



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279, ОКПО 02068574
ул. Политехническая, д. 29 литера Б,
вн. тер. г. муниципальный округ Академическое,
г. Санкт-Петербург, 195251
тел.: +7(812)552-60-80, office@spbstu.ru

на № 09.04.2024 № 24/04/2 от _____

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
ФГАОУ ВО СПбПУ



Ю.В. Фомин
2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» на диссертационную работу Болотова Михаила Александровича «Разработка методов создания цифровых технологических моделей деталей и узлов ГТД для повышения технических показателей их производства», представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности «2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

Актуальность темы диссертационной работы

Создание, производство и ремонт авиационной техники сопряжены с решением задач прогнозирования и обеспечения показателей качества изделий. Важнейшими показателями качества газотурбинных двигателей (ГТД) являются топливная экономичность, тяга, ресурс и другие параметры, которые должны соответствовать заданным в конструкторской документации значениям. Значительное влияние на важнейшие показатели качества изделий ГТД оказывает достигнутая геометрическая точность и дисбаланс как отдельных сборочных единиц, так и изделия в целом. К числу основных параметров, влияющих на показатели качества изделий, относятся зазоры и натяги в соединениях, неравномерность зазоров, дисбалансы роторов, распределение дисбалансов вдоль оси ротора и иные параметры. Перечисленные параметры являются сборочными и указываются в рабочих чертежах. Предельные значения сборочных параметров обосновываются на этапе разработки изделий. В ходе технологической подготовки закладываются условия достижения сборочных параметров. Обеспечение сборочных параметров достигается на этапах производства и ремонта изделий. Фактические значения сборочных параметров формируют массивы значений производственных отклонений. Центральной идеей работы автора является реализация индивидуального подхода к каждому изделию путём оценки и фиксирования значений его производственных отклонений для чего вводится и используется термин действительная модель объекта. Необходимость



индивидуального подхода к ГТД определяется условиями неполной взаимозаменяемости деталей и узлов, которые приводят к необходимости комплектации и их доработки под каждое изделие.

Важнейшими производственными процессами, реализуемыми при достижении сборочных параметров узлов и рассматриваемыми в работе соискателя, являются координатные измерения геометрических параметров, сборка узлов и их балансировка. Названные процессы рассматриваются в работе взаимосвязано, особое внимание уделяется созданию методов, позволяющих оценивать сборочные параметры узлов и изделий на основе индивидуальных размеров и формы поверхностей деталей. Разработка упомянутых методов является особо актуальным для этапов сборки и ремонта изделий, поскольку процессы комплектования и пригонки деталей производятся с использованием предварительных сборок, что существенно повышает трудоёмкость процесса и снижает его точность. Значимыми узлами ГТД являются роторы, оказывающие влияние на уровень вибрации изделий и соответственно на его надёжность. Снижение уровня дисбалансов роторов является важной научной проблемой, рассматриваемой в работе автора комплексно с учётом геометрических отклонений деталей ротора и их дисбалансов.

Следует отметить, что в настоящее время назрела необходимость существенного повышения объёмов выпуска продукции, в том числе авиационных двигателей и энергетических установок. Актуальной задачей является повышение эффективности, снижение сроков и затрат на производство за счёт внедрения в производственные процессы цифровых моделей. Рассматриваемые в работе соискателя задачи прогнозирования и обеспечения сборочных параметров изделий напрямую связаны с разработкой цифровых моделей, ориентированных на решение инженерных задач и предназначенных для использования в производстве.

По совокупности сказанного можно заключить, что тема, цель и поставленные автором задачи являются актуальными для авиа и двигателестроения и соответствует заявленной специальности «2.5.15 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов (технические науки)». Содержание исследований полностью соответствует п. 9 – Теоретические основы и технологические процессы изготовления деталей двигателей и агрегатов летательных аппаратов, включая технологическую подготовку и управление производством, технологические процессы и специальное оборудование для формообразования и обработки деталей двигателей, их защита.

Научная новизна положений и выводов в диссертации

Диссертационная работа направлена на повышение показателей качества изделий и эффективности производственных процессов посредством полномасштабного применения технологий математического моделирования. Внедрение цифрового предсказательного моделирования, учитывающего индивидуальные особенности изделий, позволит:

– уточнить этап проектирования изделий посредством повышения детальности учёта технических требований к узлам и изделию;

– модернизировать этап технологической подготовки посредством замены натурной отработки технологических решений на оборудовании цифровым моделированием;

– снизить трудоёмкость и повысить точность выполнения сборочных работ за счёт замены пробных сборок компьютерным расчётом, использующим достоверные математические модели;

– выявлять на этапе сборки комплекты деталей и узлов, имеющих совокупные отклонения параметров, которые могут привести к повышенной вибрации изделия.

Заявленные автором положения, определяющие научную новизну работы, направлены на разработку методов и средств, предназначенных для внедрения цифровых моделей в производственные процессы измерения геометрических параметров деталей, сборки и балансировки узлов:

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

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

3) метод оценки параметров сопряжений деталей и узлов для расчётов размерных связей, отличающийся от известных методов использованием действительных моделей геометрических объектов, позволяющий определять их деформации при сборке с учётом условий выполнения технологических операций.

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

5) метод снижения уровня неуравновешенностей роторов ГТД с помощью балансировки на цифровой модели, отличающийся от существующих методов способом расчёта их оптимального положения в окружном направлении за счёт обеспечения противонаправленности возмущающих воздействий от неуравновешенностей деталей и сборочных единиц.

б) алгоритм и модель определения рациональных условий сборки роторов ГТД с целью повышения точности и снижения трудоёмкости сборки, отличающиеся от существующих решений возможностью комплексного учёта требований к точности сборочных параметров и величине дисбаланса узлов.

Приведенные положения позволили разработать программные средства, предназначенные для внедрения в производство.

Анализ основных результатов диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из Введения, пяти глав, Выводов, основных результатов работы и Приложений.

Во введении, проведено обоснование актуальности исследования, приведены характеристика работы, сформулированы цель, задачи и научная новизна исследований. Также представлены ключевые положения диссертации и сведения об апробации результатов работы.

В первой главе работы приведён статистический анализ причин повышенной вибрации изделий. Сформирован вывод о необходимости повышения геометрической точности и снижения неуравновешенностей составляющих узлов и деталей компрессоров и турбин.

Проведён анализ современного состояния исследований по обеспечению технических показателей производства ГТД. Подчёркнута взаимосвязь параметров деталей и узлов с техническими параметрами изделий. Отмечена особая роль геометрической точности в обеспечении качества, надёжности изделий. Сформулирован вывод о возможности использования цифровых технологий в производстве сборочных единиц ГТД для снижения трудоёмкости и погрешностей сборки узлов за счёт управления накоплением систематических погрешностей геометрических параметров комплекта деталей. Уровень дисбалансов роторов в процессе их сборки может быть снижен посредством учёта фактического распределения дисбалансов деталей и узлов. Перспективным направлением совершенствования сборочных процессов является использование технологии виртуальной сборки. Прогнозирование сборочных параметров на основе цифровых результатов измерений деталей позволит определять приемлемый или оптимальный варианты сборки, характеризующиеся допустимыми значениями сборочных параметров. Отмечена перспективность использования результатов измерений объектов, формируемых в цифровом виде и представляемых массивами измеренных точек, для практического решения задач повышения технических параметров изделий. Отмечена важность математического описания и представления действительных поверхностей деталей и сборочных единиц для создания цифровых моделей производственных процессов. Значительную роль в повышении достоверности измерений геометрических параметров играют методы и модели обработки результатов измерений, а также методики выполнения измерений. Сделан вывод, что существующие методы и модели в этой связи в полной мере не удовлетворяют предъявляемым требованиям авиационного двигателестроения.

Подводя итог аналитического обзора, автор делает вывод, что технические показатели производства ГТД могут быть улучшены за счёт повышения управляемости технологическими процессами изготовления деталей и сборки узлов, если принимать во внимание их реальную геометрию. Более детальный учёт реальной геометрии деталей и узлов ГТД в производственных процессах возможен посредством разработки специализированных методов, позволяющих обеспечить информационную достаточность представления геометрии объектов в цифровых моделях. На основании проведённого анализа литературных источников сформулированы следующие задачи диссертационного исследования.

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

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

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

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

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

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

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

Вторая глава содержит основополагающие сведения о понятии, разработке и использовании действительных моделей для повышения технических показателей производства ГТД. Приводится введённое автором понятие «действительная модель», которое обозначает цифровую модель сборочных единиц и/или производственных процессов технических объектов. Названная модель содержит совокупность действительных размеров, технических

требований, физико-механических свойств, функциональных и иных условий работы, обладающую свойствами необходимости и достаточности её информационного содержания для решения конструкторских, технологических и иных задач. Действительные модели объектов формируются на основе результатов геометрических и иных измерений, а поэтому их достоверность играет ключевую роль. Особое внимание автором уделяется на учёте следующих геометрических параметров поверхностей объектов авиационных двигателей, используемых при создании действительных моделей объектов и процессов: отклонения формы (её случайных и систематических погрешностей); параметров расположения поверхностей.

Разработка, использование, состав действительных моделей объектов и процессов на разных этапах производства ГТД должны выполняться с учётом предложенных автором принципов: информационной достаточности; информационной необходимости; целеполагания; оперативности управления; необходимого и достаточного количества точек контроля и управления процессами производства ГТД. Разработана методика создания действительных моделей объектов, описывающая их геометрические параметры.

Автором системно описаны место и роль действительных моделей деталей и узлов при решении технологических задач в виде структурно-функциональной диаграммой взаимосвязи конструкторских и технологических уровней подготовки производства ГТД. В диаграмме приведены уровни функциональных связей, основные параметры и объекты, необходимые для повышения эксплуатационных и технологических характеристик ГТД, функциональные связи и решаемые задачи, подразделяемые на задачи анализа и синтеза.

С целью повышения достоверности действительных моделей объектов и определения необходимого количества информации, формируемой при измерениях, предложен метод определения действительных геометрических параметров деталей и сборочных параметров узлов с помощью виртуальных мер (ВМ) и комплектных виртуальных сборок (КВС). Предложенный метод предназначен для обработки результатов измерений, представленных массивами точек поверхностей, поступающих от контактных координатно-измерительных машин и оптических сканеров. Метод отличается от существующих методов обработки результатов измерений, идеей имитирования связей по сопрягаемым поверхностям с ответными поверхностями деталей узла, при этом измеряемые поверхности рассматриваются в совокупности. В существующих методах обработки производится осреднение отклонений формы поверхностей с использованием метода наименьших квадратов.

Проведены численные эксперименты по виртуальным измерениям поверхностей детали «Проставка» с оценкой её геометрических параметров методом МНК и с помощью технологии ВМ на выборке 1200 деталей. Результаты исследований показали различие оцениваемых параметров в среднем на 20%. Использование предложенного метода при создании действительных моделей

деталей и узлов позволит учитывать особенности формируемых размерных связей, определяемых возможными сопряжениями контактирующих поверхностей измеряемых объектов.

Третья глава посвящена прогнозированию и обеспечению геометрической точности размерных связей с использованием действительных моделей объектов. Прежде всего, внимание уделяется сборочным размерным связям в узлах ГТД, а именно в роторах.

Предложены метод и комплекс моделей оценки параметров сопряжений деталей и узлов, которые учитывают размерные связи деталей и узлов посредством моделирования сопряжений множества соответствующих поверхностей. Метод позволяет учесть влияние отклонений формы и расположения контактирующих поверхностей на величину оцениваемых сборочных геометрических параметров узлов. Учёт данных факторов в теории размерных цепей затруднён. Данное обстоятельство особенно важно при расчёте сборочных параметров узлов, имеющих множественные сопряжения поверхностей деталей, которые характеризуются недостаточной жёсткостью с высокими требованиями к геометрической точности. Яркими представителями таких узлов являются роторы ГТД, особенно барабанно-дискового типа, которые распространены в существующих и перспективных изделиях.

Представлена формальная постановка задачи оптимизации сборки узла. Сборка узла определена в базовой системе координат, включает множество деталей и их поверхностей. Предусматривается множество возможных дискретных состояний сборки, характеризующихся различным взаимным расположением деталей, определяемыми сопряжениями их поверхностей. Формируется условие достижения целевых или желаемых показателей качества сборки, используемое для определения параметров выполнения технологических сборочных операций. В качестве таких параметров при выполнении сборки ротора ГТД могут выступать относительные угловые положения узлов – рабочих колёс.

Реализация метода оценки параметров сопряжений деталей и узлов осуществляется для двух вариантов. В первом варианте детали рассматриваются как абсолютно жёсткие. Во втором варианте учитывается податливость деталей.

Оценка геометрических параметров сопряжений поверхностей абсолютно жёстких деталей производится по двум предложенным моделям. Первая модель основана на выполнении наилучшего совмещения поверхностей при ограничениях на их пересечение. Данная модель является универсальной по отношению к сопрягаемым поверхностям, рассматривает их как сложные и позволяет учитывать формирующийся контакт. Вторая модель сопряжения поверхностей деталей базируется на численном способе множества сечений. Её целесообразно использовать для деталей, имеющих сопрягаемые отвесные наклонные поверхности, например конусные.

В случае второго варианта разработана методика моделирования сопряжений поверхностей деталей на основе использования метода конечных

элементов (КЭ), включающая восемь этапов. Проверка достоверности разработанных моделей выполнялась с использованием макетов и натуральных образцов деталей «диск» и «проставка» ротора турбины. Величина расхождения результатов теоретических и экспериментальных исследований не превысила 25%, что является удовлетворительным результатом, поскольку вычисления выполняются в цеховых условиях с ограничением по времени и вычислительным ресурсам. С целью ускорения вычислений и снижения требований к мощности ЭВМ предложен метод оценки параметров сопряжений деталей на основе использования технологий машинного обучения, позволяющий оперативно оценивать геометрические параметры размерных связей в цеховых условиях.

Автором предложен метод повышения точности сборки узлов за счёт автоматизации операции пригонки деталей с использованием их действительных моделей. В основе метода заложено цифровое моделирование сопряжений деталей и определение варианта коррекции поверхностей, исходя из наилучшего соответствия заданным величинам сборочных параметров.

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

Предложен метод снижения уровня неуравновешенностей роторов ГТД с помощью балансировки на цифровой модели. Идея балансировки ротора с использованием цифровой модели состоит в выборе относительных взаимных угловых положений деталей, при которых обеспечивается противонаправленность возмущающего воздействия от их неуравновешенностей и определение величин корректировочных масс. Уменьшение суммарной неуравновешенности ротора выполняется по значениям виброскоростей на опорах двигателя, получаемых с помощью цифровой модели изделия.

Реализация метода снижения уровня неуравновешенностей роторов ГТД с помощью балансировки на цифровой модели включает два этапа. На первом этапе производится поиск начального приближения для определения углового расположения деталей с использованием модели балансировки, рассматривающей ротор как абсолютно жёсткое тело без учёта погрешностей, возникающих при сопряжении деталей. На втором этапе выполняется уточнение углового расположения деталей с использованием конечно-элементной модели, учитывающей деформации ротора. Для реализации предложенного метода разработаны специализированные методики и алгоритмы. Приводится описание моделей первого и второго этапов.

Совокупность действительных моделей узлов ротора, его цифровой модели, позволяющей оценивать уровень виброскоростей на опорах, а также оптимизационной модели для определения рациональных угловых положений деталей и узлов, составляют цифровой двойник ротора, предназначенный для использования в производстве на этапе сборки и балансировки.

Верификация разработанных моделей выполнялась с использованием имитатора ротора турбины низкого давления, который воспроизводит его размеры

в масштабированном виде и содержит: вал, диск и две ступицы для установки диска и образования плоскостей коррекции. Расхождение теоретических и экспериментальных результатов по уровню вибраций на опорах ротора не превысило 17%.

Проводились теоретические исследования влияния неуравновешенностей и углового положения деталей ротора на величины виброскоростей его опор относительно исходного уровня вибраций. Исследования показали, что выявленные рациональные угловые положения деталей, позволяют снизить уровень вибрации ротора с 35% до 5%, что является существенным.

Трудоёмкость вычислений КЭМ модели, используемой на втором этапе метода снижения уровня неуравновешенностей роторов ГТД, значительная, что препятствует её применению на производстве. Поэтому, определение вибраций роторов по результатам измерений деталей в цеховых условиях может выполняться с использованием технологии машинного обучения на основе расчётных данных, полученных с использованием КЭМ исследуемого ротора.

В пятой главе описаны технологические решения для производства сборочных единиц ротора низкого давления, основанные на использовании действительных моделей и ориентированные для применения в цифровом производстве. Анализировалась сборка роторов турбины и компрессора низкого давления (КНД). Проведён статистический анализ отклонений формы присоединительных поверхностей ротора, включающей выборку нескольких сотен деталей. Сформированы профили ожидаемых максимальных, средних и минимальных отклонений формы поверхностей.

Ключевым результатом пятой главы является предложенная математическая модель нахождения рациональных условий выполнения операций сборки роторов. Данная модель позволяет определять относительные угловые положения деталей в роторе согласно комплекточной ведомости посредством трёх критериев. Первый критерий предусматривает наилучшее соответствие заданным параметрам качества сборки узла, в качестве которых может выступать соответствие геометрическим сборочным параметрам, например торцевым и радиальным биениям контрольных поверхностей ротора. Второй критерий предусматривает наилучшее соответствие заданным требованиям к рабочим и эксплуатационным параметрам изделия, в качестве которых может выступать дисбаланс ротора. Третий критерий является смешанным и предусматривает компромиссное решение по достижению, в частности радиальных и торцевых биений ротора и его дисбаланса. Определение рациональных параметров сборки роторов выполняется с использованием моделей прогнозирования геометрических размерных связей и величин дисбалансов, изложенных в главах 2, 3 и 4.

Проводились исследования по применению модели нахождения рациональных условий выполнения операций сборки роторов в цеховых условиях для роторов турбины низкого давления (ТНД) и компрессора низкого давления (КНД) изделия марки «НК». Расхождение между оценёнными и измеренными в

эксперименте радиальными и торцевыми биениями ротора КНД в среднем составляет 15%. Определённые в ходе расчёта относительные угловые положения деталей ротора КНД позволили снизить погрешности сборочных параметров (торцевых и радиальных биений рабочих колес) в среднем на 23% и уменьшить величину дисбаланса на 80% по сравнению со сборкой ротора с произвольным положением ДСЕ в окружном направлении. Применение результатов моделирования в производстве позволит снизить количество предварительных сборок с 4 до 2, что снижает трудоёмкость общей сборки ротора и изделия в целом. Проведена оценка экономического эффекта, который в расчёте на 30 изделий составил 3 161 250 руб. С целью практического внедрения результатов приведены инженерные методики.

Выводы и основные результаты работы

Диссертационное исследование Болотова М.А. является значительным вкладом во внедрение цифровых технологий в разработку авиационных ГТД и позволяет на новом уровне учитывать реальную геометрию деталей и узлов при решении задач технологической подготовки и сборки роторов ГТД.

Автором сделан акцент на следующих результатах исследований:

1. Предложенной научной идеи, основных принципах, предусматривающих разработку и сквозное использование действительных моделей объектов при решении технологических задач обеспечения качества при производстве и ремонте ГТД.

2. Обобщённой методики создания действительных моделей деталей и узлов ГТД по результатам их измерений, при этом решена задача определения необходимого и достаточного объёма измеренных данных для создания действительных моделей деталей и узлов ГТД применительно к операциям сборки роторов.

3. Методе определения действительных геометрических параметров деталей и сборочных параметров узлов с помощью ВМ и КВС, учитывающем сопряжения контактирующих поверхностей объектов, и позволяющем повысить точность оценки действительных размеров деталей и сборочных параметров узлов на 20% по сравнению с существующими технологиями.

4. Методе, включающем комплекс моделей для оценки параметров сопряжений деталей и узлов при учёте контактного взаимодействия их поверхностей с использованием действительных моделей, обеспечивающем повышение точности расчётов сборочных параметров на 25% по сравнению с методом размерных цепей.

5. Методе повышения точности сборки узлов за счёт расчёта параметров операции пригонки деталей с использованием их действительных моделей, позволяющем обеспечивать требуемую площадь контакта поверхностей и необходимую точность взаимного расположения деталей.

6. Методе снижения неуравновешенностей роторов ГТД с помощью балансировки на цифровой модели, учитывающем геометрические погрешности и

неуравновешенности деталей с использованием действительных моделей деталей и узлов роторов. Использование метода показало, возможность уменьшения вибрации на опорах ГТД в процессе его сборки не менее чем на 30% посредством учёта производственных погрешностей входящих в него деталей и узлов.

7. Модели определения рациональных угловых положений деталей ротора ГТД. Определённые в ходе расчёта относительные угловые положения деталей ротора компрессора низкого давления позволяют снизить погрешности сборочных параметров (торцевых и радиальных биений рабочих колес) в среднем на 23% и уменьшить величину дисбаланса на 80% по сравнению со сборкой ротора с произвольным положением ДСЕ в окружном направлении. Использование результатов моделирования позволит снизить трудоёмкость сборки за счёт сокращения количества предварительных сборок с 4 до 2.

На основе анализа приведенных результатов выполненных исследований можно утверждать, что поставленная цель диссертационной работы выполнена в полном объёме.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов в диссертации

Научные результаты диссертационной работы получены автором путём корректного применения современного научно-технического инструментария, который включает методы вычислительной математики и прикладной механики, современные подходы инженерного анализа, проектирования и применения передовых программных систем. Также научные положения и выводы работы подтверждены путём прямого применения непосредственно в процессе производства.

Стиль изложения и оформления диссертационной работы

Диссертационная работа изложена хорошим литературным русским языком и представляется качественно оформленным научным исследованием в соответствии с имеющимися требованиями к научным публикациям (ГОСТ Р 7.0.11-2011).

Апробация и публикации по результатам диссертации.

Согласно приведенным ссылкам на публикации, автором в ходе выполнения диссертационной работы, опубликованы 32 работы в изданиях из перечня, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертационных работ на соискание ученой степени кандидата наук, и приравненных к ним (45 статей опубликованы в изданиях, индексируемых Scopus), а также 23 работы представлены в других изданиях. Апробация результатов работы проведена в рамках ряда Всероссийских и Международных конференций.

Замечания по диссертационной работе

По диссертационной работе имеются следующие замечания.

1. Диссертационная работа посвящена описанию возможности использования действительных моделей деталей и узлов ГТД для совершенствования технологии их производства. На наш взгляд было бы интересным рассмотреть возможность

использования действительных моделей деталей и узлов ГТД на этапе проектирования и доводки изделий конструкторскими службами.

2.Автором не описана последовательность выполнения измерения геометрии ротора в сборе. Какие средств измерения применялись в экспериментах: универсальные, специальные контрольно-измерительные приспособления, координатно-измерительные машины или их комбинации?

3.Автором работы не было рассмотрено моделирование сборки компрессора и турбины низкого давления совместно. Такой подход позволил бы получить более адекватные результаты для анализа состояния ротора в сборе с целью обоснования плана мероприятий по повышению его геометрической точности и снижению дисбалансов.

4.При анализе дисбаланса ротора в сборе, не учитывалась возможность снижения дисбаланса за счет перераспределения лопаток в рабочих колесах, хотя математическая модель такую возможность предусматривает. Разработка методики корректировки с использованием комбинированного подхода увеличила бы практическую ценность исследования.

5.Полученные в ходе измерений деталей и моделировании сборки узлов данные могут быть использованы для формирования их цифровых паспортов. Практическая часть работы не содержит описание этой возможности.

Отмеченные недостатки не являются существенными и не влияют на общую положительную оценку работы.

Рекомендации по использованию результатов исследования

Полученные в ходе диссертационного исследования результаты могут рекомендоваться для решения следующих задач:

– повышения функциональных возможностей цифровых двойников изделий посредством учёта геометрических и иных особенностей деталей и узлов с использованием действительных моделей объектов;

– создания программного обеспечения, позволяющего повысить достоверность результатов измерений геометрии деталей и узлов;

– создания программного обеспечения, позволяющего улучшить процесс балансировки роторов посредством повышения равномерности распределения масс;

– создания программных систем для определения условий выполнения сборки роторов и иных узлов ГТД.

Полученные результаты работы, при учёте их адаптации, могут быть использованы на предприятиях Объединённой двигателестроительной корпорации, включая ПАО «ОДК-Кузнецов», АО «ОДК-ПМ», ПАО «ОДК-УМПО», ПАО «ОДК-Сатурн», АО «218 АРЗ» и ПК «Салют». Кроме того, результаты работы могут быть использованы на иных предприятиях, занимающихся выпуском энергетических установок и наукоёмкой продукции – АО «НПП «Аэросила», ПАО «Силовые машины» и иных.

Заключение

Диссертационная работа Болотова Михаила Александровича, представленная на соискание учёной степени доктора технических наук, представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая имеет важное значение для совершенствования технологии сборки ГТД и вносит существенный вклад во внедрение цифровых технологий в разработку авиационных ГТД. Автореферат диссертации достаточно полно отражает её содержание.

Рассматриваемая диссертация выполнена на высоком научном уровне, носит законченный характер и соответствует пункту 9 Положения о присуждении учёных степеней, а её автор, Болотов Михаил Александрович заслуживает присуждение учёной степени доктора технических наук по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Отзыв ведущей организации обсуждён и принят на заседании Высшей школы передовых цифровых технологий Передовой инженерной школы СПбПУ «Цифровой инжиниринг», протокол №1 от «27» июня 2024 года.

Присутствовало на заседании – 15 человек, с правом голоса – 9 человек, без права голоса – 6 человек.

Результаты голосования: «за» - 9 человек, «против» - 0 человек, «воздержался» - 0 человек. Протокол №1 от «27» июня 2024 года.

Заслуженный работник высшей школы,
Доктор технических наук, профессор
Института передовых производственных технологий,
Физико-Механического института
Санкт-Петербургского политехнического
университета Петра Великого

Ю.Я. Болдырев

Директор Института передовых
производственных технологий,
Директор Высшей школы передовых
цифровых технологий,
к.э.н., доцент

В.А. Левенцов