

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Болотова Михаила Александровича
на тему «Разработка методов создания цифровых технологических моделей деталей
и узлов ГТД для повышения технических показателей их производства»,
представленной на соискание учёной степени доктора технических наук
по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели
и энергоустановки летательных аппаратов

1. Актуальность темы диссертации

Обеспечение эксплуатационных параметров газотурбинных двигателей (ГТД) является важной задачей, которая связана с необходимостью достижения высокой геометрической точности и заданного уровня неуровненностей деталей и узлов. Ключевыми этапами обеспечения геометрической точности деталей и узлов являются механическая обработка заготовок, измерение и сборка. Особенностью изготовления и сборки ГТД является использование метода неполной взаимозаменяемости, предполагающего взаимное комплектование деталей и их доработку. Обеспечение метода неполной взаимозаменяемости реализуется посредством технологических размерных расчётов с использованием размерных цепей. Если точность существующих расчётных моделей и методов недостаточна, то применяются предварительные сборки узлов, позволяющие определить интересующие значения геометрических параметров, которые должны соответствовать требованиям конструкторской документации. Применение предварительных сборок существенно увеличивает трудоёмкость достижения заданной точности и приводит к ухудшению качества поверхностей деталей из-за частого силового воздействия в процессе сборки. Поэтому актуальным является развитие методов и моделей, позволяющих оценивать геометрические параметры узлов на основе информации о геометрических измерениях деталей. Для этого необходимо реализовывать индивидуальный подход к каждой детали и узлу. В рамках диссертационного исследования в полной мере реализуется индивидуальный подход, предполагающий измерение и учёт геометрии поверхностей деталей и/или узлов, а также иных параметров с необходимой информационной достаточностью. Рассматриваются вопросы математического описания действительной геометрии поверхностей деталей с требуемой точностью, что необходимо для реализации индивидуального подхода к изделию. Таким образом, диссертационная работа посвящена решению крупной научно-технической проблемы повышения технических показателей производства деталей и узлов ГТД.

2. Новизна проведённых исследований и полученных результатов

Наиболее важными научными результатами диссертационного исследования являются:

— 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;

– 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;

– 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;

– 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;

метод снижения уровня неуровновешенностей 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 неуровновешенностей деталей и сборочных единиц;

– 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.

3. Степень обоснованности и достоверности основных положений и выводов диссертационной работы

Автором выделены семь основных выводов и научных положений. Все выводы обоснованы результатами исследований, представляемыми в соответствующих главах диссертации.

В первом выводе констатируется предложенная научная идея, сформулированы основные принципы, предусматривающие разработку и сквозное использование действительных моделей объектов при решении технологических задач обеспечения качества при производстве и ремонте ГТД. Отмечаются разработанные базовые принципы использования действительных моделей деталей и узлов для повышения управляемости технологий производства ГТД, а также повышения точности и производительности операций сборки. Резюмируется обоснованность содержания и применимости действительных моделей деталей и узлов ГТД в процессе технологической подготовки и производства изделий. Вывод основан на результатах главы 2 (с. 63-72). Разработанные теоретические положения используются во всех последующих главах.

Второй вывод представляет разработанную обобщённую методiku создания действительных моделей деталей и узлов ГТД по результатам их измерений. Формируется заключение о решении задачи определения необходимого и достаточного объёма измеренных данных для создания действительных моделей деталей и узлов ГТД

применительно к операциям сборки роторов. Вывод основан на результатах главы 2 (с. 72-81). Разработанные теоретические положения используются во всех последующих главах.

Третий вывод представляет разработанный метод определения действительных геометрических параметров деталей и сборочных параметров узлов с помощью ВМ и КВС, учитывающий сопряжения контактирующих поверхностей объектов. Автор делает вывод, что применение метода позволяет повысить точность оценки действительных размеров деталей и сборочных параметров узлов на 20% по сравнению с существующими технологиями. Заключается, что использование метода при создании действительных моделей деталей и узлов позволит учитывать особенности формируемых размерных связей, определяемых возможными сопряжениями контактирующих поверхностей измеряемых объектов. Вывод основан на результатах главы 2 (с. 81-91 и с. 113-123). Разработанные теоретические положения используются в 3 и 5 главах.

Четвертый вывод представляет разработанный метод, включающий комплекс моделей для оценки параметров сопряжений деталей и узлов при учёте контактного взаимодействия их поверхностей с использованием действительных моделей, основанный на создании и использовании действительных моделей объектов, обеспечивающий повышение точности расчётов сборочных параметров. Заключается, что использование метода позволяет определять геометрические параметры сопряжений деталей при допущении их абсолютной жёсткости при учёте податливости технической системы собираемое изделие – технологическое оснащение. Проведены теоретико-экспериментальные исследования геометрических сопряжений деталей при их контактном взаимодействии на основе статистически обоснованных возможных вариантов геометрии контактирующих поверхностей. Автор делает вывод, что точность расчёта биений ротора в сборе при применении метода увеличилась на 25% по сравнению с методом размерных цепей. Вывод основан на результатах главы 3 (с. 124-143 и с. 143-146, Приложения В, Г, Д, Е на с. 298-336). Метод и комплекс моделей используются в 5 главе.

Пятый вывод представляет метод повышения точности сборки узлов за счёт расчёта параметров операции пригонки деталей с использованием их действительных моделей. Констатируется, что повышение точности сборки узлов достигается расчётом оптимального взаимного расположения деталей и микрообъемов удаляемого металла при пригонке поверхностей. При этом, применение метода на операциях доводки при сборке узлов ГТД позволяет обеспечивать требуемую площадь контакта поверхностей. Вывод основан на результатах главы 3 (с. 148-152).

Шестой вывод представляет метод снижения неуравновешенностей роторов ГТД с помощью балансировки на цифровой модели, учитывающий геометрические погрешности и неуравновешенности деталей с использованием действительных моделей деталей и узлов роторов. Заявляется, что в результате использования метода обеспечивается снижение уровня вибраций роторов на опорах за счёт выбора рационального углового положения деталей и узлов, позволяющего компенсировать возмущающие воздействия от их неуравновешенностей. Автор делает вывод, что использование предложенного метода снижения неуравновешенностей роторов ГТД позволит уменьшить вибрации на опорах ГТД в процессе его сборки не менее чем на 30% посредством учёта производственных погрешностей входящих в него деталей и узлов. Вывод основан на результатах главы 4 (с. 158-160 и с. 193-199). Метод и комплекс моделей используются в 5 главе.

Седьмой вывод представляет разработанную и верифицированную модель определения рациональных угловых положений деталей ротора ГТД. Автор формирует вывод, что определённые с использованием метода относительные угловые положения деталей ротора компрессора низкого давления позволяют снизить погрешности сборочных параметров (торцевых и радиальных биений рабочих колес) в среднем на 23% и уменьшить величину дисбаланса на 80% по сравнению со сборкой ротора с произвольным положением ДСЕ в окружном направлении. Использование результатов моделирования позволит снизить трудоемкость сборки за счёт сокращения количества предварительных сборок с 4 до 2. Вывод основан на результатах главы 5 (с. 209-212 и с. 229-233).

В целом представленные в диссертации научные положения и приведённые результаты экспериментальных исследований подтверждают обоснованность принятых подходов при разработке:

- метода определения действительных геометрических параметров деталей и сборочных параметров узлов с помощью ВМ и КВС;
- метода и комплекса моделей оценки параметров сопряжений деталей и узлов;
- метода повышения точности сборки узлов за счёт автоматизации операции пригонки деталей с использованием их действительных моделей;
- метода снижения уровня неуравновешенностей роторов ГТД с помощью балансировки на цифровой модели.

Сравнение результатов расчётов с результатами экспериментальных исследований подтверждает адекватность разработанных методов и моделей. Также достоверность результатов исследований подтверждена апробацией на международных и всероссийских конференциях и актами внедрения в производственные и учебный процессы.

4. Теоретическая и практическая значимость полученных результатов диссертационной работы

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в следующих положениях, предложенных автором.

1. Принципах определения информационного содержания, создания и применения проблемно-ориентированных действительных моделей деталей и сборочных единиц ГТД. Действительные модели деталей и узлов формируются на основе результатов их измерений с учётом информационной достаточности и необходимости, а также особенностей размерных связей в изделиях, определяемых содержанием технологической операции и/или этапом жизненного цикла изделия.

2. Эффективном методе и комплексе специальных моделей для оценки параметров сопряжений деталей и узлов, в частности для прогнозирования параметров взаимодействия контактирующих поверхностей деталей.

3. Методе снижения уровня вибраций роторов ГТД с помощью балансировки на цифровой модели.

Практическая значимость работы состоит в новой разработанной цифровой технологии, включающей программную реализацию предложенных методов и моделей, обеспечивающих повышение достоверности размерного анализа и геометрической точности технологических операций в производстве, снижение уровня вибраций роторов при эксплуатации ГТД. На ряду с внедрением цифровой технологии на предприятиях

ПАО «ОДК-Кузнецов», АО «Металлист-Самара» и ООО «Газпром трансгаз Самара», она может быть внедрена и на других предприятиях, производящих ГТД и энергетические установки, а также иную высокотехнологическую продукцию. К числу таких предприятий можно отнести ПАО «ОДК-УМПО», ПАО «ОДК-Сатурн», АО «ОДК-Пермские моторы», ПК «Салют» АО «ОДК», АО «ОДК-Газовые турбины», АО «ОДК-Климов», АО «ММШ имени В.В.Чернышева», филиал АО «ОДК» «ОМО им. П.И. Баранова», АО «ППШ «Аэросила», ПАО «Силовые машины».

5. Оценка содержания и оформления диссертации

Диссертация изложена на 361 странице, состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы на 252 наименование и 8 приложений. Представленная диссертация характеризуется логичностью изложения и завершённостью.

Диссертационная работа выполнена на хорошем научном уровне. Проведённые исследования решают важную научно-техническую задачу и вносят существенный вклад в теорию сборки ГТД. Представленные материалы написаны корректным, технически грамотным языком, сопровождаются наглядными графическими иллюстрациями. Для подтверждения результатов диссертации автором проведён необходимый объём расчётов и экспериментальных исследований.

В автореферате и публикациях автора достаточно полно отражено содержание диссертационной работы и выдвигаемые на защиту научные положения.

6. Замечания по диссертационной работе

1. В методике создания действительных геометрических моделей (раздел 2.2) термин «базирование» используется в пунктах 2, 4, 5. Для лучшего понимания материала необходимо разделить теоретическое базирование, физическую установку деталей и математическое базирование путем совмещения систем координат.

2. При совмещении номинальной поверхности и облака измеренных точек используется метод наименьших квадратов. Однако известно, что для оценки геометрических характеристик изделий предпочтительным является допуск минимальной зоны. Было бы целесообразно сравнить получаемые по этим двум методам результаты.

3. Определение зазора между поверхностями при их сопряжении в узле выполняется по нормали к одной из поверхностей (раздел 3.2). В тоже время действительные модели поверхностей определяются массивом точек, нормали к которым не определены. Нет ли здесь противоречия?

4. Целью Фурье-анализа является определение гармоник с наибольшей мощностью. Каким образом затем моделируется поверхность? Используя только часть гармоник, возможно не удастся точно воспроизвести поверхность.

5. При исследовании неопределённости измерения не указано, какого типа А или Б неопределённость и соответственно рассчитывается стандартная или расширенная неопределённость. В последнем случае по рекомендациям ГОСТ 34100.3-2017 необходимо указывать вероятность охвата или уровень доверия.

6. Результаты цифровой коррекции формообразования заготовок, изложенные в разделе 3.7, представляются значимыми. Целесообразно их расширить и выделить в отдельную главу.

7. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о порядке присуждения учёных степеней»

Диссертационная работа Болотова М.А. на тему «Разработка методов создания цифровых технологических моделей деталей и узлов ГТД для повышения технических показателей их производства», является завершённой научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научная проблема повышения точности и снижения трудоёмкости технологических процессов сборки роторов ГТД. Работа содержит новые научно-обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых носит значительный вклад в развитие страны.

В целом считаю, что диссертационная работа «Разработка методов создания цифровых технологических моделей деталей и узлов ГТД для повышения технических показателей их производства» отвечает требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК, а её автор, Болотов Михаил Александрович, заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Официальный оппонент:

профессор кафедры «Технология машиностроения»
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Саратовский государственный технический
университет имени Гагарина Ю.А.»,
доктор технических наук, профессор
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77
E-mail: tms@sstu.ru, тел. 8(452)998-77-77

Захаров Олег Владимирович

Подпись профессора Захарова О.В.
Проректор по науке и инновациям
СГТУ имени Гагарина Ю.А.



Остроумов И.Г.