонение натяга со стороны корыта первой лопатки;

δS_{s2} – отклонение натяга со стороны спинки второй лопатки;

S – площадь для вычисления отклонений натягов;

d_1, d_2 – диагонали получающегося четырёхугольника;

φ – угол между диагоналями;

δS – отклонение площади, характеризующей отклонение натяга;

S_d – номинальная величина площади, характеризующей натяг;

l_{ss} – сдвиг сечения из-за угловой погрешности паза;

h_b – высота от опорной поверхности хвостовика лопатки до рассматриваемого сечения в месте антивибрационной полки;

$\vec{p}_{n1\times 2}$ – новый вектор координат;

$\vec{p}_{n\times 2}$ – вектор координат;

$\mathbf{R}_{2\times 2}$ – матрица разворота профиля;

$\vec{t}_{1\times 2}$ – вектор перемещения;

$\cos(\gamma_s)$ – косинус угла разворота паза;

$\sin(\gamma_s)$ – синус угла разворота паза;

S_p – величина превышения нулевого натяга со стороны корыта;

S_s – величина превышения нулевого натяга со стороны спинки;

S_{pd} – величина заданного по чертежу натяга;

m – порядковый номер;

k_1, k_2 – переменные;

S_{s1} – отклонение натяга со стороны спинки первой лопатки;

μ – среднее выборочное;

σ – среднеквадратическое отклонение;

p_{meas} – измеренный параметр;

δ_{as} – отклонение измеренных параметров p_{meas} от параметров p_t

p_t – конструкторский параметр;

p_{meas_max} и p_{meas_min} – максимальная и минимальная величина параметра;

L_{CL} – минимальное отклонение;

U_{CL} – максимальное отклонение;

δM_1 – величина отклонения расстояния от центра диска до плоскости паза, сопрягаемой с опорной поверхностью хвостовика;

δw_s – величина отклонения ширины пазов диска;

δl_{sp} – погрешность стыкового размера по рабочим торцам антивибрационных полок;

δl_p– погрешность размера от центра координат до рабочего торца со стороны корыта;

$\delta \mathrm{w_l}$ – величина отклонения ширины хвостовика;

$\delta \gamma_\mathrm{b}$ – величина отклонения фактического значения угла касательной к профилю в контрольных сечениях лопаток в свободном состоянии;

$\delta \varphi_p, \delta \varphi_s$ – угловая погрешность профилей торцов со стороны спинки и корыта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скибин, В.А. Машиностроение. Энциклопедия: Расчёт и конструирование машин. Самолёты и вертолёты. Авиационные двигатели / В.А. Скибин, Ю.М. Темис, В.А. Сосунов. – М.: Машиностроение, 2010. – 720 с.

2. Анализ влияния геометрических отклонений рабочих лопаток вентилятора на прочностные характеристики / А.Н. Архипов, М.В. Волгина, А.А. Матушкин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2019. – № 4. – С. 9-16.

3. Influence of geometric deviations of the fan blade airfoil on aerodynamic and mechanical integrity. / Y. Ravikovich, D. Kholobtsev, A. Arkhipov, A. Shakhov // Journal of Physics: Conference Series, Moscow. – 2021. – 012042.

4. Сборка роторов ГТД барабанно-дискового типа: типовые процессы, алгоритмы расчётов: монография / И.Ф. Кравченко, Э.В. Кондратюк, В.А. Титов [и др.]. – Киев: КВИЦ, 2011. – 198 с.

5. Колесов, И.М. Основы технологии машиностроения / И.М. Колесов. – М.: Машиностроение, 1997. – 592 с.

6. Технологія машинобудування / П.П. Мельничук, А.І. Боровик, П.А. Линчевский, Ю.В. Петраков. – Житомир: ЖДТУ, 2005. – 882 с.

7. Никитин, Л.П. Технология сборки двигателей летательных аппаратов: учебное пособие для вузов / Л.П. Никитин. – М.: Машиностроение, 1982. – 269 с.

8. Технология производства авиационных газотурбинных двигателей: учебное пособие для вузов / Ю.С. Елисеев, А.Г. Бойцов, В.В. Крымов, Л.А. Хворостухин. – М.: Машиностроение, 2003. – 511 с.

9. Арпентьев, Б.М. Применение технологии сборки соединений с натягом в машиностроительном производстве / Б.М. Арпентьев, Н.К. Резниченко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харьков: НТУ «ХПІ», 2005. – 52-55 с.

10. Балакшин, Б.С. Теория и практика технологии машиностроения / Б.С. Балакшин. – М.: Машиностроение, 1982. – 367 с.

11. Серенсен, С.В. Несущая способность и расчёт деталей машин на прочность: руководство и справочное пособие / С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.

12. Непомилуев, В.В. Разработка технологических основ обеспечения качества сборки высокоточных узлов газотурбинных двигателей: специальность 05.07.05: диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук / Валерий Васильевич Непомилуев; науч. рук: В.Ф. Безъязычный; Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева. – Рыбинск, 2000. – 495 с.

13. Дальский, А.М. Сборка высокоточных соединений в машиностроении / А.М. Дальский, З.Г. Кулешова. – М.: Машиностроение, 1988. – 304 с.

14. Иноземцев, А.А. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. / А.А. Иноземцев, М.А. Нихамкин, В.Л. Сандрацкий. – М.: Машиностроение, 2008. – Т. 4. – 192 с.

15. Ерошков, В.Ю. Разработка методологии комплектования деталей в роторных пакетах газотурбинных двигателей: специальность 05.07.05: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук / Василий Юрьевич Ерошков; науч. рук.: В.Ф. Безъязычный; Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева – Рыбинск, 1999. – 200 с.

16. Ильина, М.Е. Разработка метода управления технологическим процессом сборки ротора ГТД дискового типа на основе компьютерного моделирования: специальность 05.02.08: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук / Мария Евгеньевна Ильина; науч. рук.: В.В. Непомилуев; Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева – Рыбинск, 2004. – 241 с.

17. Озеров, К.М. Повышение эффективности сборки крупногабаритных энергетических газотурбинных двигателей путём модернизации схем базирования модулей / К.М. Озеров, А.Н. Семенов // Сборник трудов по

материалам IV Международной научно-практической конференции молодых учёных, аспирантов и студентов. – 2021. – С. 98-100.

18. Иванов В.А. Прогнозирование и обеспечение точности сборки колёс турбины ГТД: специальность 05.07.05: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук / Владимир Алексеевич Иванов; науч. рук.: Ф.И. Демин; Куйбышевский авиац. институт им. акад. С.П. Королева. – Куйбышев, 1987. – 227 с.

19. Сурков О.С. Прогнозирование и обеспечение точности изделий сложной конструктивной формы: специальность 05.07.05: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук / Олег Станиславович Сурков; науч. рук.: Ф.И. Демин; Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королева. – Самара: 1996. – 185 с.

20. Слащев, Е.С. Моделирование метода групповой взаимозаменяемости на координатные оси / Е.С. Слащев, В.Г. Осетров // Интеллектуальные системы в производстве. – 2012. – №1 (19). – С. 55-60.

21. Чотчаева, С.К. Геометрический анализ пространственной размерной цепи монтажа силовой установки вертолёта / С.К. Чотчаева, В.В. Сибирский // Вестник ДГТУ. – 2012. – №1 (62). – С. 79-85.

22. Осипович, Д.А. Разработка технологии цифровой сборки сопловых аппаратов турбины ГТД на основе измерений лопаток фотограмметрическим методом: специальность 05.02.08: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук / Осипович Дарья Андреевна; науч. рук. С.Г. Ярушин; Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева. – Пермь, 2019. – 178 с.

23. Пат. 2319841 Российская Федерация, F01D 5/02 Способ расстановки лопаток ротора турбомашины / Бержер Даниэль (FR), Траншьер Жан-Луи (FR); заявл. 15.07.2003; опубл. 20.03.2008, Бюл. № 23. – 6 с.

24. Пат. 2355889 С2 Российская Федерация, МПК F01D 5/02. Способ расстановки лопаток ротора турбомашины / А. Л. Михайлов, В. В. Посадов; заявитель Открытое акционерное общество «Научно-производственное

объединение «Сатурн». – № 2007128639/06; заявл. 25.07.2007: опубл. 20.05.2009; Бюл. № 14. – 7 с.

25. Пат. 2580980 С2 Российская Федерация, МПК F02C 7/045. Способ расстановки лопаток в рабочем колесе вентилятора авиационного двигателя / В. Ф. Копьев, Б. С. Замтфорт; заявитель Российская Федерация в лице Министерства промышленности и торговли Российской Федерации (Минпромторг России). – № 2014130620/06; заявл. 24.07.2014: опубл. 10.04.2016; Бюл. № 4. – 6 с.

26. Пат. 2994920/06 СССР, F01D 9/04 Способ сборки направляющего аппарата турбомашины / Белкин В.М., Ключников В.В., Стенькин Е.Д., Френк А.И.; заявл. 13.10.1980; опубл. 27.11.2005, Бюл. № 33; – 5 с.

27. Пат. 2397330 Российская Федерация, МКИ. F01D 9/04 Способ расстановки сопловых лопаток газотурбинного двигателя / Лебедев В.М., Коган Б.П., Виноградов А.В. – № 2008135854/06; заявл. 04.09.2008; опубл. 20.08.2010, Бюл. № 23; – 6 с.

28. Непомилуев, В.В. Систематизация методов сборки изделий машиностроения по способам обеспечения качества / В.В. Непомилуев, Е.В. Олейникова, А.Н. Семенов // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2018. – № 2(45). – С. 77-82.

29. Майорова, Е.А. Повышение качества изготовления высокоточных изделий машиностроения путём обеспечения управляемости процесса сборки на основе компьютерного моделирования: специальность 05.02.23: автореферат диссертации кандидата технических наук / Майорова Екатерина Александровна; науч. рук.: В.В. Непомилуев; Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева. – Рыбинск. – 2009. – 16 с.

30. Непомилуев, В.В. Компьютерное моделирование процесса сборки как способ обеспечения его качества / В.В. Непомилуев, А.Н. Семенов // Сборник по материалам второй международной научно-технической конференции

«Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития». – 2020. – С. 153-157.

31. Великородный, С.Д. Использование современных информационных технологий в процессах сборки ГТД / С.Д. Великородный, А.Н. Семенов // В сборнике: «Современные технологии сборки». – 2019. – С. 29–34.

32. Nepomiluev, V.V. Virtual Testing in Assembly / V.V. Nepomiluev, A.N. Semenov // Russian Engineering Research. – 2019. – Т. 39. – № 7. – P. 625-627.

33. Базров, Б.М. Модульная технология в машиностроении / Б.М. Базров. – М.: Машиностроение, 2001. – 368 с.

34. Базров, Б.М. Построение размерных цепей изделия с помощью графа модулей поверхностей / Б.М. Базров // Вестник машиностроения. – 2008. – № 7. – С. 26-33.

35. Безъязычный, В.Ф. Анализ возможностей повышения качества сборки изделий машиностроения / В.Ф. Безъязычный, В.В. Непомилуев // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2014. – №21 (148) – С. 5-8.

36. Безъязычный, В.Ф. Состояние и направления развития сборочного производства ГТД / В.Ф. Безъязычный, В.В. Непомилуев, А.Н. Семенов // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. – 2009. – № 8. – С. 45-53.

37. Безъязычный, В.Ф. Некоторые проблемы современного сборочного производства и перспективы их преодоления / В.Ф. Безъязычный, В.В. Непомилуев // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2009. – №8(109). – С. 18-25.

38. Бочкарев, П.Ю. Обеспечение эффективного выполнения сборочных операций высокоточных изделий машиностроения и приборостроения / П.Ю. Бочкарев, А.В. Назарьев // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2016. – №12 (66). – С. 28-34.

39. Назарьев, А.В. Организация эффективного выполнения сборочных операций высокоточных изделий авиационно-космической техники /

А.В. Назарьев, П.Ю. Бочкарев // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2017. – №1(40). – С. 227-236.

40. Гаер, М.А. Моделирование и анализ нелинейных технологических размерных цепей сборок / М.А. Гаер, Д.А. Журавлев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – №11(94). – С. 33-38.

41. Журавлев, Д.А. Геометрическое моделирование деталей и сборок с пространственными допусками в САПР нового поколения / Д.А. Журавлев, А.С. Калашников, М.А. Гаер // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2006. – №4 (28). – С. 17-22.

42. Непомилуев, В.В. Исследование возможностей повышения качества изделий при сборке / В.В. Непомилуев // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2007. – №10(87). – С. 9-13.

43. Непомилуев, В.В. Оптимизация метода индивидуального подбора для многозвенных размерных цепей / В.В. Непомилуев, Е.А. Майорова // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2008. – № 2(6). – С. 302-309.

44. Семенов, А.Н. Состояние методологического обеспечения сборочного этапа машиностроения / А.Н. Семенов // Успехи современного естествознания. – 2004. – №4 – С. 76-77.

45. Непомилуев, В.В. Обеспечение качества изготовления машин на основе анализа их действительной точности / В.В. Непомилуев, А.Н. Семенов // Сборник по материалам VII международной научной конференции «Проблемы механики современных машин». – 2018. – С. 307-311.

46. Слащев, Е.С. Моделирование метода групповой взаимозаменяемости на координатные оси / Е.С. Слащев, В.Г. Осетров // Интеллектуальные системы в производстве. – 2012. – № 1 (19). – С. 55-60.

47. Сибирский, В.В. Использование компьютерных моделей пространственных размерных цепей и метода виртуальных сборок для повышения производительности монтажных операций / В.В. Сибирский,

С.К. Чотчаева // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. Авиационная и ракетно-космическая техника – 2012. – № 5 (36) – С. 297-303.

48. Чотчаева, С.К. Повышение производительности монтажа авиационных агрегатов с использованием их виртуальных компьютерных моделей: специальность 05.02.08: автореферат диссертации кандидата технических наук / Чотчаева Самира Камаловна; науч. рук.: С.Н. Шевцов; «Донской государственный технический университет» (ДГТУ). – Ростов-на-Дону. – 2014. – 19 с.

49. Чотчаева, С.К. Геометрический анализ пространственной размерной цепи монтажа силовой установки вертолёта / С.К. Чотчаева, В.В. Сибирский // Вестник ДГТУ. – 2012. – №1(62). – С. 79-85.

50. Kannan, S.M. Particle swarm optimization for minimizing assembly variation in selective assembly / S.M. Kannan, R. Sivasubramanian and V. Jayabalan // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2008 – 42(7–8). – P. 793-803.

51. Kannan, S.M. A new method in selective assembly to minimize clearance variation for a radial assembly using genetic algorithm / SM. Kannan, A. Asha, V. Jayabalan // Quality Engineering. – 2005. – Vol. 17. – Issue 4. – P. 595-607.

52. Kannan, S.M. A new grouping method for minimizing the surplus parts in selective assembly / S.M. Kannan, V. Jayabalan // Quality Engineering, – 2002 – Vol. 14. – Issue 1. – P. 67-75.

53. Shan, H.S. Computer-aided component selection for precision assembling / H.S. Shan, A. Satyawadi // Proceedings of the 10th international conference on production research. –1989. – P. 734-739.

54. A solution of worst-case tolerance analysis for partial parallel chains based on the Unified Jacobian-Torsor model / W. Zeng, Y. Rao, P. Wang, W. Yi // Precision Engineering. – 2017. – Vol. 47. – P. 276-291.

55. A statistical tolerance analysis approach for over-constrained mechanism based on optimization and Monte Carlo simulation / A.J. Qureshi, J.Y. Dantan, V. Sabri [et al.] // Computer-Aided Design. – 2012. – Vol. 44. – P. 132-142.

56. Chase, K.W. Design issues in mechanical tolerance analysis / K.W. Chase, W.H. Greenwood // Manufacturing Review. – 1988. – Vol. 1. – P. 50-59.

57. A statistical tolerance analysis approach for over-constrained mechanism based on optimization and Monte Carlo simulation / A.J. Qureshi, J.Y. Dantan, V. Sabri [et al.] // Computer-Aided Design. – 2012. – Vol. 44. – P. 132-142.

58. Desrochers A. A matrix approach to the representation of tolerance zones and clearances / A. Desrochers, A. Rivière // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 1997. – Vol. 13. – P. 630-636.

59. Polini, W. Geometric tolerance analysis / W. Polini // Geometric tolerances. – 2011. – P. 39-68.

60. 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.

61. Nigam, S.D. Review of statistical approaches to tolerance analysis / S.D. Nigam, J.U. Turner // Computer-Aided Design. – 1995. – Vol. 27. – P. 6-15.

62. Шахов, А. С. Методика оценки динамики и прочности деталей компрессора низкого давления газотурбинного двигателя с учётом геометрических отклонений: специальность: 2.5.15: диссертация кандидата технических наук / Александр Сергеевич Шахов; науч. рук.: А.Н. Архипов; «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)». – Москва. – 2022. – 134 с.

63. 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.

64. 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.

65. Коваленко, А.В. Контроль деталей, обработанных на металлорежущих станках / А.В. Коваленко. – М.: Машиностроение, 1980. – 167 с.

66. Марков, Н.Н. Погрешность и выбор средств при линейных измерениях / Н.Н. Марков, Г.Б. Кайнер, П.А. Сацердотов. – М.: Машиностроение, 1967. – 392 с.

67. Автоматизация технологии изготовления газотурбинных авиационных двигателей: монография. Часть первая / В.Ф. Безъязычный, В.Н. Крылов, В.А. Полетаев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2005. – 560 с.

68. ГОСТ 23557-79. Лопатки авиационных осевых компрессоров и турбин. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1979. – 30 с.

69. Гапшис, В.А. Координатные измерительные машины и их применение: учебное пособие / В.А. Гапшис, А.Ю. Каспарайтис, М.Б. Модестов. – М.: Машиностроение, 1988. – 328 с.

70. Крымов, В.В. Производство лопаток газотурбинных двигателей / В.В. Крымов, Ю.С. Елисеев, К.И. Зудин. – М.: Машиностроение, 2002. – 376 с.

71. Галиулин, Р.М. Компьютерные лазерные оптоэлектронные системы измерений геометрии изделий сложной формы «ОПТЭЛ» / Р.М. Галиулин, Р.М. Галиулин, Ж.М. Бакиров, Д.Р. Богданов, К.О. Шулюпин, М.Г. Хабибуллин, А.Ф. Павлов, М.С. Рябов, К.Н. Ямалиев // Авиационная техника, Известия ВУЗов. – 1997. – № 1. – С. 100-106.

72. Wolovich, W. The precise measurement of freeform surfaces / W. Wolovich, H. Albakri, H. Yalcin // J. Man. Sci. Eng. – 2002. – Vol. 124. –P. 326-332.

73. Ainsworth, I. CAD-based measurement path planning for free-form shapes using contact probes Int. / I. Ainsworth, M. Ristic, D. Brujic // J. Adv. Man. Tech. – 2000. – Vol. 16. – P. 23-31.

74. Булатов, В.П. Основы теории точности машин и приборов / В.П. Булатов [и др.]. – М.: Наука, 1993. – 234 с.

75. Шулепов, А.П. Проектирование технологической оснастки / А.П. Шулепов, В.А. Шманев, И.Л. Шитарев. – Самара: СГАУ, 1996. – 332 с.

76. Шаблоны резьбовые и радиусные. ТУ 2-034-228-87. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 29 с.

77. Бойченко, С.Г. КИМ на гексаподах: «русское чудо» в технологиях измерений / С.Г. Бойченко // Оборудование и инструмент. – 2005. – №12. – С. 1-3.

78. Wilhelml, R.G. Task specific uncertainty in coordinate measurement / R.G. Wilhelml, R. Hocken, H. Schwenke // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2001. – Vol. 50, Issue 2. – P. 553-563.

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

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

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

82. Yadong, Li. Free-form surface inspection techniques state of the art review / Li Yadong, Gu. Peihua // Computer-Aided Design. – 2004. – Issue 36. – P. 1395-1417.

83. Rodger, G. A review of industrial capabilities to measure free-form surfaces / G. Rodger, D. Flack, M. McCartny // NPL Report DEPC-EM 014. – 2007. – 65 p.

84. Суслин, В.П. Современные методы измерения и контроля в машиностроении / В.П. Суслин, А.В. Джунковский // Технология машиностроения. – 2004. – № 5. – С. 49-51.

85. Болотов, М.А. Разработка методики моделирования и исследование процесса измерения деталей ГТД на координатно-измерительных машинах: специальность 05.07.05: диссертация кандидата технических наук: / Болотов Михаил Александрович; науч. рук.: Л.А. Чемпинский; «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика СЛ. Королёва (национальный исследовательский университет)» (СГАУ). – Самара, 2012. – 204 с.

86. Шубников, К.В. Унифицированные переналаживаемые средства измерения / К.В. Шубников. – Л.: Машиностроение, 1978. – 200 с.

87. Savio, E. Metrology of freeform shaped parts / E. Savio, L. De Chiffre, R. Schmitt // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2007. – Vol. 56. – Issue 2. – P. 810-835.

88. Болотов, М. Точность координатных измерений: монография / М. Болотов, В. Печенин, Н. Рузанов. – Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2021. – 235 с.

89. Цифровая модель оптимизации сборки ротора компрессора авиационного двигателя / М.А. Болотов, В.А. Печенин, Е.Ю. Печенина, Н.С. Голев // Сборник трудов по материалам VI Международной конференции и молодёжной школы. Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2020). – 2020. – С. 1-8.

90. Digital model to optimize the rotor assembly for aircraft engine compressor models / M.A. Bolotov, V.A. Pechenin, E. Yu. Pechenina, N.D. Pronichev // Journal of Physics: Conference Series, 2021, – Vol. 1745. – Issue 1. – 012033.

91. Лунина, Е.А. Методика создания цифровых моделей лопаток ротора компрессора / Е.А. Лунина, Е.Ю. Печенина, В.А. Печенин // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте. Сборник статей VIII

Всероссийской научно-технической конференции для молодых учёных и студентов с международным участием. Пенза. – 2022. – С. 138-142.

92. Development of the compressor impeller configuration algorithm / E.Yu. Pechenina, V. A. Pechenin, M. A. Bolotov. // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – V. 2373. – 062021.

93. Печенина, Е.Ю. Разработка модели расчёта сборочного состояния рабочего колеса компрессора / Е.Ю. Печенина, Е.В. Кудашов, В.А. Печенин // «Исследование и проектирование интеллектуальных систем в автомобилестроении, авиастроении и машиностроении («ISMCA' 2022»)». Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Таганрог. – 2022. – С. 62-65.

94. Мохова, А.О. Анализ возможностей повышения качества изготовления машин с использованием различных методов сборки / А.О. Мохова, В.В. Непомилуев, А.А. Соловьева // Потенциал современной науки. – 2014. – №2. – с. 23-27.

95. Непомилуев, В.В. Исследование возможности повышения качества изготовления высокоточных изделий машиностроения путём учёта компенсирующей способности деталей при использовании метода индивидуального подбора / В.В. Непомилуев, Е.А. Майорова // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2009. – № 9. – С. 11-14.

96. Непомилуев, В.В. Повышение качества сборки путём обеспечения статистической управляемости технологических процессов изготовления деталей / В.В. Непомилуев, И.В. Дюпин // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2008. – № 2. – С. 3-7.

97. Олейникова, Е.В. Метод индивидуального подбора деталей как основа обеспечения качества сборки высокоточных изделий / В.В. Непомилуев, Е.В. Олейникова, А.Н. Семенов // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2016. – №4(39). – С. 37-42.

98. Осипович, Д.А. Исследование алгоритмов подбора лопаток при сборке сопловых аппаратов газотурбинного двигателя / Д.А. Осипович, С.Г. Ярушин, А.Б. Макеев // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2018. – №7(216). – С. 313-319.

99. Печенина, Е.Ю. Разработка алгоритма для комплектации рабочих колёс компрессора / Е.Ю. Печенина, М.А. Болотов, В.А. Печенин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 69. – С. 14-22.

100. ГОСТ 341003.1–2017. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределённости измерения. Дополнение 1. Трансформирование распределений с использованием метода Монте-Карло». – М.: Стандартинформ, 2018. – 84 с.

101. ОСТ 1 02571-86. Лопатки компрессоров и турбин. Предельные отклонения размеров, формы и расположения пера. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 36 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

План расстановки лопаток в эксперименте 1

№ паза	*Порядок*	№ паза	*Порядок*	№ паза	*Порядок*
1	*48*	29	*7*	57	*45*
2	*44*	30	*57*	58	*13*
3	*51*	31	*43*	59	*8*
4	*21*	32	*58*	60	*71*
5	*68*	33	*6*	61	*84*
6	*5*	34	*82*	62	*47*
7	*17*	35	*14*	63	*36*
8	*56*	36	*62*	64	*35*
9	*70*	37	*59*	65	*75*
10	*28*	38	*39*	66	*24*
11	*61*	39	*72*	67	*66*
12	*26*	40	*74*	68	*65*
13	*46*	41	*53*	69	*30*
14	*76*	42	*80*	70	*41*
15	*33*	43	*67*	71	*60*
16	*34*	44	*69*	72	*31*
17	*50*	45	*18*	73	*25*
18	*42*	46	*9*	74	*52*
19	*38*	47	*29*	75	*11*
20	*83*	48	*32*	76	*64*
21	*54*	49	*63*	77	*78*
22	*2*	50	*4*	78	*12*
23	*81*	51	*20*	79	*49*
24	*22*	52	*73*	80	*55*
25	*3*	53	*19*	81	*23*
26	*40*	54	*1*	82	*27*
27	*77*	55	*16*	83	*10*
28	*37*	56	*79*	84	*15*

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

План расстановки лопаток в эксперименте 2

№ паза	*Порядок*	№ паза	*Порядок*	№ паза	*Порядок*
1	*48*	29	*7*	57	*45*
2	*44*	30	*79*	58	*13*
3	*27*	31	*43*	59	*8*
4	*55*	32	*58*	60	*71*
5	*23*	33	*6*	61	*84*
6	*68*	34	*82*	62	*22*
7	*78*	35	*14*	63	*36*
8	*56*	36	*62*	64	*35*
9	*70*	37	*59*	65	*75*
10	*64*	38	*39*	66	*83*
11	*61*	39	*72*	67	*42*
12	*46*	40	*74*	68	*34*
13	*60*	41	*53*	69	*50*
14	*26*	42	*80*	70	*76*
15	*30*	43	*67*	71	*33*
16	*41*	44	*69*	72	*31*
17	*66*	45	*18*	73	*25*
18	*65*	46	*9*	74	*52*
19	*38*	47	*29*	75	*11*
20	*24*	48	*32*	76	*28*
21	*54*	49	*63*	77	*17*
22	*2*	50	*4*	78	*12*
23	*81*	51	*20*	79	*49*
24	*47*	52	*73*	80	*5*
25	*3*	53	*19*	81	*51*
26	*40*	54	*1*	82	*21*
27	*77*	55	*16*	83	*10*
28	*37*	56	*57*	84	*15*

ПРИЛОЖЕНИЕ В

План расстановки лопаток в эксперименте 3

№ паза	*Порядок*	№ паза	*Порядок*	№ паза	*Порядок*
1	*39*	29	*18*	57	*38*
2	*14*	30	*80*	58	*5*
3	*58*	31	*12*	59	*78*
4	*17*	32	*84*	60	*33*
5	*52*	33	*31*	61	*3*
6	*30*	34	*42*	62	*68*
7	*49*	35	*47*	63	*56*
8	*55*	36	*32*	64	*16*
9	*9*	37	*22*	65	*77*
10	*15*	38	*79*	66	*48*
11	*69*	39	*28*	67	*50*
12	*43*	40	*29*	68	*40*
13	*7*	41	*8*	69	*74*
14	*26*	42	*6*	70	*71*
15	*11*	43	*44*	71	*59*
16	*46*	44	*70*	72	*1*
17	*73*	45	*67*	73	*10*
18	*13*	46	*72*	74	*4*
19	*20*	47	*54*	75	*51*
20	*34*	48	*62*	76	*76*
21	*53*	49	*57*	77	*19*
22	*2*	50	*27*	78	*45*
23	*61*	51	*64*	79	*35*
24	*23*	52	*25*	80	*81*
25	*66*	53	*21*	81	*65*
26	*83*	54	*75*	82	*36*
27	*24*	55	*41*	83	*37*
28	*60*	56	*63*	84	*82*

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

План расстановки лопаток в эксперименте 4

№ паза	*Порядок*	№ паза	*Порядок*	№ паза	*Порядок*
1	*21*	29	*82*	57	*31*
2	*25*	30	*61*	58	*34*
3	*64*	31	*24*	59	*14*
4	*5*	32	*18*	60	*20*
5	*3*	33	*15*	61	*13*
6	*33*	34	*84*	62	*11*
7	*54*	35	*23*	63	*37*
8	*48*	36	*47*	64	*78*
9	*56*	37	*69*	65	*52*
10	*27*	38	*70*	66	*30*
11	*72*	39	*8*	67	*81*
12	*40*	40	*44*	68	*19*
13	*10*	41	*28*	69	*65*
14	*59*	42	*6*	70	*76*
15	*45*	43	*79*	71	*4*
16	*35*	44	*29*	72	*41*
17	*36*	45	*2*	73	*1*
18	*51*	46	*22*	74	*68*
19	*58*	47	*66*	75	*71*
20	*49*	48	*32*	76	*50*
21	*55*	49	*12*	77	*74*
22	*9*	50	*42*	78	*16*
23	*26*	51	*67*	79	*77*
24	*46*	52	*80*	80	*38*
25	*43*	53	*39*	81	*63*
26	*73*	54	*60*	82	*57*
27	*7*	55	*17*	83	*62*
28	*53*	56	*83*	84	*75*

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Акт внедрения результатов диссертационной работы (АО «ОДК» «НИИД»)

ОДК

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ОБЪЕДИНЕННАЯ ДВИГАТЕЛЕСТРОИТЕЛЬНАЯ КОРПОРАЦИЯ»

ФИЛИАЛ «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ТЕХНОЛОГИИ
И ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ДВИГАТЕЛЕЙ»

СОГЛАСОВАНО
Главный инженер
ПК «Салют» АО «ОДК»
_____ / Ю.Р. Нуртдинов
15.06.2023г.

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора филиала
АО «ОДК» «НИИД»
_____ / М.Г. Яковлев
15.06.2023г.

АКТ
внедрения результатов диссертационной работы

Результаты диссертационной работы Печениной Е.Ю. на тему «Совершенствование процесса сборки рабочих колёс с антивибрационными полками компрессоров авиационных ГТД» по специальности «2.5.15 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» использовались для улучшения технологического процесса сборки рабочих колёс компрессоров ГТД. Основными результатами диссертационной работы, которые имеют практическое значение, являются:

1. Методика сборки рабочих колёс компрессора ГТД с автоматизацией формирования схемы расстановки лопаток. Разработанная методика позволяет сократить время на проведение сборки рабочего колеса за счет использования программной системы, в которой геометрические погрешности лопаток и пазов диска обобщены в виде математической модели, и используются при расстановке лопаток, что позволяет снизить количество предварительных сборок.

2. Программная система для снижения стоимости и обеспечения ресурса ротора компрессора, предназначенная для использования в цеховых условиях и позволяющая повысить точность сборочных параметров, а также снизить трудоёмкость сборки рабочих колёс.

Использование разработанных методики и программной системы позволяет снизить трудоёмкость сборки рабочих колёс на 30% и повысить равномерность натягов по антивибрационным полкам в среднем на 25%.

Начальник отдела «МО» _____ / М.В. Жуплов

Ведущий инженер-технолог _____ / И.А. Назаров

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Акт о внедрении результатов диссертационного исследования в учебный процесс

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
_____/Гаврилов А.В.
«13» 04 2023 г.

АКТ
о внедрении результатов диссертационного исследования в учебный процесс

Результаты диссертационного исследования по теме: «Совершенствование процесса сборки рабочих колёс с антивибрационными полками компрессоров авиационных ГТД»,
(Название и шифр НИР или тема диссертационного исследования)
выполненного на кафедре технологий производства двигателей,
внедрены в учебный процесс на кафедре технологий производства двигателей
на основании решения кафедры (протокол № 9 от «5» апреля 2023 г.).
Указанные результаты включены в курс «Технология комплексно-механизированного
(название курса)
сборочно-сварочного производства»,
направления подготовки 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение
(шифр и название направления подготовки)
машиностроительных производств».

Заведующий кафедрой
_____/Хаймович А.И.
«10» 04 2023 г.

Соискатель ученой степени
_____/Печенина Е.Ю.
«10» 04 2023 г.

Начальник методического отдела
учебно-методического управления
к.т.н., доцент
_____/Вдовин Р.А.
«11» 04 2023 г.

Начальник отдела сопровождения
научных исследований
к.т.н., доцент
_____/Родионов Л.В.
«11» 04 2023 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Акт внедрения результатов диссертационной работы («Самарские Турбомоторы»)

Общество с ограниченной ответственностью «Самарские Турбомоторы»

(ООО «Самарские Турбомоторы»)

ИНН 6313535051/ КПП 631301001

443112, РФ, Самарская обл., г.Самара, ул.Парижской Коммуны, дом 18, оф. н2

тел/факс: +7 (846) 379-24-85 E-mail: samtm@samtm.ru

В Диссертационный совет 24.2.379.10

443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы

Результаты диссертационной работы Печениной Е.Ю. на тему «Совершенствование процесса сборки рабочих колёс с антивибрационными полками компрессоров авиационных ГТД» по специальности «2.5.15 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» в части программной системы для снижения стоимости и обеспечения ресурса ротора компрессора использовались для улучшения технологического процесса сборки рабочих колёс компрессоров ГТД. Использование разработанной программной системы позволяет снизить рассеивание величин натягов между лопатками в среднем на 25…45%, и, кроме того, снизить количество предварительных сборок рабочих колёс на 50%.

Настоящий Акт составлен для представления в диссертационный совет 24.2.379.10.

Директор

ООО «Самарские Турбомоторы» И.В. Кузенкин

«20» апреля 2023 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ З

Технологическая инструкция

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «САМАРСКИЕ ТУРБОМОТОРЫ»

УТВЕРЖДЕНО
Директор
ООО «Самарские Турбомоторы»
_____И.В. Кузенкин
«__»_____2023 г.

УТВЕРЖДЕНО
Директор института двигателей и энергетических установок Самарского университета
_____В.Г. Смелов
«__»_____2023 г.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНСТРУКЦИЯ
по определению условий выполнения сборки рабочего колеса компрессора с антивибрационными полками

Самарские турбомоторы.ТИ.010
действует с «20»_04_2023 г.

СОГЛАСОВАНО
Главный конструктор
_____В.С. Петров
«20»_04_2023 г.

СОГЛАСОВАНО
Заведующий кафедрой технологий производства двигателей
_____А.И. Хаймович
«18»_04_2023 г.

РАЗРАБОТАЛ
Инженер
_____Е.Ю. Печенина
«18»_04_2023 г.

2023

Подпись и дата | Инв.№ дубл. | Взам. Инв. № | Подпись и дата | Инв.№ подл.

Копировал Формат А4

Содержание

1 Область применения 3
2 Нормативные ссылки 4
3 Термины, определения, обозначения и сокращения 5
4 Общие положения 6
5 Оборудование, материалы и вспомогательные приспособления, необходимые для осуществления технологического процесса 9
6 Использование ПП в технологическом процессе сборки ротора КВД при его ремонте 10
7 Последовательность выполнения расчёта торцевых биений и определения УВС при ремонте ротора КВД 12
8 Требования к квалификации операторов 26
9 Охрана труда 27

Перв. примен.
Справ. №
Подпись и дата
Инв.№дубл.
Взам. инв. №
Подпись и дата
Инв.№подл.

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Самарский университет.ТИ.010			
Разраб.		Печенина			Технологическая инструкция по определению условий выполнения сборки рабочего компрессора с антивибрационными полками	Лит.	Лист 2	Листов 28
Пров.		Петров						
Н. контр.						ООО «Самарские Турбомоторы»		
Утв.		Кузенкин						

Копировал Формат А4

1 Область применения

1.1 Настоящая технологическая инструкция устанавливает порядок использования программного приложения «BladeGap» в технологическом процессе сборки рабочего колеса компрессора среднего давления (КСД) 8 ступени изделия НК при его ремонте.

1.2 Условиями выполнения сборки (УВС) при ремонте рабочего колеса КСД являются:

– положения лопаток в диске;

– лопатки, требующие замены или ремонта.

1.3 Использование технологической инструкции позволяет исключить операции, предназначенные для экспериментального определения УВС при ремонте рабочего колеса КСД.

1.4 Настоящая технологическая инструкция предназначена для технологов и слесарей-сборщиков механосборочного цеха, в обязанности которых входит выполнение работ по сборке рабочего колеса КСД, согласно требованиям конструкторской документации.

Применение настоящей технологической инструкции сторонними организациями возможно, только по согласованию с авторами.

2 Нормативные ссылки

В настоящей технологической инструкции использованы ссылки на следующие нормативные документы:

ГОСТ 12.0.004-90 Система стандартов безопасности труда. Организация обучения безопасности труда. Общие положения.

ГОСТ 23887-79 Сборка. Термины и определения.

ГОСТ 12.1.019-2017 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты

ГОСТ 12.2.029-88 Система стандартов безопасности труда. Приспособления станочные. Требования безопасности.

ГОСТ 12.3.002-2014 Система стандартов безопасности труда. Процессы производственные Общие требования безопасности.

ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

ГОСТ 25346-2013 (ISO 286-1:2010) Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Основные положения, допуски, отклонения и посадки.

ГОСТ 577-68 Индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм. Технические условия.

3 Термины, определения, обозначения и сокращения

В настоящей технологической инструкции применимы следующие обозначения и сокращения:

КСД – компрессор среднего давления;

ТП – технологический процесс;

ПП – программное приложение;

УВС – условия выполнения сборки;

КД – конструкторская документация;

БД – база данных;

ТИ – технологическая инструкция;

КИМ – координатно - измерительная машина;

КИП – контрольно - измерительное приспособление;

РК – рабочее колесо;

ЦИЛ – центрально измерительная лаборатория.

4 Общие положения

4.1 Настоящая ТИ позволяет выполнить расчёт УВС при ремонте РК КСД 8 ступени изделия НК без применения предварительных сборок узла за счёт использования программного приложения «BladeGap» на основе результатов измерений деталей.

4.2 Измерение геометрических параметров деталей необходимо выполнять на координатно-измерительной машине (КИМ) или контрольно – измерительных приспособлениях (КИП) согласно эскизам, представленным на рисунках 1 и 2.

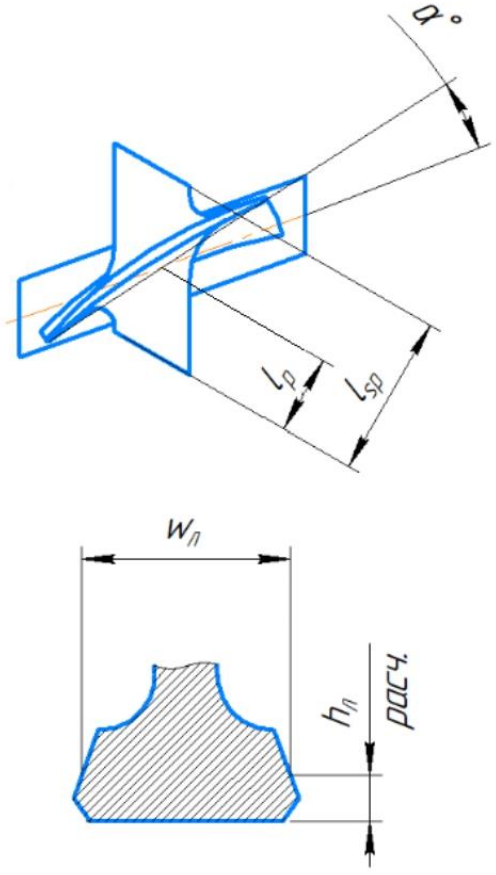


Рисунок 1 – Контролируемые параметры лопатки

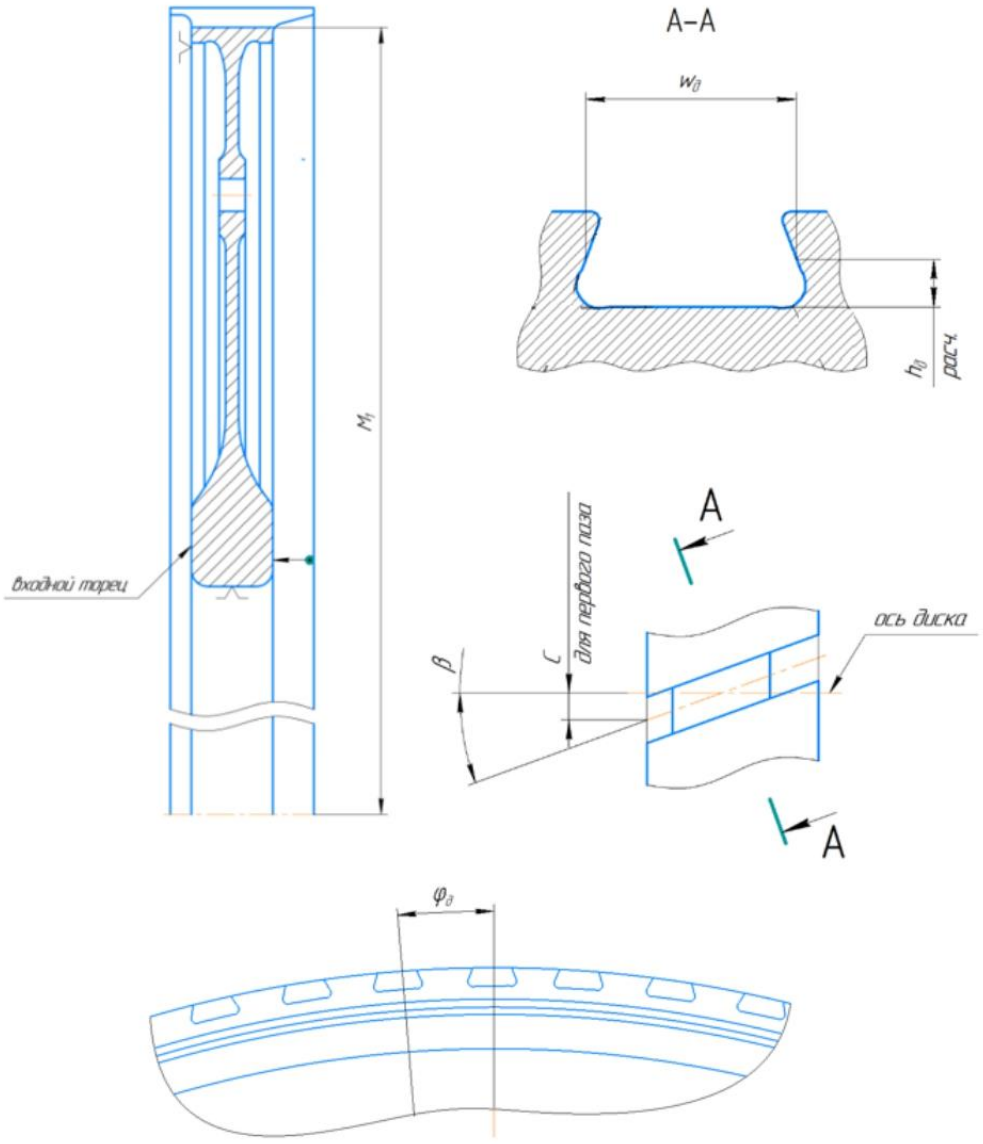


Рисунок 2 –Контролируемые параметры диска

4.3 Параметры, описывающие геометрические отклонения измеренных размеров деталей, формируются в электронном и печатном видах с подписями начальника ЦИЛ и оператора, который выполнял измерения.

4.4 Задание допустимых значений изменения углов установки в контрольных сечениях лопаток РК КСД выполняется согласно конструкторской документации, сборочному чертежу и технологическому процессу.

4.5 Сформированный план расстановки лопаток в РК используется для принятия дальнейших решений при выполнении сборки. Формирование окончательного отчёта с измеренными величинами изменений углов установки лопаток РК выполняется технологами механосборочного цеха.

4.6 Выбор лопатки для её замены или дальнейшего ремонта выполняется технологами цеха на основе измерений величин изменений углов установки лопаток РК.

4.7 Окончательные отчет, содержащий УВС, формируется в электронном и печатном видах с подписями технологов участка сборки РК КСД механосборочного цеха.

4.8 Рекомендации по доработке деталей, замене и их ремонту формируются в отдельный отчёт и отправляются в цех изготовителя выбранных лопаток.

5 Оборудование, материалы и вспомогательные приспособления, необходимые для осуществления технологического процесса

5.1 Стандартное оборудование:

– Персональный ЭВМ с ПП «BladeGap».

Нестандартное оборудование: нет.

6 Использование ПП в технологическом процессе сборки РК КСД при его ремонте

6.1 Схема включения ПП «BladeGap» в ТП сборки РК КСД при его ремонте представлена на рисунке 3.

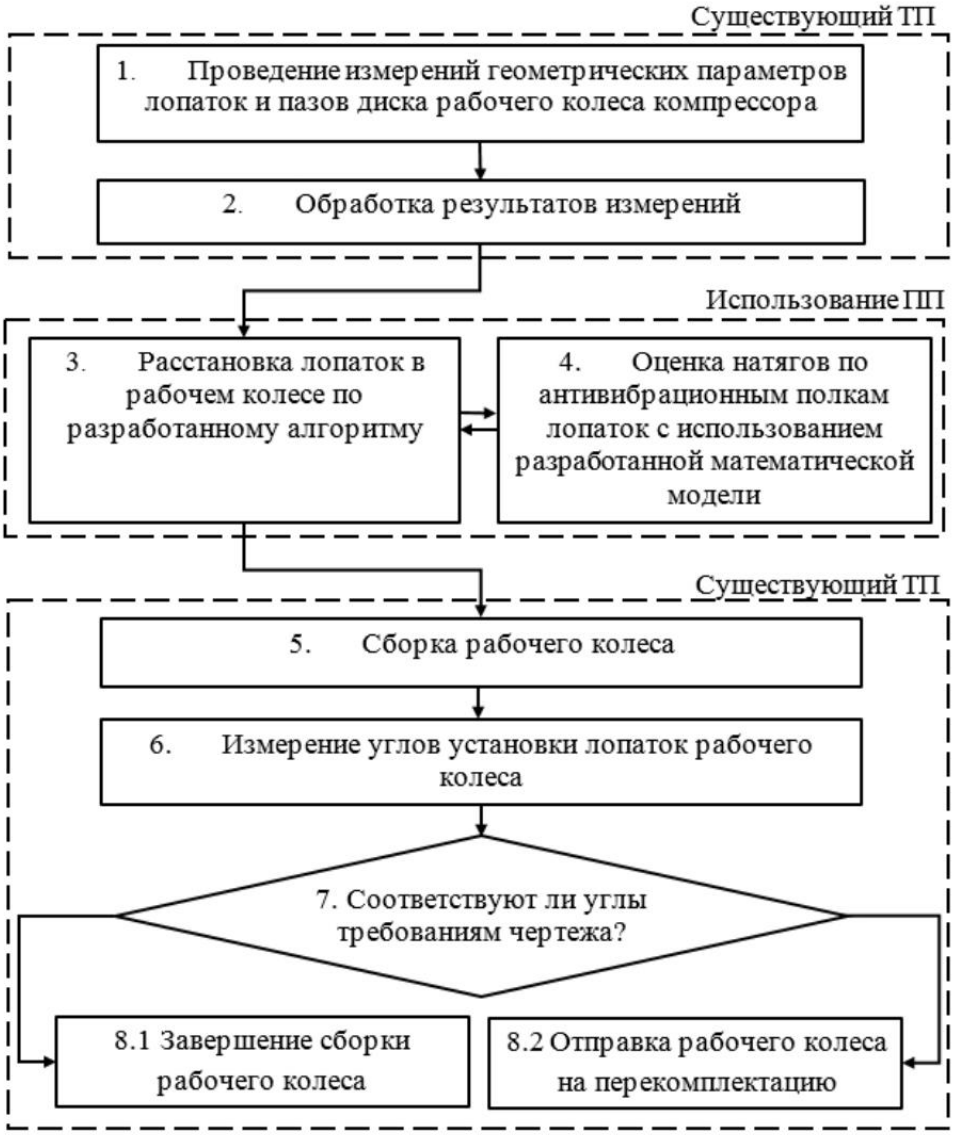


Рисунок 3 – Схема включения ПП «BladeGap» в ТП сборки РК КСД при его ремонте

6.2 Последовательность сборки РК 8 ступени КСД изделия НК выполняется согласно его существующей технологии сборки. Предварительные сборки заменяются виртуальным расчетом в ПП «BladeGap», которое имеет следующий функционал:

1) задание исходных данных, либо их загрузка из внешних источников;

2) ручная и автоматическая расстановка лопаток в рабочем колесе;

3) моделирование процесса сборки и вычисление параметров, характеризующих её качество;

4) визуализация рассчитанных параметров оценки качества сборки рабочего колеса;

5) формирование нескольких комплектов лопаток исходя из задела лопаток в цехе;

6) сохранение результатов работы приложения в файл;

7) формирование отчетов с рекомендациями по расстановке лопаток для использования в процессе сборки дисков.

7 Последовательность определения УВС при сборке РК КСД

7.1 Выполнить измерение геометрических параметров деталей ремонтного РК КСД, согласно эскизам на рисунках 1-2.

7.2 Выполнить обработку результатов измерений с использованием ПП. Результатом работы ПП является отчет в формате PDF, содержащий информацию: номер паза, соответствующий ему уникальный номер лопатки, величины натягов (рассчитанных по разработанной модели) в мм^2: общий, со стороны корыта, со стороны спинки. В отчет можно добавить величину изменения угла установки профиля каждой лопатки, измеренные в процессе сборки и так же характеризующие возникающий натяг.

7.3 При запуске программы появляется окно с пустым проектом (рисунок 4).

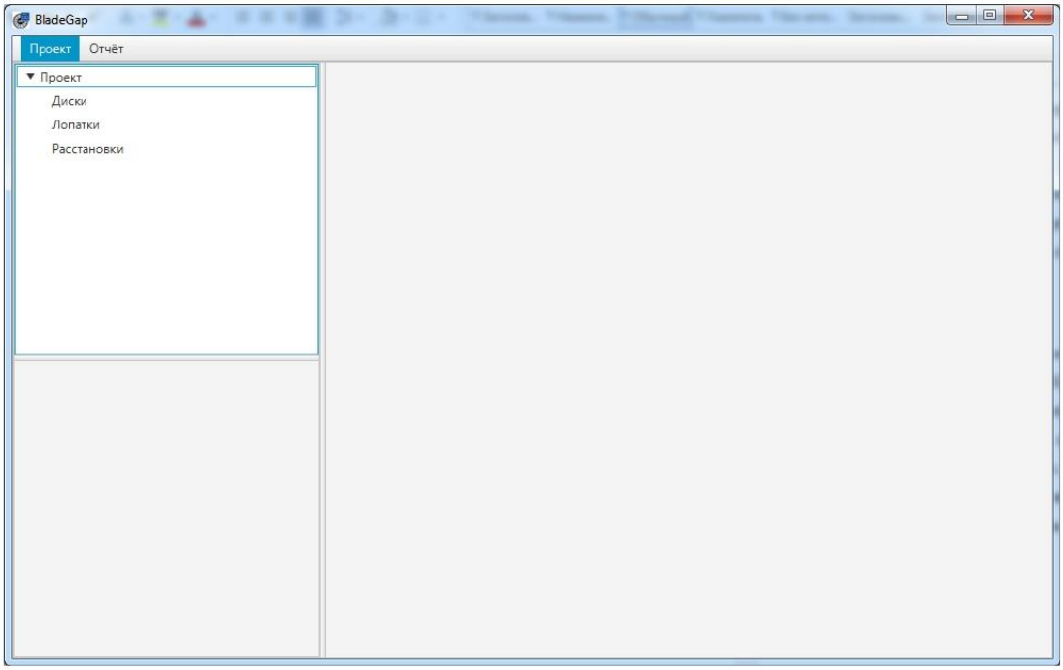


Рисунок 4 – Страница авторизации пользователя

В интерфейсе программы есть верхняя панель инструментов, где находится список доступных операций над проектом (рисунок 5), а также кнопка формирования отчёта.

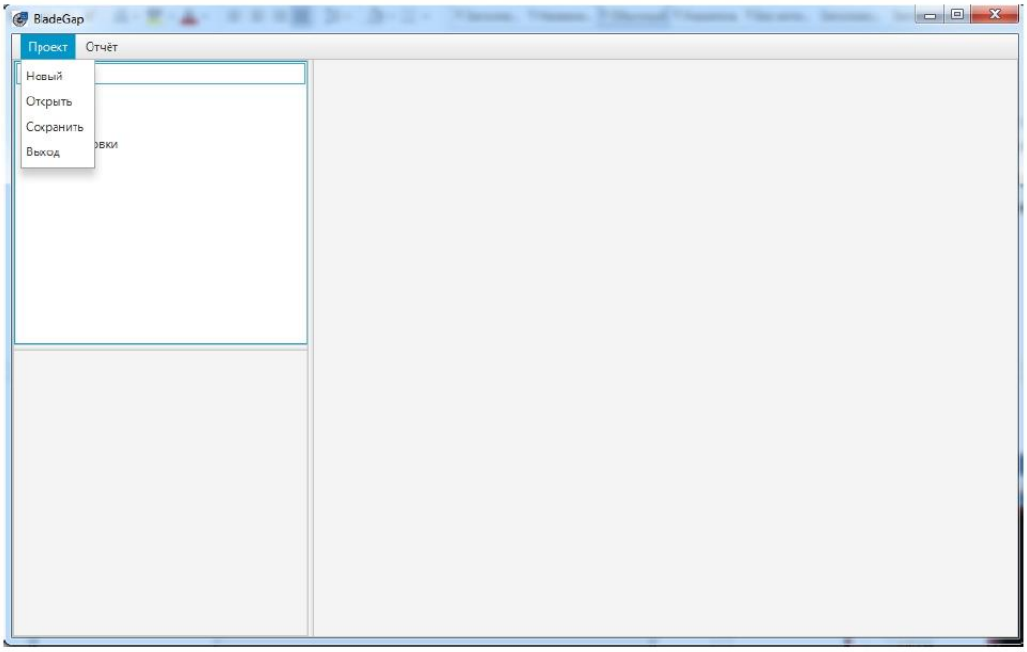


Рисунок 5 – Доступные операции над проектом

В списке операций присутствуют «Новый», «Открыть», «Сохранить» и «Выход», то есть пользователь может создать новый проект, открыть существующий проект для редактирования, сохранить изменения в проекте и выйти из программы.

Кроме панели инструментов есть окно дерева проекта, корневыми элементами которого являются «Проект», «Диски», «Лопатки» и «Расстановки».

При нажатии на кнопку «Открыть» появляется список доступных проектов, хранящихся в базе данных (рисунок 6).

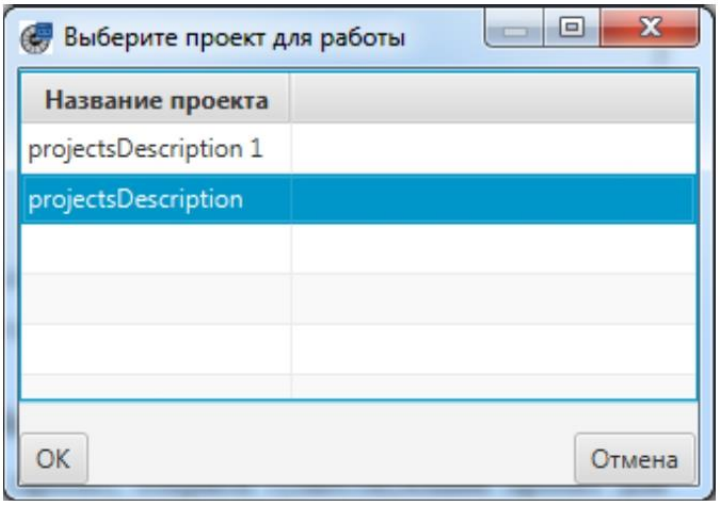


Рисунок 6 – Список проектов для работы

При выборе проекта загружаются данные по нему. Страница проекта, кроме панели инструментов и дерева проекта, содержит ещё две ключевых области.

Первая представляет собой набор свойств элемента дерева. В дальнейшем будем называть эту область областью свойств. Для элемента «Проект» свойством является *название* проекта, которое можно задавать и редактировать; для элемента «Диск» свойствами являются *название* диска, которое можно редактировать; *тип диска*; *количество пазов* в диске. Для элемента «Лопатки» свойствами являются тип лопатки; количество лопаток в проекте; количество свободных лопаток, не находящихся ни в одном комплекте. В дочерних элементах «*Расстановки*» (на рисунке 7 «*Предварительная сборка*») свойствами являются *название* и *комментарий*, которые можно редактировать.

Рисунок 7 – Редактирование названия проекта

Вторая область содержит измеренные и конструкторские данные по дискам и лопаткам, а также сборочные результаты (натяги), график и гистограмму распределения натягов в каждом комплекте. В дальнейшем будем её называть областью данных.

Действиями пользователя внутри проекта являются: добавление нового диска или группы лопаток; загрузка измеренных данных по дискам и лопаткам; комплектация лопаток по дискам; удаление выбранного диска или лопаток; работа с расстановками (дублирование, удаление, выполнение расстановки и экспорт отчёта); расчёт углов по величинам натягов. Опишем рассмотренные этапы работы в проекте.

7.4 При нажатии левой кнопки мыши на корневом элементе «*Диски*» появляется возможность «*Добавить диск*» (рисунок 8).

Рисунок 8 – Добавление диска

Название диска по умолчанию «*Новый диск*», это название можно редактировать. При нажатии левой кнопки мыши на конкретный диск в дереве проекта появляется доступные операции над ним: «*Удалить диск*» и «*Импорт результатов измерения диска*» (рисунок 9).

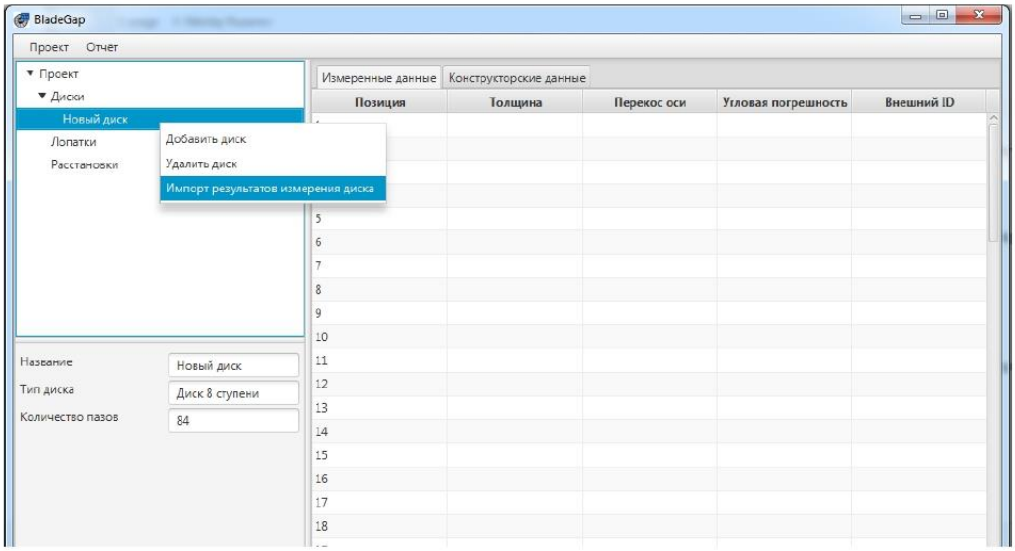


Рисунок 9 – Добавление диска

До импорта результатов измерения диска раздел области данных – измеренные данные – не заполнен. Конструкторские данные отражают конструкторские параметры диска, загруженные из базы данных.

Импорт данных осуществляется из файла *.xlsx, с помощью использования кнопки радиального меню «*Импорт результатов измерения диска*», в результате чего заполняется вкладка «*Измеренные данные*» раздела области данных.

Корневой элемент «*Лопатки*», изначально пустой в проекте, заполняется элементами при выборе кнопки радиально меню «*Добавить лопатки*». При этом в возникающем окне диалога можно выбрать, сколько новых лопаток требуется добавить в проект (рисунок 10).

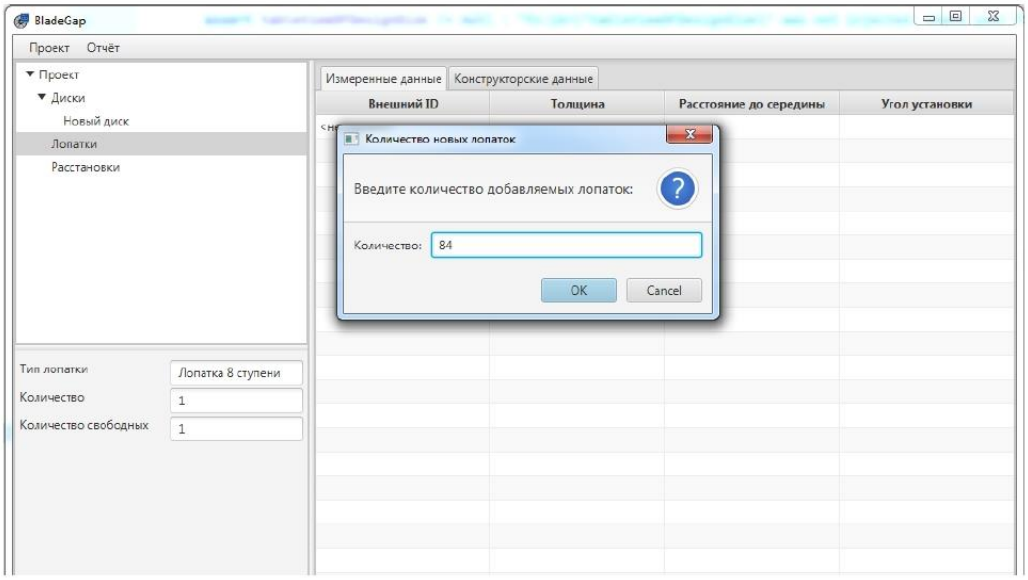


Рисунок 10 – Диалог создания новых лопаток

После добавления требуемого количества лопаток, во вкладке «*Измеренные данные*» области данных появляется такое же количество незаполненных строк. При нажатии на кнопку радиального меню «*Импорт результатов измерения лопаток*» появляется файловый менеджер, с помощью которого выбирается нужный файл *.xlsx и производится импорт измеренных данных по лопаткам (рисунок 11).

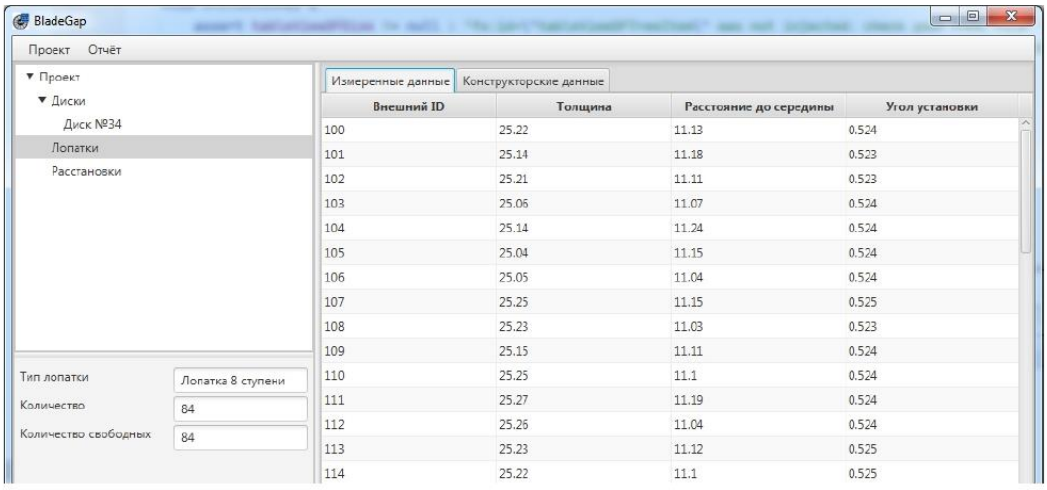
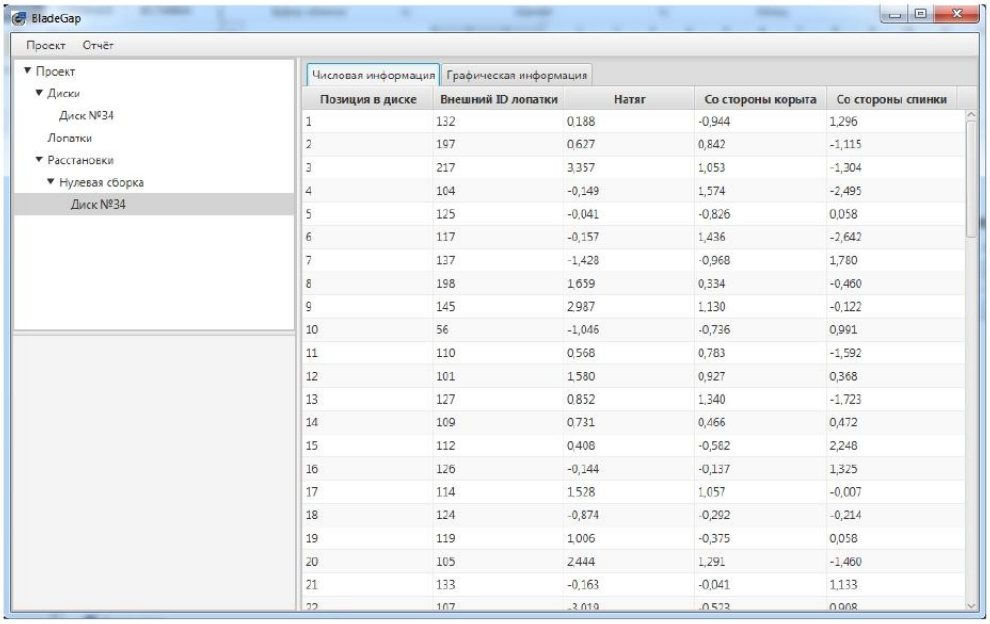


Рисунок 11 – Заполнение вкладки «Измеренные данные» для лопаток

На вкладке «*Конструкторские данные*» области данных содержится список конструкторских размеров и допусков, загруженных из базы данных.

После того, как в проекте создан хотя бы один диск и необходимое для его комплектации количество лопаток, можно создавать комплекты (заполнять дочерними элементами элемент дерева «*Расстановки*»).

7.5 Для создания расстановок (проведения комплектации) выбирается элемент дерева «*Расстановки*», и при нажатии на правую кнопку мыши из контекстного меню выбирается команда «*Провести комплектацию дисков*». В дереве будет создан элемент «*Предварительная расстановка*» (название расстановки можно изменить) с дочерними элементами, количество которых равно количеству дисков в проекте (рисунок 12). К дискам в комплекты присоединяются имеющиеся в проекте лопатки, случайным образом (по порядку).



Позиция в диске	Внешний ID лопатки	Натяг	Со стороны корыта	Со стороны спинки
1	132	0,188	-0,944	1,296
2	197	0,627	0,842	-1,115
3	217	3,357	1,053	-1,304
4	104	-0,149	1,574	-2,495
5	125	-0,041	-0,826	0,058
6	117	-0,157	1,436	-2,642
7	137	-1,428	-0,968	1,780
8	198	1,659	0,334	-0,460
9	145	2,987	1,130	-0,122
10	56	-1,046	-0,736	0,991
11	110	0,568	0,783	-1,592
12	101	1,580	0,927	0,368
13	127	0,852	1,340	-1,723
14	109	0,731	0,466	0,472
15	112	0,408	-0,582	2,248
16	126	-0,144	-0,137	1,325
17	114	1,528	1,057	-0,007
18	124	-0,874	-0,292	-0,214
19	119	1,006	-0,375	0,058
20	105	2,444	1,291	-1,460
21	133	-0,163	-0,041	1,133
22	107	-3,019	-0,573	0,908

Рисунок 12 – Созданный сборочный комплект в проекте

7.6 Все сборочные комплекты объединены в группы расстановок. Группу расстановок можно дублировать, удалить, выполнить оптимальную расстановку лопаток в комплектах или сформировать и экспортировать отчёт, данные опции доступны из контекстного меню, которое появляется при нажатии правой кнопки мыши на выделенном элементе дерева (рисунок 13).

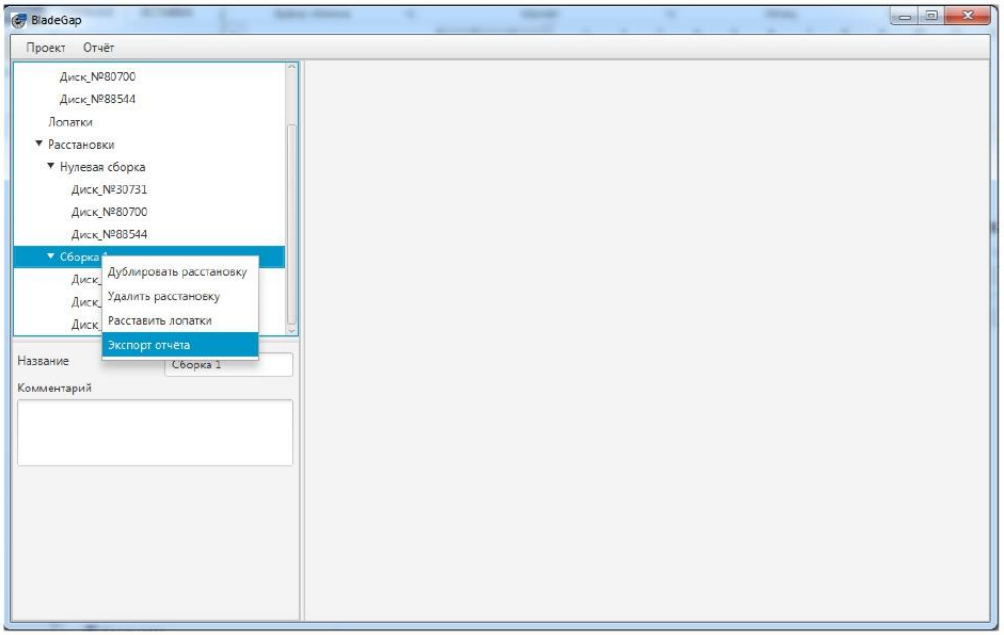


Рисунок 13 – Доступные действия с группой расстановок

Кнопка «*Расставить лопатки*» доступна как для всей группы, так и для каждой отдельной расстановки в группе. При этом в области данных появляется информация по натягам в соединениях лопаток на двух вкладках – «*Числовая информация*», как продемонстрировано на рисунке 14, и «*Графическая информация*».

Натяги рассчитываются с использованием разработанной математической модели.

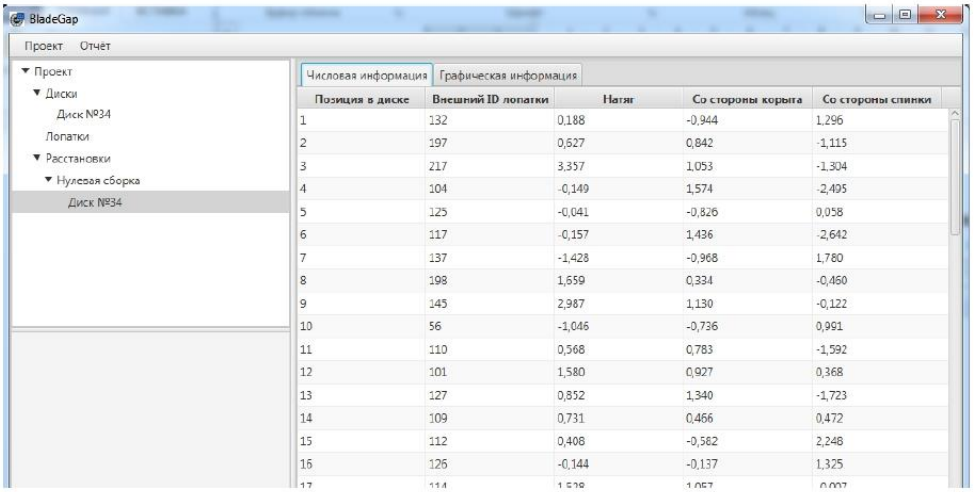


Рисунок 14 – Числовая информация по натягам в выбранной расстановке

В группе расстановок может быть элемент «*СВОБОДНЫЕ ЛОПАТКИ*», с указанным количеством свободных лопаток (рисунок 15).

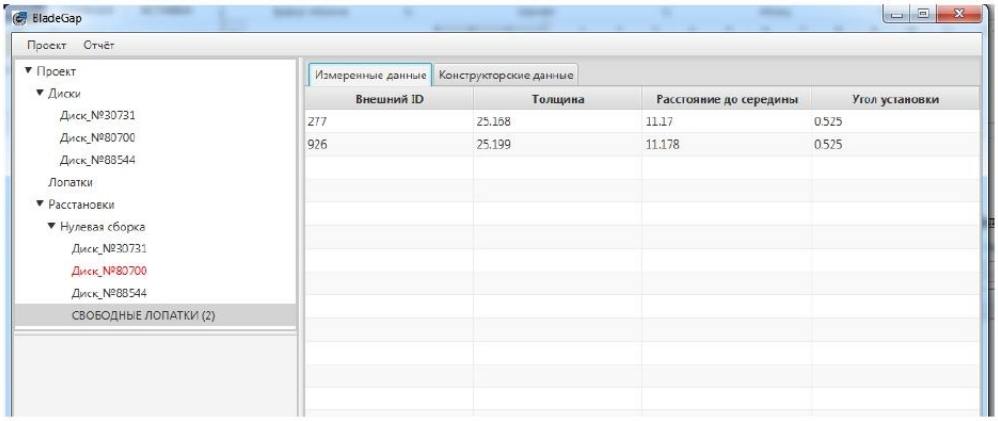


Рисунок 15 – Данные по свободным лопаткам в группе расстановок

Свободные лопатки в группе расстановок могут появиться по двум причинам: 1) общее количество лопаток в проекте превышает требуемое количество для комплектации всех дисков проекта; 2) лопатки были сняты с комплекта (конкретной расстановки) вручную оператором, с помощью кнопки радиального меню «*Снять лопатку*» (рисунок 16).

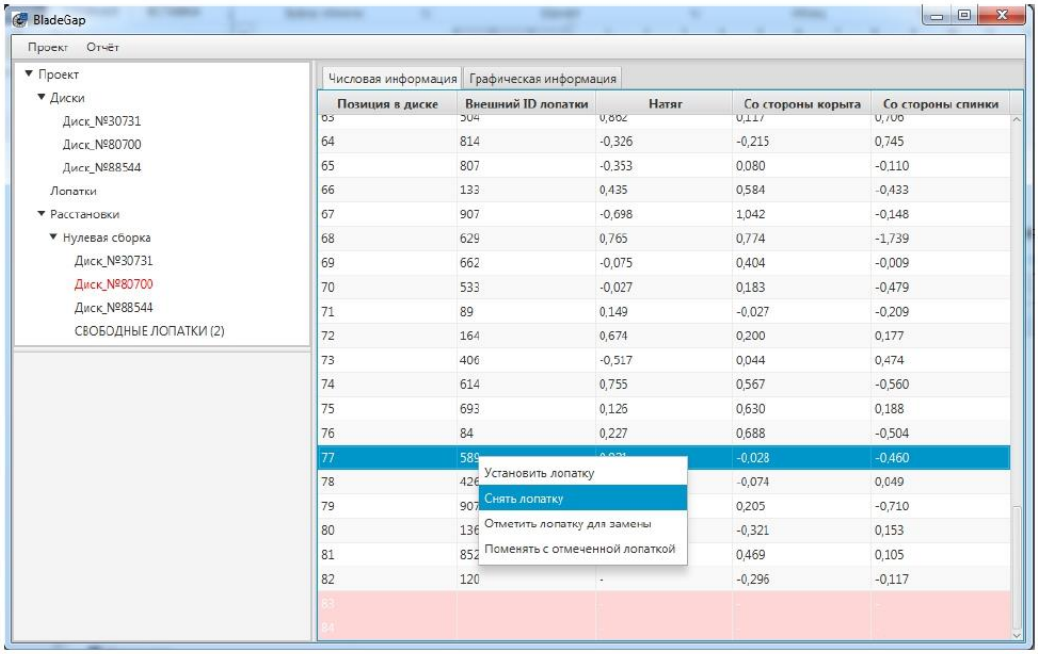


Рисунок 16 – Команда «Снять лопатку» в выбранной расстановке на выбранном пазе

Расстановка, в которой не хватает лопаток до полного комплекта, выделена в дереве проекта красным цветом (рисунок 15, 16), а пустые пазы диска расстановки выделяются розовым цветом в области данных (рисунок 16).

Над загруженными в проект лопатками внутри расстановок пользователю доступно четыре варианта действий: уже отмеченное ранее «*Снять лопатку*»; «*Установить лопатку*»; «*Отметить лопатку для замены*»; «*Поменять с отмеченной лопаткой*».

С помощью команды «*Установить лопатку*» в выбранный пустой паз расстановки устанавливается лопатка из числа свободных, которые выбираются оператором в специальном диалоговом окне, как показано на рисунке 17.

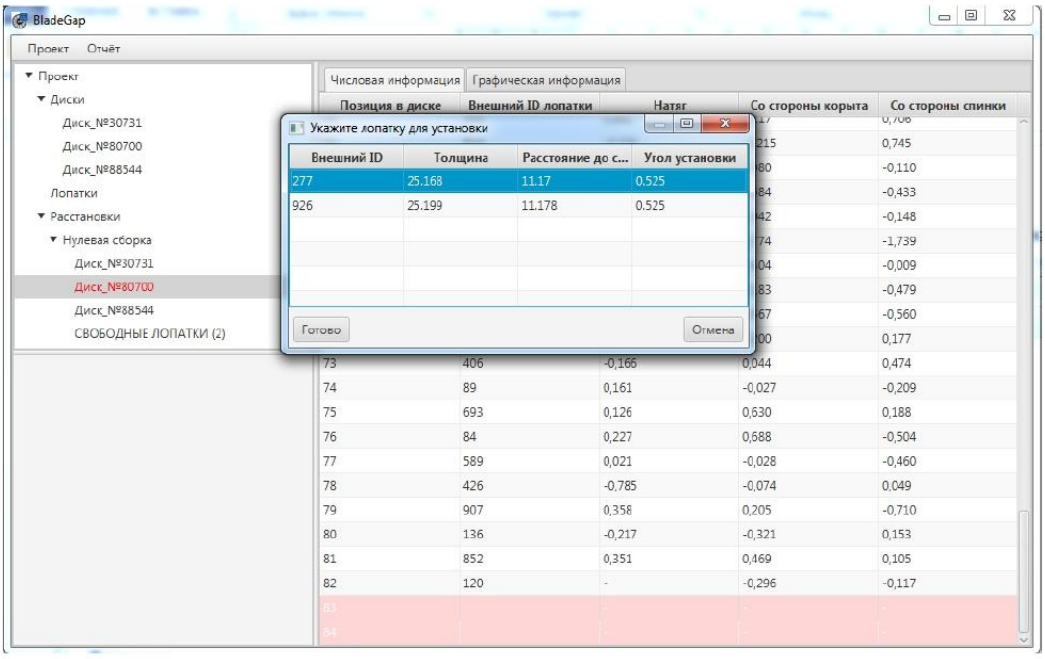


Рисунок 17 – Установка лопатки на свободный паз в расстановке

С помощью команд «*Отметить лопатку для замены*» и «*Поменять с отмеченной лопаткой*» выполняется перестановка лопаток внутри расстановки.

Сначала выбирается лопатка, которая отмечается для замены; при этом паз, где установлена данная лопатка, выделяется зелёным цветом. На рисунке 18 продемонстрирована процедура выбора лопатки для замены и контекстное меню, появляющееся при этом действии.

Затем выбирается лопатка, которую надо поменять местами с отмеченной лопаткой. На рисунке 19 показан снимок программы в процессе проведения выбора подходящей лопатки для перестановки с отмеченной ранее пользователем. В итоге проводимой операции лопатки меняются местами внутри расстановки.

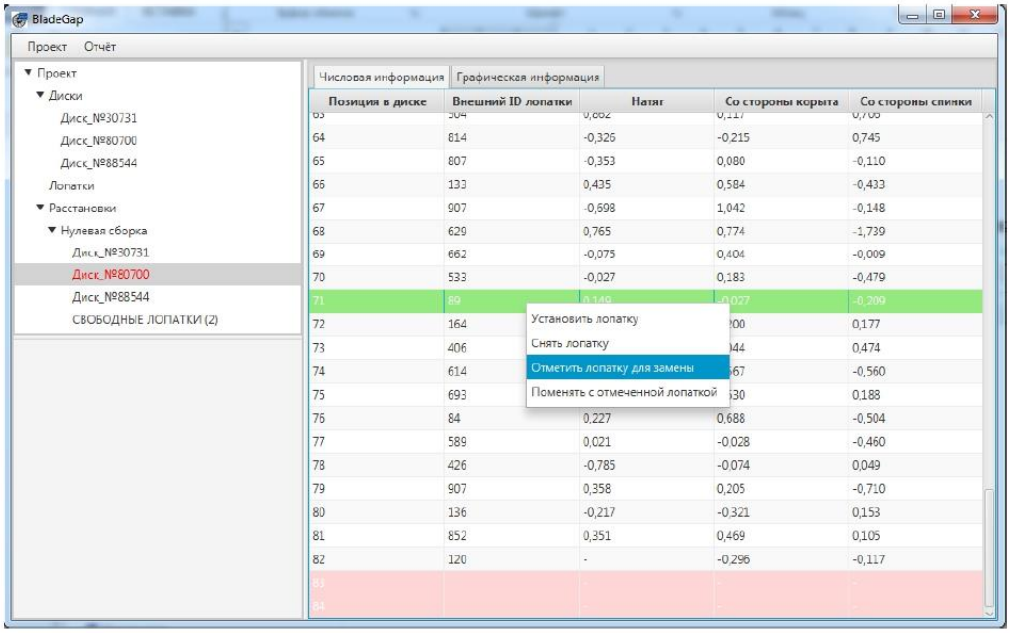


Рисунок 18 – Выбор лопатки для замены

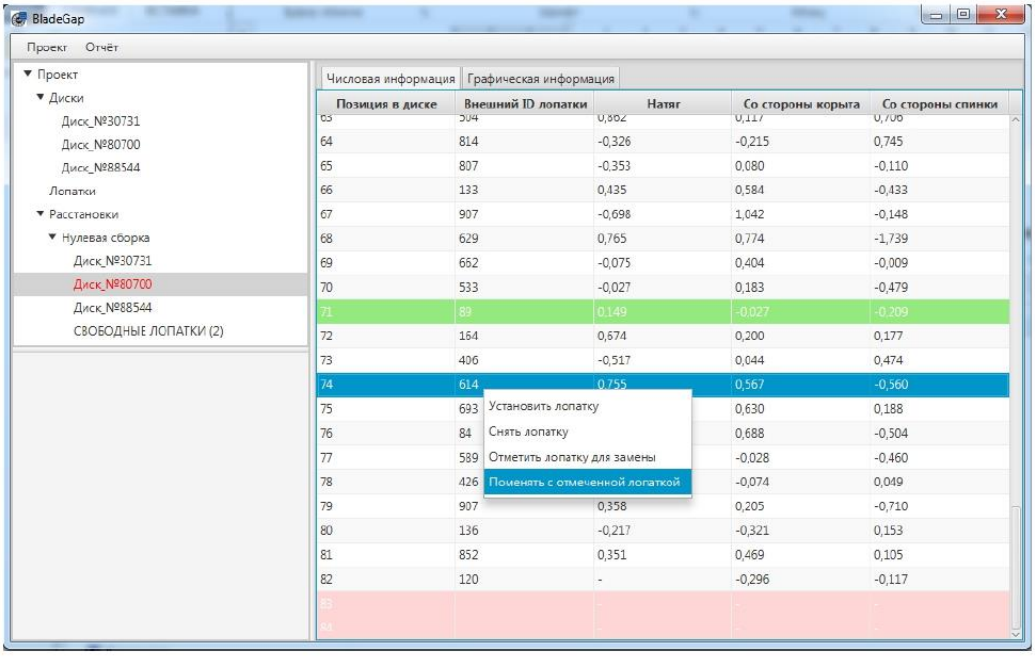


Рисунок 19 – Выбор лопатки для перестановки с отмеченной ранее

На вкладке «*Графическая информация*» для каждой выбранной расстановки создаются два графика: 1) линейный график натягов; 2) гистограмма распределения натягов в расстановке. Данные графики приведены на рисунке 20.

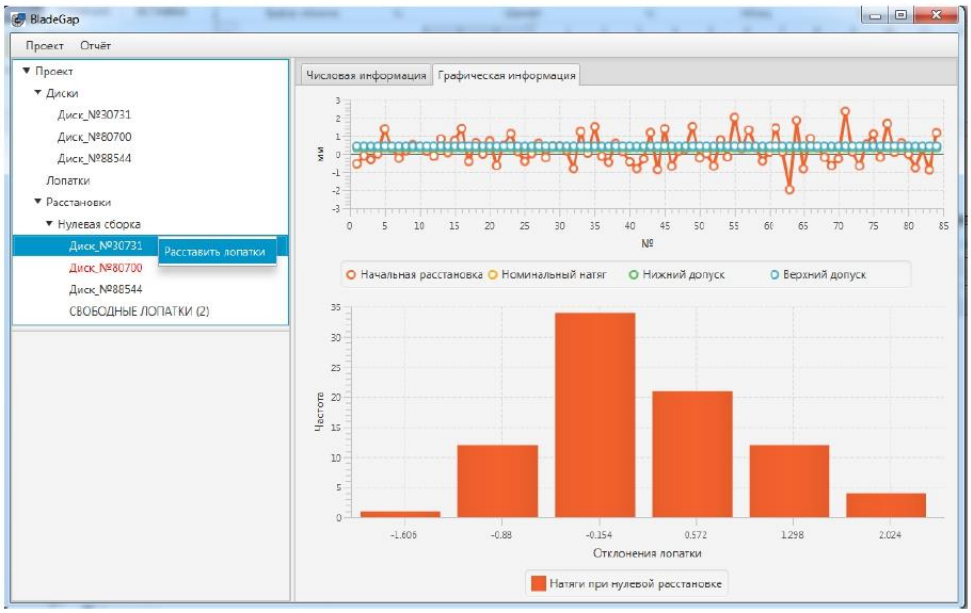
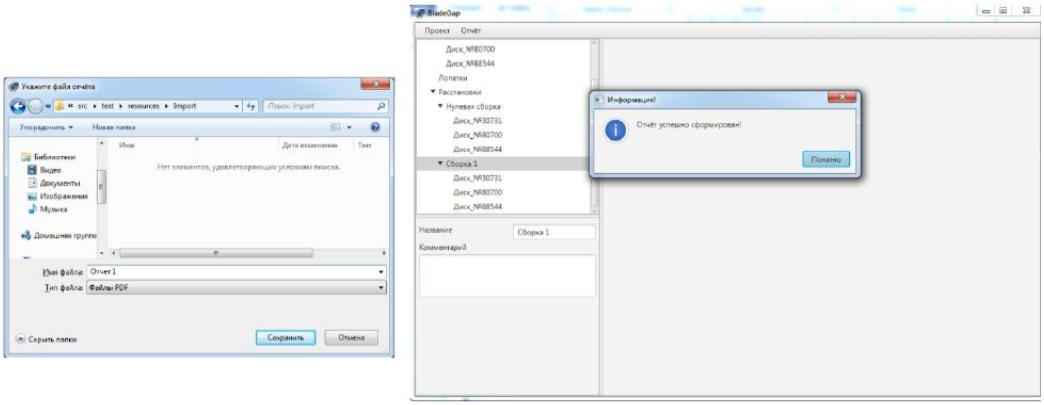


Рисунок 20 – Графическая информация и выбор команды «Расставить лопатки»

Изначально лопатки в дисках расставлены не оптимально. Для снижения вариативности натягов и повышения минимальных значений в расстановке нажимается кнопка «Расставить лопатки», которая автоматически переставляет лопатки внутри расстановки по разработанной методике расстановки. Лопатки переставляются в пазах, числовая и графическая информация при этом изменяются.

Для формирования отчётов с рекомендациями по расстановке лопаток для использования в процессе сборки дисков из контекстного меню элемента выбирается действие «*Экспорт отчёта*». Указывается каталог для экспорта и

название протокола (рисунок 21, а). Если все прошло успешно, то появляется соответственное сообщение (рисунок 21, б).



а б

Рисунок 21 – Действия по формированию отчёта: а) выбор каталога и названия файла; б) информационное окно об успешном формировании отчёта

8 Требования к квалификации операторов

К выполнению измерений и обработке их результатов допускаются лица, имеющих высшее образование, обученные безопасным приемам работы, обученные работе на КИМ персоналом сервисного центра (дилера) в России, имеющие сертификат аттестации и изучившие настоящую инструкцию.

9. Охрана труда

9.1 К работе допускается обученный персонал, прошедший медицинский осмотр и признанный годным для выполнения работ в конкретных условиях, вводный инструктаж по охране труда и первичный инструктаж на рабочем месте, ознакомленный со специальными инструкциями по работе с инструментом, с правилами пожарной безопасности, усвоивший безопасные приемы работы, знающий и умеющий применять методы оказания первой помощи при несчастных случаях.

Н/С

ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

Изменения	Номера листов (страниц)				Всего листов в докумете	Номер документа	Входящий № сопроводительного документа	Подпись	Дата
	изме-ненных	заме-ненных	новых	аннули-рованных					