

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора технических наук, доцента Болотова Михаила Александровича
на диссертационную работу Дворяка Павла Анатольевича
«Способ уменьшения погрешностей сборки роторов турбокомпрессоров серийных газотурбинных двигателей», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» (технические науки).

Актуальность работы

Актуальность представленной работы определяется решением значимой проблемы производства и ремонта авиационных газотурбинных двигателей, заключающейся в высоком проценте изделий, которые снимают со стендовых испытаний по причине их повышенной вибрации. Как следует из материалов диссертации, до 30% ремонтных и 17% новых двигателей не проходят приёмо-сдаточные испытания с первого раза. В свою очередь это приводит к значительным экономическим затратам, связанным с дополнительными разборками, устранением дефекта, повторной сборкой и проведением испытаний. Процедуры по переборке двигателей зачастую повторяются неоднократно, что приводит к росту трудоёмкости изготовления изделий до 40%. Данный показатель является критическим для мелкосерийного производства.

Основная идея предложенных Павлом Анатольевичем метода и теоретических положений работы заключается в возможности диагностирования наличия в роторе существенных погрешностей сборки по результатам измерения его динамических характеристик. Метод позволяет регистрировать состояния ротора, которые могут привести к повышенной вибрации изделия в ходе его стендовых испытаний. К числу диагностируемых погрешностей сборки ротора относятся недопрессовка / недостыковка стыков, недостаточно качественная затяжка резьбовых соединений. Информация о наличии существенных погрешностей сборки ротора позволяет до этапа стендовых испытаний выполнить мероприятия по исключению погрешностей, что существенно снижает производственные затраты. Определение динамических характеристик ротора производится с помощью разработанного прибора, позволяющего автоматизировать процесс измерений и обработки результатов.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 94 источников и 3 приложений. Общий объём диссертации составляет 115 страниц, содержит 50 рисунков и 27 таблиц.

Общая характеристика работы

В введении описываются цели и задачи исследования, актуальность и научная новизна работы.

Первая глава включает анализ существующих методов определения динамических характеристик роторов и изделий, а также содержит рассмотрение причин возникновения повышенных вибраций изделий. Рассматриваются следующие погрешности сборки роторов: погрешности сборки прессовых соединений; погрешности сборки и изготовления

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

«17» 11 2025 г.

резьбовых соединений; возникающая при сборке валов несоосность, приводящая к перекосу опор и как следствие к дополнительной монтажной неуравновешенности.

В главе 2 диссертационной работы проводится комплексное численное моделирование влияния производственных погрешностей сборки на динамические характеристики ротора турбокомпрессора. В основе исследования лежит разработанная подробная конечно-элементная модель ротора в программном комплексе ANSYS, которая учитывает реальные геометрические, масс-инерционные и жёсткостные параметры, а также особенности материалов деталей. Расчётной методикой предусмотрено последовательное изучение влияния каждого типа погрешностей в отдельности: сначала определяются эталонные динамические характеристики «идеального» ротора, а затем поэтапно вносятся погрешности прессовых посадок, усилий затяжки и неуравновешенности. Результаты моделирования наглядно демонстрируют существенное влияние сборочных погрешностей на частотный спектр ротора. В частности, установлено, что недопрессовка дисков может снижать первую собственную частоту до 10%, а расстыковка роторов компрессора и турбины – до 16% по сравнению с эталонным состоянием. Таким образом, в главе отмечаются количественные зависимости между величиной сборочных погрешностей и изменением ключевых динамических характеристик, что является основой для разработанной в последующих главах методики опытного измерения погрешностей сборки.

В третьей главе диссертационной работы представлена разработанная автором методика и созданный для её реализации измерительный комплекс, позволяющий экспериментально определять динамические характеристики роторов непосредственно в условиях технологического процесса сборки. В главе также приведены средства испытаний – ударным и электродинамическим методами. Представлен уникальный дисбалансный метод определения динамических характеристик, который обладает оптимальным сочетанием точности, мобильности и производительности для внедрения в серийное производство авиадвигателестроительных предприятий. Приведена разработанная технологическая схема сборки, интегрирующая контроль динамических характеристик, позволяющая целенаправленно выявлять и устранять производственные погрешности исключая переборки и пуски двигателей с повышенной вибрацией.

В четвертой главе приводится описание экспериментальных исследований сборочных и производственных погрешностей сборки роторов газотурбинных двигателей. Экспериментальная работа начинается с анализа резьбовых соединений, где установлен значительный разброс усилий затяжки в болтовых соединениях до 25%, приводящий к нецентральному приложению нагрузки и возникновению несоосности цапф ротора. Выполнен сравнительный анализ способов определения динамических характеристик роторов, проведенный на примере ротора свободной турбины. Показано, что традиционный ударный метод позволяет определять множество побочных частот ротора, электродинамический способ вносит погрешность за счёт присоединенной массы, тогда как разработанный дисбалансный способ позволяет с высокой достоверностью определять не только амплитудные, но и фазовые резонансы, а также строить формы изгибных колебаний ротора. Дисбалансный способ позволяет получить данные, близкие к данным, полученным с разгонных испытаний ротора свободной турбины, что подтверждает высокую точность разработанного способа. Дальнейшие эксперименты на роторе турбокомпрессора двигателя АИ-25 продемонстрировали эффект анизотропии жесткости, вызванной неравномерностью

затяжки шпилек, и позволили экспериментально подтвердить влияние углового положения датчиков на регистрируемые параметры с помощью дисбалансного способа. Заключительная серия испытаний в условиях производственного сборочного цеха доказала доминирующее влияние погрешностей прессовых соединений на динамические характеристики по сравнению с погрешностями затяжки резьбовых соединений.

Пятая глава содержит опытно-промышленную проверку разработанного метода в условиях серийного производства двигателей АИ-222-25. На основе статистического анализа значительного объема производственных данных установлено, что 29,6% ремонтных двигателей не проходят приёмо-сдаточные испытания с первого раза из-за повышенной вибрации. Результаты апробации методики контроля динамических характеристик на серийном роторе показали высокую точность измерений, расхождение с расчётными значениями характеристик не превысило 2%. Проведена апробация разработанной схемы сборки двигателя с проведением контроля динамических характеристик как после сборки ротора ВД, так и после сборки двигателя. Представлен акт о внедрении в технологический процесс сборки авиационного двигателя.

Анализ материалов диссертации Дворяка П.А. позволяет сделать вывод, что в ней содержится ряд научно-методических разработок, имеющих несомненную **научную новизну**, среди которых следует отметить:

1. Впервые разработана комплексная методика численного моделирования, устанавливающая количественные связи между производственными погрешностями сборки роторной системы (учитывающая прессовые и резьбовые соединения) и её динамическими характеристиками. Методика позволяет проводить анализ влияния каждого типа погрешностей на изменение собственных частот, форм колебаний, демпфирования.

2. Предложен новый экспериментальный метод определения динамических характеристик ротора в процессе его сборки, основанный на использовании центробежного гармонического возбуждения от кинематического дисбаланса. Ключевым отличием метода является возможность возбуждения и регистрации резонансных режимов в рабочем диапазоне частот вращения без проведения дорогостоящих разгонных испытаний.

3. Разработана методика идентификации и снижения производственных погрешностей сборки, которая позволяет не только выявлять факт наличия отклонения динамических характеристик и погрешности сборки, но и диагностировать конкретный тип погрешности (например, недопрессовка дисков, расстыковка по проточной части) и определять оптимальные технологические воздействия для его устранения.

В то же время в работе могут быть **отмечены недостатки**:

1. В работе целесообразно было бы сформировать классификационный алгоритм и критерии, используя которые можно дифференцировать производственные погрешности по динамическим характеристикам ротора, связанные с затяжкой резьбовых соединений, недопрессовкой / недостыковкой соединений, искажением геометрической оси ротора. Дифференциация производственных отклонений ротора позволит обратить внимание слесарей-сборщиков на конкретные «проблемные» переходы и операции сборки и балансировки ротора, что имело бы практическую значимость.

2. Измерялись ли в рассматриваемом роторе двигателя АИ-225 радиальные и торцевые биения присоединительных поверхностей? Насколько детально учитываются биения роторов КВД, ТВД и ВД в процессе диагностирования их состояния ротора и

балансировки? В работе отсутствует обоснование причины, из-за которой не рассматривается влияние биений основных присоединительных поверхностей деталей ротора на уровень вибрации изделия.

3. Из текстов автореферата и диссертации не ясно, учитывались ли в ходе расчётов эксцентриситеты роторов КВД, ТВД и ВД? Эксцентриситеты деталей и узлов ротора оказывают существенное влияние на уровень вибрации изделий.

4. При описании технологической схемы сборки ротора, обеспечивающей определение и уменьшение погрешностей динамических характеристик ротора, целесообразно было бы указать диагностируемые погрешности сборки и способы их устранения (стр. 53 диссертации).

5. Выполнялись ли расчёты или экспериментальные измерения, предназначенные для оценки величин изгиба фланца вала и возникновения несоосности цапф ротора от несимметричности распределения усилий затяжки болтовых соединения на роторе (стр. 61 диссертации)? Данная информация может быть полезной для дифференциации причин, приводящих к дисбалансам ротора и впоследствии для снижения вибрации изделия.

6. Несмотря на наличие точных формулировок основных теоретических и практических положений диссертационной работы, не лишним будет добавить краткую формулировку механизма, приводящего к снижению уровня вибрации ротора в предлагаемом методе сборки гибкого ротора.

7. В разных местах текста диссертации приведены сведения, позволяющие сделать вывод о повторяемости и воспроизводимости оценок. Формулировка вывода о повторяемости и воспроизводимости оценок, полученных с использованием разработанного метода, является теоретически значимым.

Отмеченные недостатки не снижают научную и практическую ценность диссертационной работы.

Заключение по диссертационной работе

В целом, диссертация Дворяка П. А. выполнена на высоком научно-техническом уровне и является завершённой исследовательской работой. Её автор проявил себя научным работником, способным самостоятельно ставить и решать теоретические и практические задачи в области технологии производства двигателей летательных аппаратов. К сильным сторонам работы следует отнести конкретную практическую значимость, которая основывается на теоретической численной методике определения погрешностей сборки, подтвержденной как экспериментально, так и в опытной эксплуатации в условиях производства. Разработанная на основе результатов исследований методика определения погрешностей сборки оптимизирует сборку и испытания в производстве авиационных двигателей, что подтверждается актом внедрения.

По теме диссертации опубликовано 9 работ, из них в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК и приравненных к ним опубликовано 3 работы, в том числе получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в производстве авиакосмической и машиностроительной технике, а также в других отраслях промышленности.

По научному уровню полученных результатов, содержанию и оформлению, диссертация Дворяка Павла Анатольевича соответствует требованиям п. п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденном Постановлением правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а её автор заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Официальный оппонент д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры технологий производства двигателей федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»


20.11.25.

Болотов М.А.

Шифр научной специальности 2.5.15 - Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов

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

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

Болотов М.А.

E-mail: bolotov@ssau.ru



с отзывом ознакомлен 
27.11.2025