

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки
и технологий»

д-р физ.-мат. наук, доцент

И.Ф. Шарафуллин

11 2025 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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

Актуальность темы диссертации

В диссертации Дворяка Павла Анатольевича рассматриваются уменьшения погрешностей сборки роторов турбокомпрессоров серийных газотурбинных двигателей. Актуальность данного исследования обусловлена наличием погрешностей сборки, которые не учитываются при производстве авиационных газотурбинных двигателей. С одной стороны, процессы проектирования и доводки двигателей достигли высокой точности, позволяя с помощью современных САЕ-систем рассчитывать динамические характеристики роторов, обеспечивающие допустимые уровни вибраций. С другой стороны, при сборке возникают погрешности, влияющие напрямую на вибрационную активность двигателя при испытаниях, которые не контролируются в настоящий момент на производствах.

Основная проблема состоит в том, что существующие методы контроля сборочных операций (контроль биений, моментов затяжки) не позволяют оценить всех характеристик. Вследствие неравномерности усилий затяжки по фланцам, разброса натягов в посадках и деформаций фланцев возникает неучтенная

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

«25» 11 2025 г.

анизотропия жесткости и отклонение частот собственных колебаний от паспортных значений, что приводит съемам двигателей с испытаний.

В результате возникает высокий процент съема продукции со стендовых испытаний по причине повышенной вибрации, достигающий 30% для ремонтных двигателей. Каждый такой случай влечет за собой увеличение трудоемкости изготовления на 40%. Таким образом, актуальность работы заключается в разрешении указанного противоречия путем разработки и внедрения в технологический процесс метода оперативного контроля динамических характеристик на этапе сборки ротора, что позволит перейти от лишних сборочных операций к их предупреждению в процессе производства.

Эти обстоятельства делают работу Дворяка Павла Анатольевича, направленную на снижение трудоемкости производства ГТД, весьма актуальной.

Структура и содержание диссертации

Диссертация содержит 115 страниц машинописного текста, в том числе 50 рисунков, 27 таблиц и список литературы из 94 наименований.

Диссертация выполнена в соответствии с требованиями ВАК РФ и включает введение, пять глав, заключение и три приложения.

Введение представляет актуальность исследования, цели и задачи работы, раскрывает научную и практическую значимость исследования, а также основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу влияния погрешностей сборки на производственные вибрации газотурбинных двигателей. Также рассматривается влияние погрешностей сборки на динамику системы «ротор-опоры-корпус-подвеска» и описаны конкретные динамические характеристики связывающие вибрации авиационного двигателя. Представлены современные методы и средства определения динамических характеристик роторов газотурбинных двигателей. Освящены различные погрешности изготовления деталей сборочных единиц, влияющие на динамические характеристики и, как следствие, на вибрации в процессе их работы.

Во второй главе диссертационного исследования разработана методика математического моделирования погрешностей сборки роторов для оценки влияния на динамические характеристики. Моделирование проводилось в Ansys 2023R1 Workbench с граничными условиями, определенными на основе опытного измерения динамических характеристик. Были получены результаты для абсолютно жесткого ротора, для модели с учетом пресовых посадок и для модели с учетом влияния дисбаланса на динамические характеристики, которые позволили определить динамические характеристики роторов с учетом погрешностей сборки. Также разработанная методика моделирования погрешностей сборки позволяет прогнозировать величину и место возникновения производственной погрешности.

В третьей главе Представлена методика и средства измерения динамических характеристик, применяемых в исследовании.

Рассмотрено устройство дисбалансного вибровозбуждающего комплекса разработанного в процессе проведения исследования. Принцип его работы заключается в установке на невращающийся ротор шпиндель с максимальной скоростью вращения, соответствующей максимальным оборотам ротора. Предлагаемый метод реализует гармоническое возбуждение с частотой вращения ротора, что позволяет наиболее точно определять динамические характеристики исключая пробный пуск двигателя.

Предложена методика измерения и расчета погрешностей сборки, состоящая в порядке последовательных действий с применением дисбалансного возбуждения. Она позволяет получать амплитудно-фазо-частотные характеристики (АФЧХ), идентифицировать фазовые и амплитудные резонансы, строить формы изгибных колебаний и рассчитывать динамический коэффициент влияния (ДКВ).

Разработанное программное обеспечение автоматизирует процесс измерений, обработки данных и идентификации резонансных частот. В главе также представлена усовершенствованная технологическая схема сборки ротора, интегрирующая операцию контроля ДХ для своевременного выявления и устранения погрешностей. Для сравнения эффективности рассматриваются и альтернативные методы определения ДХ — ударный, электродинамический и

испытания на рабочих оборотах в вакуумной камере. Предварительное сравнение показывает, что дисбалансный метод, в отличие от других, обладает высокой мобильностью, достаточной точностью, а также позволяет определять фазовый резонанс и форму колебаний, что делает его наиболее применимым для внедрения в серийное производство. Таким образом, в главе представлен комплексный подход к созданию и валидации высокоэффективной методики диагностики погрешностей сборки на основе контроля динамических характеристик.

Четвертая глава посвящена комплексному экспериментальному исследованию, направленное на количественную оценку производственных погрешностей сборки роторов газотурбинных двигателей в отдельности для каждой и их непосредственного влияния на динамические характеристики. Экспериментальная часть включает в себя анализ погрешностей усилий затяжки в резьбовых соединениях, от которых зависит соосность деталей ротора и обеспечения угловой жесткости конструкции. Проведенные испытания на комплекте стяжных болтов турбины выявили значительный разброс в реализуемых усилиях затяжки — до 25% между минимальным и максимальным значением, что обусловлено вариациями коэффициента трения в следствии погрешностей изготовления самих болтов. Неравномерное распределение усилий приводит к нецентральному приложению осевой силы, вызывающей изгиб фланца и, как следствие, несоосность цапф ротора, что вызывает анизотропию жесткости и приводит к повышенному начальному дисбалансу ротора, который вызывает дополнительные вибрации.

Далее представлен сравнительный анализ методов вибровозбуждения для определения динамических характеристик, проведенный на примере ротора свободной турбины. Были последовательно применены и сопоставлены ударный метод, электродинамическое возбуждение с присоединенным вибровозбудителем, дисбалансный метод и натурные испытания на рабочих оборотах в вакуумной камере. Сравнение результатов показало, что ударный метод, несмотря на простоту, дает множество побочных частот и не позволяет определять частоту фазового резонанса, что затрудняет выделение истинной изгибной формы даже при

наличии расчетных значений. Электродинамический метод обеспечивает более четкую идентификацию амплитудного резонанса, но вносит погрешность за счет присоединенной массы и не позволяет определить форму колебаний. Наиболее точное определение резонансных частот, соответствующее реальным условиям эксплуатации, обеспечили разгонные испытания. Однако именно дисбалансный метод возбуждения, при котором ротор возбуждается центробежной силой от известной неуравновешенной массы, показал себя как оптимальный компромисс. Он позволил с высокой достоверностью определить фазовые резонансы, а также построить пространственную форму изгиба ротора, что крайне важно для последующей балансировки. При этом применение дисбалансного способа делает необязательным дорогостоящие и трудоемкие разгонные испытания.

Далее экспериментальные исследования были перенесены на ротор турбокомпрессора двигателя АИ-25 с использованием разработанного дисбалансного комплекса. Измерения, проведенные под различными углами относительно положения стяжных болтов, наглядно продемонстрировали эффект анизотропии жесткости, вызванной неравномерностью затяжки. Было зафиксировано смещение частоты амплитудного резонанса и плоскости максимальной жесткости в сторону болта с наибольшим усилием затяжки. Финальная серия экспериментов была проведена непосредственно в условиях сборочного цеха на серийных роторах высокого давления. Эти испытания однозначно доказали доминирующее влияние погрешностей прессовых соединений (недопрессовка дисков, нестыковка по проточной части) на динамические характеристики по сравнению с погрешностями затяжки резьбовых соединений. Было установлено, что ослабление затяжки шпилек приводит к снижению частоты собственных колебаний на 7%, в то время как погрешности прессовых соединений могут вызывать изменение частот до 10% и более. Таким образом, глава 4 не только предоставляет широкий экспериментальный материал, но и служит практическим подтверждением адекватности разработанной методики, доказывая ее способность выявлять, локализовывать и количественно

оценивать основные производственные погрешности сборки роторов в условиях реального производства.

Пятая глава В главе 5 диссертационной работы проводится опытно-промышленная проверка разработанного способа сборки, целью которой является подтверждение его эффективности и работоспособности в условиях реального серийного производства на примере двигателей АИ-222-25. Проверка носит комплексный характер и включает масштабный сбор и статистический анализ данных по трем ключевым направлениям: результатам приемо-сдаточных испытаний двигателей по уровню вибраций, параметрам балансировки роторов турбокомпрессоров и экспериментально определенным динамическим характеристикам роторов после сборки и в составе двигателя. Статистический анализ вибрационного состояния партий новых и ремонтных двигателей выявил существенную проблему: доля двигателей, не проходящих приемо-сдаточные испытания с первого раза, достигает 29,6%, что влечет за собой значительный рост трудоемкости из-за дополнительных разборок, поиска дефектов и повторных испытаний. Анализ дисбалансов показал, что двигатели, успешно прошедшие испытания, имеют остаточный статический дисбаланс ротора высокого давления не более 80 г*мм, в то время как у бракуемых двигателей этот показатель значительно выше. Корреляционный анализ продемонстрировал принципиально разную природу доминирующих погрешностей для новых и ремонтных двигателей. Для новых двигателей выявлена сильная корреляция (0,82) между вибрацией и неуравновешенностью ротора, что указывает на дисбаланс как на основной источник проблем. Для ремонтных же двигателей наибольшее влияние на вибрацию оказывает частота собственных колебаний (корреляция -0,92), которая у них в среднем выше (310 Гц против 306 Гц у новых), но при этом их рабочие обороты также повышены и приближаются к резонансным, провоцируя рост вибраций.

Экспериментальное определение динамических характеристик серийного ротора высокого давления с использованием разработанного комплекса подтвердило высокую точность методики: расхождение между расчетными и

измеренными значениями собственных частот составило около 2%. Совпадение полученных частот с эталонными значениями для ротора без погрешностей свидетельствовало о высоком качестве сборки данного конкретного экземпляра. На основе установленных в главе 2 зависимостей была разработана и апробирована на другом роторе практическая методика диагностики и устранения погрешностей. Так, наличие резонансной частоты в районе 322 Гц указывало на расстыковку ротора компрессора высокого давления по ободу, а частота 220 Гц — на погрешность в соединении роторов компрессора и турбины высокого давления. Для каждого случая были предложены конкретные технологические рекомендации, включающие переборку с контролируемым обжатием пакета дисков для ротора компрессора и оптимальный разворот ротора турбины относительно вала, рассчитанный по форме колебаний, для ротора турбокомпрессора в сборе. Дополнительные испытания двигателя в сборе на тележке позволили оценить влияние упруго-демпферных опор и подвески на динамические характеристики системы, смещающие резонансные частоты, и оценить погрешности сборки самого двигателя. Ключевым результатом промышленной проверки стало подтверждение значительного снижения вибраций: двигатель, собранный с применением разработанного метода, показал максимальный уровень вибрации 10,5 мм/с, что в два раза ниже среднего производственного значения, что подтверждено актом внедрения от предприятия-изготовителя. Таким образом, глава 5 доказывает, что внедрение методики контроля динамических характеристик в технологический процесс позволяет не только диагностировать и устранять погрешности сборки, но и существенно повысить выход годной продукции.

В заключении сформулированы основные выводы по работе.

Аннотация диссертации достаточно полно отражает структуру, содержание и результаты диссертационной работы.

Полученные в диссертационной работе Дворяка П.А. результаты имеют важное научное и практическое значение и могут быть рекомендованы к использованию на предприятиях авиакосмической отрасли.

Теоретическая значимость

Цель работы заключается в определении погрешностей сборки роторов в серийном производстве, а также предложение способов их уменьшения для исключения возникновения повышенных вибраций при испытаниях.

Поставленная цель была достигнута путем успешного решения следующих **задач**:

1. Определение влияния погрешностей сборки роторов на их динамические характеристики расчетными и экспериментальными методами;
2. Разработку методики определения динамических характеристик и подтверждение её работоспособности экспериментально, а также подбор способа, который позволит определять динамические характеристики в условиях серийного производства роторов;
3. Разработку метода сборки гибкого ротора авиационного ГТД, который позволит определять динамические характеристики в процессе сборки, и позволяющий снизить вибрации двигателя;
4. Проверка эффективности разработанного метода в условиях серийного производства.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. В разработке методики численного моделирования, позволяющей определять влияние производственных погрешностей сборки ротора на его динамические характеристики;
2. В разработке экспериментального метода определения динамических характеристик ротора способом центробежного гармонического возбуждения от допустимых остаточных дисбалансов ротора в диапазоне рабочих частот вращения непосредственно в технологическом процессе сборки;
3. В разработке методики выявления и уменьшения производственных погрешностей сборки ротора.

Практическая значимость работы заключается в снижении трудоемкости сборки и производства газотурбинных двигателей, за счет снижения производственных вибраций двигателя на этапе испытаний, при помощи оценки

погрешностей сборки ротора через определение его динамических характеристик. Немаловажно, что разработанные автором рекомендации прошли успешную апробацию в процессе производства серийного авиационного двигателя предприятия АО «ОДК» «ОДК-САЛЮТ».

Апробация работы

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 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Достоверность обоснованность результатов, полученных автором, обеспечивается:

1. Применением коммерческого лицензированного программного комплекса ANSYS 2023R1 содержащего расчетные методики математического моделирования, которые применялись для оценки влияния погрешностей сборки ротора на динамические характеристики;

2. Использованием теоретически обоснованных методик исследования и стандартизованных методов проведения испытаний

3. Производственной проверкой полученных результатов и разработанных методик.

Детальное рассмотрение диссертационной работы позволяет выявить следующие **основные достоинства**:

1. Доказана зависимость динамических характеристик от погрешностей сборки, возникающих в процессе изготовления и ремонта роторов турбокомпрессоров, как расчетным, так и экспериментальным путем, что позволяет предупреждать повышенные вибрации, возникающие в процессе испытаний двигателей;

2. Автор подчеркивает, что ключевое влияние на динамические характеристики в роторах барабанно-дискового типа оказывают прессовые посадки, которые оцениваются через динамические характеристики. По изменению динамических характеристик возможно локализовать сборочный дефект и устранить его;

3. Автор разработал и внедрил комплекс позволяющий в автоматическом режиме производить определение погрешностей сборки роторов в условиях серийного производства. Определение погрешностей сборки производится путем проведения вибровозбуждения ротора турбокомпрессора дисбалансным способом позволяющим оценивать фазовые и амплитудные резонансы и рассчитывать динамические характеристики.

Наряду с несомненными достоинствами в работе выявлены определенные **замечания:**

1. Отсутствие учета демпфирования в расчетной модели, что позволило бы повысить точность полученных расчетных частот. Включение в модель нелинейных характеристик демпфирования (например, с учетом материалов упруго-демпферных опор) позволило бы еще точнее согласовать амплитуды колебаний, полученные в расчете, с экспериментальными данными;

2. Для полноты технико-экономического обоснования предпочтительного выбора именно дисбалансного метода для внедрения в серийное производство отсутствует анализ сравнительной оценки трудоемкости (время на подготовку, проведение измерений и обработку результатов) каждого из рассмотренных методов. Данный анализ продемонстрировал бы, что дисбалансный метод является не только точным, но и наиболее производительным;

3. Разработка рекомендаций по сборке для конкретного типа ротора. Недостаточно проведенных испытаний на других типах роторов, а также отсутствует расчетная часть для других роторов. Демонстрация на других конструкциях могла бы расширить разработанной методики определения погрешностей сборки;

4. В работе указано, что внедрение методики позволяет сократить трудозатраты за счет уменьшения переборок, но для полного обоснования экономической целесообразности широкого внедрения метода в серийное производство следовало бы привести количественную оценку этого эффекта. Расчет снижения трудоемкости в нормо-часах или экономии средств в денежном выражении на единицу продукции.

Отмеченные недостатки не снижают научную и практическую ценность диссертационной работы.

Соответствие диссертации научной специальности

Содержание диссертации соответствует требованиям паспорта научной специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов (технические науки). Область исследований соответствует следующим пунктам паспорта специальности:

10. Методы испытания двигателей, их элементов и агрегатов, системы автоматизированного сбора, обработки и анализа экспериментальных данных, включая комплексную автоматизацию стендовых испытаний;

18. Процессы создания и доводки двигателей летательных аппаратов. Способы улучшения характеристик и основных данных двигателей, находящихся в серийном производстве и эксплуатации.

19. Методы и средства диагностики технического состояния двигателей и энергетических установок летательных аппаратов. Эксплуатационная технологичность.

Отрасль науки – технические науки, поскольку приведенные результаты исследований дают существенный технический эффект при использовании и внедрении.

Общее заключение

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что диссертация Дворяка П.А. на тему «Способ уменьшения погрешностей сборки роторов турбокомпрессоров серийных газотурбинных двигателей» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены новые научно-обоснованные результаты методики определения погрешностей сборки, имеющие важное значение при разработке и производстве перспективных авиационных двигателей и энергетических установок.

Таким образом, считаем, что диссертация Дворяка Павла Анатольевича соответствует требованиям п.9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013

г. №842 (с изменениями, внесенными Постановлением Правительства РФ от 16.10.2024г. №15), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Дворяк Павел Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов (технические науки).

Отзыв на диссертацию П.А. Дворяка обсужден и утвержден на заседании кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (протокол №8 от 20.11.2025г.). Присутствовало: 32 человека, из них д.т.н. – 2 чел., к.т.н. – 11 чел. Итоги голосования: «За» – 32 чел., «Против» – 0 чел., «Воздержался» – 0 чел.

Дворяку П.А. рекомендовано продолжить работу в выбранном научном направлении.

Заведующий кафедрой
«Технология машиностроения» УУНиТ,
докт. техн. наук, доцент,
чл. корр. АН РБ,
Докторская диссертация защищена по
специальности 05.16.01. Металловедение и
термическая обработка металлов и сплавов


Рамазанов Камиль Нуруллаевич

20.11.2025г.

450076, Приволжский федеральный округ, Республика Башкортостан,
г. Уфа, ул. Заки Валиди, дом 32
ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»
Электронный адрес <https://uust.ru/>
Телефон: +7 (347) 229-96-16



Рамазанова К.Н.
«20» 11 2025.
Заместитель начальника общего отдела УУНиТ Т.Шам
Митинская Т.Р.

С отзывом ознакомлен 25.11.2025 