

ОТЗЫВ

официального оппонента

Макарова Павла Вячеславовича на диссертационную работу Дворяка Павла Анатольевича по теме «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 диссертационной работы заключается в предложении способа сборки ротора авиационного ГТД, который состоит в обеспечении полной взаимозаменяемости деталей и позволяет определять погрешности сборки. Также разработанный способ позволяет обеспечивать индивидуальное определение величины остаточного дисбаланса для каждого конкретного ротора, что позволит уменьшить вибрации двигателей в процессе их работы.

В данном контексте разработка оперативных методов контроля погрешностей сборки позволяет предупреждать погрешности изготовления и сборки роторов авиационных двигателей за счет учета их динамических характеристик. Широкое применение результатов исследования найдет в ремонте двигателей, где автор демонстрирует корреляцию между вибрациями двигателя и его динамическими характеристиками. В связи с этим работа автора, посвященная уменьшению погрешности сборки роторов турбокомпрессоров серийных ГТД, является весьма актуальной.

Степень обоснованности научных положений, выводов рекомендаций

Представленные в диссертационной работе научные положения, выводы и рекомендации обладают достаточной степенью обоснованности, что подтверждается комплексным использованием расчетных методик актуальных программных комплексов и экспериментальных средств измерений, регламентированных действующими стандартами.

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

«4» 12 2025г.

Достоверность полученных результатов

Проведенные автором экспериментальные исследования выполнены на современном аттестованном оборудовании с использованием апробированных методик проведения испытаний. Результаты расчетных работ получены с использованием широко применяемого коммерческого программного обеспечения и не противоречат опубликованным работам других авторов с учетом принятых граничных условий и допущений.

Научная новизна полученных результатов

Научная новизна работы заключается в:

1. Создании методики численного моделирования, которая позволяет устанавливать количественные связи между погрешностями сборки и динамическими характеристиками ротора.
2. Предложении принципиально нового экспериментального способа определения динамических характеристик ротора турбокомпрессора авиационного ГТД при его сборке с использованием центробежного возбуждения от дисбаланса равному остаточному.
3. Разработке методики диагностики производственных погрешностей, позволяющая выявлять конкретные дефекты и определять способы их устранения.

Структура и содержание диссертации

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

В введении показана актуальность работы, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Приводятся положения, выносимые на защиту, апробация результатов исследований и публикации по теме работы.

В главе 1 анализируется влияние производственных погрешностей сборки на вибрации двигателей. Рассматриваются конструктивные особенности роторов, методы и средства контроля динамических характеристик, их преимущества и недостатки, а также основные источники погрешностей изготовления деталей,

влияющих на качество сборки роторов. Обосновывается необходимость разработки новых подходов к сборке, так как использование большинства рассмотренных способов не применимо в условиях серийного производства. При этом, автором не в достаточной мере в первой главе описана степень проработанности темы диссертации в литературе, и скорее она больше посвящена сборке двигателя в целом. В заключении главы, по результатам сделанных выводов, констатирована актуальность темы исследования, выбран объект исследования, сформулирована цель и поставлены задачи исследования.

В главе 2 представлена методика численного моделирования, выносимая на защиту. Она заключается в поэтапном проведении расчетов и определении границы между значениями динамических характеристик ротора в условиях проведения операций сборки и балансировки. Данная методика не применима для расчета динамических характеристик в рабочих условиях эксплуатации системы «ротор-корпус-опоры» в составе двигателя в виду отличия граничных условий и принятых допущений. Автором рассмотрена расчетная модель «жесткого» ротора высокого давления двигателя АИ-222-25, позволившая ему количественно оценить влияние различных погрешностей сборки на динамические характеристики ротора. На данном примере проанализированы и выбраны виды контактных взаимодействий между дисками ротора барабанно-дискового типа при численном моделировании в коммерческом комплексе конечно-элементного анализа. По результатам расчетов установлено, что недопрессовка и нестыковка элементов конструкции ротора КВД могут снижать собственные частоты до 10%, а в сборе с ротором ТВД – до 52%. Также проведен расчет погрешностей затяжки шпилек ротора КВД и выполнена оценка влияния данной погрешности на собственные частоты ротора высокого давления.

В главе 3 предложена методика измерения динамических характеристик с помощью дисбалансного вибровозбудителя. Представлен автоматизированный комплекс, позволяющий определять резонансы амплитудные и фазовые, формы колебаний, динамические коэффициенты влияния, декременты затухания непосредственно в процессе сборки ротора. Описан состав, программное обеспечение и принцип его работы. Разработана технологическая схема сборки

ротора с учетом определения его динамических характеристик. Приведено описание методик возбуждения ротора ударным методом, электродинамическим способом и с использованием разгонных испытаний ротора на рабочих оборотах вращения в вакуумной камере МАИ.

В главе 4 приведено экспериментальное подтверждение влияния погрешностей сборки на динамические характеристики роторов. Установлено, что неравномерная затяжка болтов вызывает анизотропию жесткости, а погрешности прессовых соединений оказывают доминирующее влияние на частотный спектр. Также проведено сравнение способов возбуждения на одном и том же модельном объекте (ротор турбокомпрессора двигателя АИ-25), который позволяет сделать вывод о точности определения динамических характеристик различными методами. Особенно стоит выделить дисбалансный способ, позволяющий определять фазовый резонанс с наибольшей точностью среди представленных методов.

В главе 5 проведена опытно-промышленная апробация методики. Проведены испытания на реальных объектах - серийных и ремонтных двигателях АИ-222-25. Эксперименты включали статистический анализ вибраций, исследование дисбалансов роторов и измерение динамических характеристик непосредственно в сборочном цехе. Проведены испытания на одном экземпляре ротора и двигателе в сборе. Было произведено сравнение расчетных величин динамических характеристик и измеренных на роторе, что позволило сделать заключение о степени годности ротора.

В заключении приводятся основные выводы по результатам работы.

Анализ материалов диссертации Дворяка П.А. позволяет сделать вывод, что в ней содержится ряд научно-методических разработок, в то же время в работе могут быть **отмечены следующие недостатки:**

1. Не проведена оценка погрешности численного моделирования контактных соединений с учетом изменения типа контактной пары.

2. По исследуемым погрешностям сборки роторов не представлено численных метрик. Неясно, какие погрешности заложены в расчетные параметры: «нестыковка ...», «недопрессовка ...» и т.д.?

3. Не даны объяснения различия АФЧХ, полученных разными экспериментальными методами возбуждения ротора.

4. Не дано никакой оценки отклонениям от круглости посадочных поверхностей и торцевым биениям поверхностей по фланцам.

5. Не представлен учет поправок на массу возбудителя, включая его не осесимметричное размещение.

6. Не выведены закономерности для количественного определения допустимого уровня производственных погрешностей сборки гибких роторов турбокомпрессоров авиационных ГТД.

7. Рассматривается проверка эффективности разработанных рекомендаций по снижению погрешностей сборки только для одного экземпляра ротора, что недостаточно для полноценной проверки их эффективности.

8. Не проведена оценка на сколько в среднем сократятся трудозатраты при увеличении времени на сборку, уменьшении количества неудачных пусков роторов при их балансировке и уменьшения количества переборок.

9. По тексту диссертации очень много орфографических ошибок, не выполнено редактирование и нормоконтроль, что портит впечатление о самой работе.

Однако отмеченные замечания не снижают общую положительную оценку работы, ее научной и практической ценности. Большинство замечаний связано с недостаточным внедрением разработанного способа в серийное производство и как следствие нехваткой статистики для полноценной оценки разрабатываемых рекомендаций. Это обстоятельство не является виной автора, а больше связано с трудностями внедрения новых технологических процессов в отлаженный механизм серийного производства авиационных двигателей.

Заключение по диссертационной работе

В целом, диссертация Дворяка Павла Анатольевича является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне. На основе большого количества самостоятельных численных и экспериментальных исследований разработана методика определения погрешностей сборки роторов турбокомпрессоров газотурбинных двигателей в условиях серийного производства,

что позволяет снизить величины вибраций двигателей как на уровне испытаний, так и в эксплуатации. Тема и содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.5.15. – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Аннотация диссертации и опубликованные по теме работы публикации в полной мере отражают содержание диссертации и полученные автором результаты.

Диссертационная работа соответствует всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор, Дворяк Павел Анатольевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Начальник отделения «Динамика и
прочность авиационных двигателей»

ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова»,

к.т.н. (01.02.06, 05.07.05)



28.11.2025.

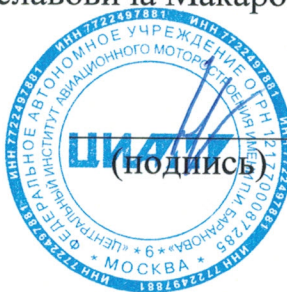
П. В. Макаров

Почтовый адрес: 111116, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, 2,

тел. +7 (985) 295-84-85, e-mail: pvmakarov@ciam.ru

Подпись и должность Павла Вячеславовича Макарова заверяю:

Заместитель генерального директора
(должность)



Ножницкий Ю.А.
(Фамилия И.О.)

С отзывом ознакомлен  04.12.2025