

На правах рукописи

Посадов Владимир Владимирович

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ВИБРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ
АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ И АЭРОУПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ
КОМПРЕССОРА ГТД ПРИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Специальность 05.07.05. – Тепловые,
электроракетные двигатели и энергоустановки
летательных аппаратов (технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рыбинск – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор, Ремизов Александр Евгеньевич.

Официальные оппоненты:

Белоусов Анатолий Иванович, доктор технических наук, профессор, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, кафедра конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов института двигателей и энергетических установок;

Яманин Александр Иванович, доктор технических наук, профессор, Ярославский государственный технический университет, профессор кафедры двигателей внутреннего сгорания автомеханического факультета.

Ведущая организация: Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет).

Защита состоится 29.06.2017 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.210.01 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева» по адресу: 152934, г. Рыбинск, Ярославская область, ул. Пушкина, 53, ауд. Г – 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», www.rsatu.ru.

Автореферат разослан 28.04.2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Надеждин Игорь Валентинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы обусловлена необходимостью своевременной и надежной диагностики опасных по своим последствиям аэродинамических (вращающийся срыв) и аэроупругих (флаттер) колебаний, сопровождающихся вибрацией корпуса и высокими вибрационными напряжениями в деталях компрессора газотурбинного двигателя (ГТД). Вращающийся срыв относится к вынужденным, а флаттер – к самовозбуждающимся колебаниям. Оба вида колебаний возникают на частотах, некратных частоте вращения ротора. Сложность задач, возникающих при диагностике флаттера и вращающегося срыва, обусловлена сложностью протекающих процессов, необходимостью учета множества факторов при взаимодействии упругих и аэродинамических сил.

При возникновении аэродинамических и аэроупругих колебаний детали ГТД подвергаются риску повреждения. По требованиям нормативно-технической документации двигатели подлежат проверке на отсутствие флаттера и вращающегося срыва. Такая проверка является длительной и затратной, поэтому при создании современных конкурентоспособных ГТД весь комплекс исследований необходимо проводить на минимальном количестве опытных образцов.

В настоящее время получил распространение метод диагностики флаттера и вращающегося срыва, при использовании которого уровень колебаний на диагностической частоте в спектре динамического сигнала сопоставим с уровнем шумов, а результат диагностики зависит от опыта и интуиции исследователя. Поэтому данный метод хотя и позволяет диагностировать оба эти опасных явления, но не в реальном времени и только на стационарных режимах.

Резервом повышения эффективности диагностики является внесение в метод вибрационной диагностики элементов прогнозирования. Прогнозирование и диагностика ранее рассматривались независимо друг от друга. Для сокращения затрат на проведение испытаний по проверке отсутствия флаттера и вращающегося срыва необходим эффективный метод диагностики, позволяющий своевременно обнаружить опасные колебания рабочего колеса компрессора ГТД.

Целью исследования является разработка метода вибрационной диагностики аэродинамических и аэроупругих колебаний, сокращающего затраты и сроки доводки ГТД за счет проведения испытаний на минимальном количестве опытных ГТД (с сохранением материальной части).

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) провести анализ аналитических и экспериментальных методов диагностики и прогнозирования аэродинамических и аэроупругих колебаний; исследовать факторы, влияющие на повышение устойчивости к флаттеру и снижение вибрационных напряжений рабочего колеса ГТД;

- 2) выполнить экспериментальные исследования возникновения флаттера и вращающегося срыва в компрессоре ГТД при различных условиях проведения

испытаний – при изменении скорости бокового ветра и при установке демпферов в замках лопаток;

3) разработать критерий прогнозирования аэродинамических и аэроупругих колебаний, позволяющий предсказать их развитие;

4) разработать математическую модель вибрационной диагностики аэродинамических и аэроупругих колебаний, позволяющую анализировать их развитие с использованием критерия прогнозирования;

5) разработать метод вибрационной диагностики аэродинамических и аэроупругих колебаний, сокращающий затраты и сроки доводки ГТД за счет проведения испытаний на минимальном количестве опытных ГТД и реализовать его в виде алгоритма и программных средств диагностики.

Методы исследования. Теоретические исследования базируются на основных положениях теории колебаний, преобразовании Фурье, теории фильтрации сигналов, аппарата математической статистики.

Достоверность результатов экспериментальных исследований и выводов обусловлена корректным использованием сертифицированных программно-аппаратных средств при их проведении.

Научная новизна работы состоит в разработке:

1) способа определения диагностической частоты флаттера лопаток компрессора с учетом изменения их параметров (массы, жесткости) и параметров воздушного потока (плотности, скорости), а также механической и аэродинамической связанности колебаний;

2) критерия прогнозирования опасных колебаний компрессора ГТД, ранее не применявшегося при диагностике и позволяющего предсказать их развитие;

3) математической модели вибрационной диагностики аэродинамических и аэроупругих колебаний, позволяющей анализировать развитие колебаний по значению амплитуды вибрационного сигнала на диагностической частоте в зависимости от условий проведения испытаний;

4) метода вибрационной диагностики аэродинамических и аэроупругих колебаний в компрессоре ГТД с использованием разработанного критерия прогнозирования, позволяющего своевременно диагностировать их развитие.

Практическая ценность работы состоит в повышении эффективности вибрационной диагностики при проведении испытаний ГТД, позволяющей сократить время и затраты на их проведение, и определяется:

1) получением экспериментальных данных о влиянии таких внешних факторов как бокового ветра и демпферов в замках лопаток на возникновение флаттера и вращающегося срыва в компрессоре ГТД, которые внесены в базу данных, используемую при диагностике;

2) разработкой алгоритма диагностики и прогнозирования аэродинамических и аэроупругих колебаний компрессора ГТД и программ, его реализующих;

3) подтверждением способов устранения аэродинамических и аэроупругих колебаний лопатки компрессора: на стадии проектирования за счет

разработки демпфирующего элемента, на стадии доводки путем изгиба средней линии пера лопатки без изменения формы ее профиля и массы, при эксплуатации за счет комплектования рабочего колеса лопатками по массовым и частотным характеристикам;

4) разработкой инженерной методики расчёта частотно-избирательных устройств различной сложности, являющихся элементами системы диагностики аэродинамических и аэроупругих колебаний.

Апробация работы. Материалы работы прошли апробацию в докладах на конференциях: Динамика и виброакустика машин (Самара, 2012 г.), Авиация и космонавтика (Москва, 2013 г.), Климовские чтения (Санкт-Петербург, 2013 г.), Академические Жуковские чтения (Воронеж, 2013 г.), Климовские чтения (Санкт-Петербург, 2014 г.), Динамика и виброакустика машин (Самара, 2014 г.), Научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения главного конструктора П.А. Колесова (Рыбинск, 2015); Климовские чтения (Санкт-Петербург, 2015 г.); Проблемы и перспективы развития двигателестроения (Самара, 2016 г.).

Реализация результатов работы. Основные научные и практические результаты диссертационной работы внедрены в ПАО «НПО «Сатурн» при стендовых испытаниях ГТД, а также в учебном процессе РГАТУ имени П.А. Соловьева при чтении курса «Автоматика и регулирование» на кафедре «Авиационные двигатели».

Основные положения, выносимые на защиту.

1) Критерий прогнозирования, позволяющий предсказать развитие опасных колебаний компрессора ГТД, и зависимость по определению диагностической частоты флаттера, учитывающая изменение параметров лопаток, воздушного потока и механическую и аэродинамическую связанность колебаний.

2) Математическая модель вибрационной диагностики аэродинамических и аэроупругих колебаний, позволяющая анализировать их развитие по разработанному критерию прогнозирования на диагностической частоте.

3) Результаты экспериментальных исследований влияния бокового ветра и демпферов в замках лопаток вентилятора на возникновение флаттера и вращающегося срыва.

4) Метод вибрационной диагностики аэродинамических и аэроупругих колебаний в компрессоре ГТД с использованием разработанного критерия прогнозирования, позволяющего своевременно диагностировать их развитие.

Публикации. По результатам научных исследований опубликовано 27 печатных работ, из которых 4 патента на изобретения, 1 – на полезную модель и 6 статей опубликованы в журналах, включенных в перечень ВАК.

Структура и объем работы. Работа изложена на 177 листах, содержит 52 рисунка и состоит из введения, 5 разделов, заключения, перечня использованных источников из 109 наименований и 3 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе дана характеристика состояния проблемы диагностики аэродинамических и аэроупругих колебаний, происходящих в компрессоре ГТД. Проведен сравнительный анализ методов диагностики аэродинамических и аэроупругих колебаний, разработана классификация аналитических и экспериментальных методов их прогнозирования, дано сравнение классических аналитических методов и расчетных исследований.

Исследованию и диагностике флаттера и вращающегося срыва посвящены работы отечественных (Самойловича Г. С., Сачина В. М., А. А. Хорикова Михайлова В. М., Канунникова И. П., Ольштейна Л. Е., Шипова Р. А., Сарена В. Э., Ханяна Г. С. и др.) и зарубежных исследователей (Снайдера Л., Коммерфорда Г., Куркова А., Дикуса Д., Сринивасана А., Бендиксена О., Килба Р., Кейзы К. и др.), однако вопросы прогнозирования при диагностике ранее не рассматривались.

При диагностике флаттера по информации со статорных деталей ГТД (корпусной вибрации, пульсации давления потока) получила распространение формула определения диагностической частоты флаттера, на которой происходит рост амплитуды динамического сигнала, например, пульсаций давления потока. Диагностическая частота определяется как сумма частот собственных колебаний лопаток и произведения числа узловых диаметров на частоту вращения ротора. Частота собственных колебаний может быть определена как расчетным (в ANSYS), так и экспериментальным (на вибростенде) путем, причем при диагностике флаттера по информации с вращающихся деталей ГТД (с тензорезисторов) при его возникновении на этой частоте происходит рост вибрационных напряжений.

В настоящее время диагностирование опасных колебаний компрессора ГТД выполняется по уже зарегистрированной информации, что не позволяет своевременно распознавать и предотвращать последствия их возникновения и может привести к повреждению деталей и узлов ГТД. При диагностике колебаний обычно используют спектральный анализ результатов вибро- и тензометрирования, а также результаты записи пульсаций давления потока. По результатам исследований, проведенных различными авторами (А. А. Хориков и др.), одновременного возникновения флаттера и вращающегося срыва не происходит.

На рисунке 1 для двух ГТД различного класса тяги представлен прогноз возникновения флаттера с использованием вероятностно-статистического метода и результаты экспериментальной проверки, которая не подтвердила прогноз по причине недостаточной наполненности базы экспериментальных данных.

В соответствии с требованиями нормативно-технической документации все двигатели подлежат проверке на отсутствие флаттера и вращающегося срыва. Несмотря на развитие информационных технологий, основным источником диагностической информации продолжает оставаться эксперимент. Настоящие

исследования направлены на сокращение сроков доводки ГТД и затрат за счет своевременной диагностики опасных по своим последствиям флаттера и вращающегося срыва путем разработки эффективного метода диагностики.

Проведен сравнительный анализ методов диагностики аэродинамических и аэроупругих колебаний, разработана классификация аналитических и экспериментальных методов их прогнозирования, дано сравнение классических аналитических методов и расчетных исследований. По результатам анализа современного состояния проблемы диагностики аэродинамических и аэроупругих колебаний сформулированы задачи исследования, приведенные во введении.

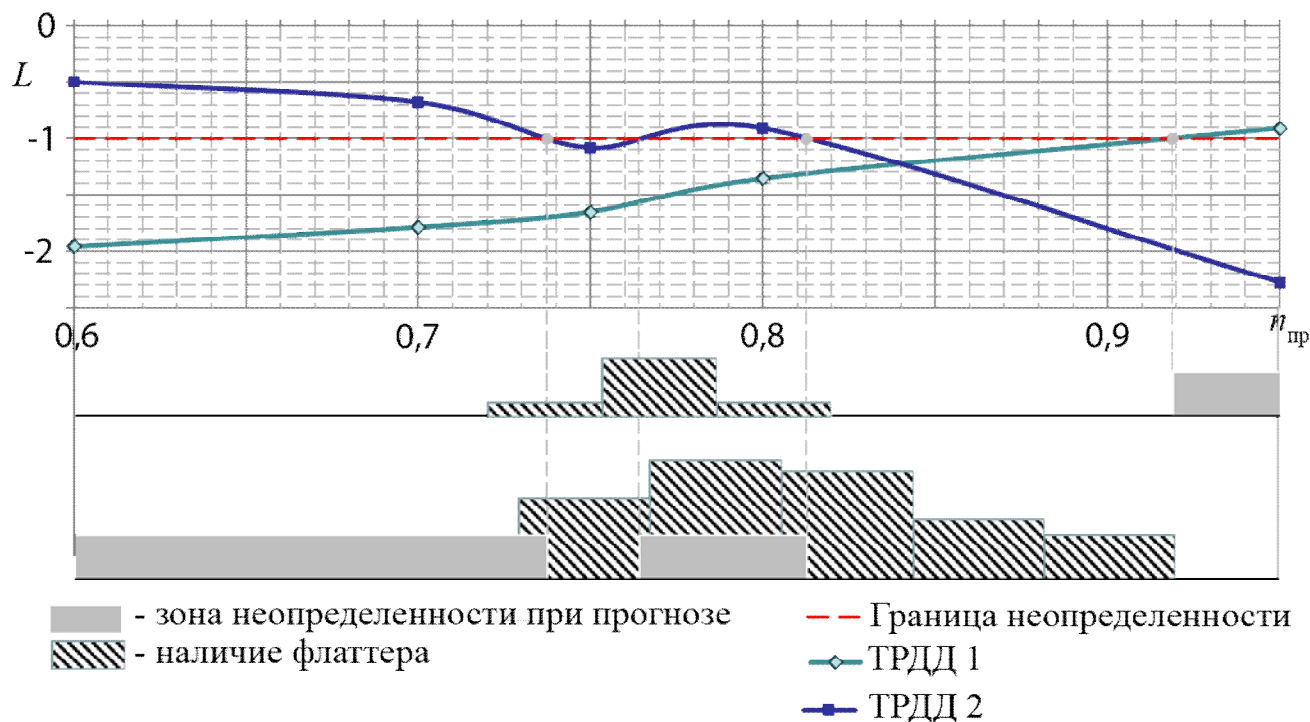


Рисунок 1 – Верификация результатов прогнозирования флаттера
(L – функция правдоподобия, $n_{пр}$ – приведенная частота вращения ротора)

Во второй главе исследовано влияние связанности изгибных и крутильных колебаний, и упруго-массовых характеристик лопаточного венца на его устойчивость к флаттеру, предложены конструктивные мероприятия по ее повышению.

Разработан метод, согласно которому комплектование производится на основании параметра k , учитывающего весовые характеристики и частоты собственных колебаний лопаток по наиболее опасной форме, определяемого как

$$k_i = BX_i \cdot (f_i/f_{cp})^2, \quad (1)$$

где BX_i – весовая характеристика i -ой лопатки; f_i – частота собственных колебаний i -ой лопатки по наиболее опасной форме; f_{cp} – среднее значение частот собственных колебаний лопаток по наиболее опасной форме; $i = 1 \div n$ – номер лопатки, где n – количество лопаток.

Показано, что параметры демпфирования целесообразно учитывать при диагностике аэродинамических и аэроупругих колебаний в компрессоре ГТД.

Предложены мероприятия по повышению устойчивости к флаттеру рабочего колеса ГТД за счет конструкционного демпфирования.

Для аналитического определения диагностической частоты аэроупругих колебаний проведено математическое моделирование колебаний лопаточного венца. Лопаточный венец представлен в виде решетки эквивалентных профилей, совершающих колебания по изгибно-крутильным формам. Действующие при обтекании потоком профилей стационарные и нестационарные аэродинамические силы и моменты инерции учтены в виде коэффициентов в направлении осей. Из-за малого влияния удаленных профилей на аэродинамические силы в модели рассмотрены три соседних профиля. Зависимости, характеризующие механическую связанность профилей лопаток, в общем случае приняты различными. Из уравнения движения решетки профилей с малой динамической неоднородностью и условия баланса работ на границе устойчивости, полученного специалистами ЦИАМ А. А. Хориковым, В. М. Михайловым, С. А. Ивановым, выведена формула для определения диагностической частоты флаттера

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{m_n} \left[k_n + a_n \cdot \frac{\rho w^2}{2} + 2c + \frac{x_{n-1}}{x_n} \left(\frac{\rho w^2}{2} a_{n-1} - c \right) + \frac{x_{n+1}}{n} \left(\frac{\rho w^2}{2} a_{n+1} - c \right) \right]}, \quad (2)$$

где m_n – масса профиля; k_n – его собственная жесткость; a_n – аэродинамические коэффициенты влияния; c – коэффициент, характеризующий механическую связанность; ρ , w – плотность и скорость набегающего воздушного потока, соответственно. Проверка формулы показала, что она корректно отражает физические процессы, происходящие при возникновении флаттера. Дальнейшее ее усовершенствование связано с учетом других существенных факторов при оценке устойчивости лопаток с большей изогнутостью, определением характера распределения суммарной работы аэродинамических сил по радиусу колеса, оценкой дестабилизирующего влияния соседних лопаток, а также усложнением модели. Математическое моделирование позволило получить предварительную информацию по устойчивости компрессора ГТД к флаттеру. Для решения проблемы необходим инженерный анализ расчетных и экспериментальных данных. Формула (2) дополняет известную формулу определения диагностической частоты флаттера в части моделирования влияния параметров лопаток, воздушного потока, а также механическую и аэродинамическую связанность колебаний на его возникновение.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований влияния внешних факторов (бокового ветра и демпферов, установленных в замках лопаток) на уровень вибрационных напряжений в лопатках, используемые для разработки методов диагностики аэродинамических и аэроупругих колебаний компрессора ГТД с широкохордными лопатками вентилятора.

Компрессор низкого давления в составе авиационного ГТД класса тяги 8 тонн проходил испытания на стенде с использованием генератора бокового ветра, установленного под углом 90^0 к оси двигателя, при скорости ветра окружающей атмосферы не более 1 м/с.

Перед проведением испытаний лопатки и диск вентилятора были препарированы тензорезисторами, для передачи сигналов от которых использовался радиотелеметрический токосъемник. Вибрографирование корпуса ГТД выполнялось по информации с вибропреобразователей. Диагностика флаттера выполнялась по появлению в спектре вибрации составляющей на диагностической частоте, некратной частоте вращения ротора. Испытания проводились на открытом испытательном стенде при следующих условиях: скорость бокового ветра составляла 0 м/с, 10 м/с и 15 м/с, температура на входе в двигатель – от 271 К до 280 К, частота вращения вентилятора изменялась в диапазоне 0,692 – 0,877 от максимальной. При этом амплитуда вибронапряжений в лопатках при колебаниях по основному тону изменялась от 5,7 МПа до 133 МПа. Пропорционально этим значениям изменялись уровни вибрации на диагностической частоте. По результатам проведенных исследований разработана методика проверки отсутствия автоколебаний лопаток компрессора по спектральному анализу корпусной вибрации, которая используется при стендовых испытаниях авиационного ГТД класса тяги 8 т.

Проведено исследование влияние демпферов в замках лопаток авиационного ГТД класса тяги 13 тонн на возникновение флаттера. На начальных этапах испытаний ГТД имели место случаи возникновения флаттера рабочего колеса вентилятора, сопровождавшегося ростом на частоте основного тона вибрационных напряжений в лопатках до 157 МПа и амплитуды виброскорости на диагностической частоте до 15 мм/с, что не позволяло выйти на взлётный режим. С целью снижения вибрационных напряжений в рабочих лопатках вентилятора при проходе режима, на котором был зафиксирован флаттер при выходе на взлётный режим ГТД, в замках лопаток вентилятора были установлены демпферы из фольги Я1Т толщиной 0,1 мм. При испытаниях с установленными демпферами максимальный уровень вибрационных напряжений при флаттере снизился до 127 МПа, что позволило осуществить проход через режим, на котором был зафиксирован флаттер, и выйти на взлётный режим.

По результатам проведенных экспериментальных исследований для различных условий проведения испытаний ГТД были построены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), используемые для настройки следящих узкополосных фильтров. Диагностика опасных колебаний на ранней стадии развития, согласно разработанному критерию прогнозирования, осуществляется при достижении предварительно установленного порогового уровня сигнала. Пороговые уровни A сигнала при различных условиях проведения испытаний ГТД определяются по АЧХ и параметрам демпфирования следующим образом

$$A = \frac{A_{\max}}{\sqrt{1 + \frac{\Delta\omega^2}{\gamma^2 \omega_0^2}}} = \frac{A_{\max}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi \cdot \Delta\omega}{\delta \cdot \omega_0}\right)^2}}, \quad (3)$$

где A_{\max} – максимальная амплитуда колебаний по АЧХ, γ – коэффициент демпфирования; $\Delta\omega$ – разность частот, соответствующих равным амплитудам A

на обеих ветвях АЧХ; ω_0 – средняя частота; δ – логарифмический декремент колебаний.

Четвертая глава посвящена разработке метода вибрационной диагностики аэродинамических и аэроупругих колебаний в компрессоре ГТД. Для диагностики предложено использовать частотные характеристики сигналов, полученные при различных условиях проведения испытаний, поэтому процесс диагностики был представлен как прохождение сигнала через узкополосный следящий фильтр (рисунок 2), настроенный на диагностическую частоту флаттера или вращающегося срыва. Выбор и настройка фильтра на диагностическую частоту производятся по АЧХ, построенным на основании предварительно проведенных экспериментальных исследований. Пороговые уровни сигналов, при достижении которых выполняется снижение режима работы ГТД, определяются по АЧХ и параметрам демпфирования.

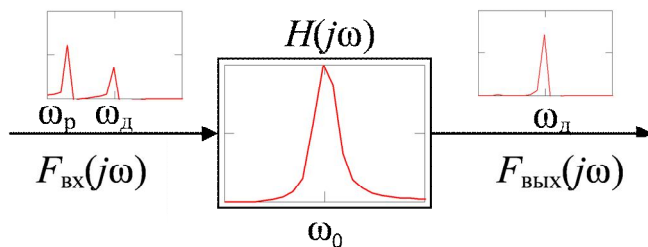


Рисунок 2 – Прохождение входного вибрационного сигнала через полосно-пропускающий фильтр

Входной сигнал $F_{\text{вх}}(j\omega)$, поступающий на фильтр, с учетом принципа суперпозиции, представлен в виде суммы составляющих на частоте вращения ротора и на диагностической частоте при флаттере или вращающемся срыве. Выходной сигнал $F_{\text{вых}}(j\omega)$ представлен произведением входного сигнала на модуль передаточной функции $H(j\omega)$ (АЧХ фильтра).

Для моделирования была разработана передаточная функция используемого при диагностике полосно-пропускающего фильтра четвертого порядка

$$H(s) = \frac{K \cdot C \cdot s^2}{Q^2 \cdot \left[\frac{s \cdot (s^2 + \omega_0^2)}{E \cdot \omega_0} \cdot \left(D + \frac{1}{D} \right) + \left(D^2 + \frac{1}{D^2} + \frac{1}{E^2} \right) \cdot s^2 + \omega_0^2 + \frac{s^4}{\omega_0^2} \right]}, \quad (4)$$

где K – коэффициент усиления фильтра четвертого порядка; C, D, E – нормирующие коэффициенты; $Q = \frac{\omega_0}{\omega_{\text{ср2}} - \omega_{\text{ср1}}}$ – добротность фильтра, ω_0 – средняя частота; $\omega_{\text{ср1}}, \omega_{\text{ср2}}$ – частоты срезов фильтра, s – комплексная переменная.

Передаточная функция позволяет выделить из динамического сигнала составляющую на диагностической частоте флаттера или вращающегося срыва, т.е. производить диагностику этих процессов.

Метод диагностики основан на анализе АЧХ и состоит в следующем.

1) Определяют диагностические частоты флаттера $f_{\delta \text{ АК}}$ и вращающегося срыва $f_{\delta \text{ ВС}}$ для ступеней компрессора, в которых возможно их возникновение; расчет осуществляют по зависимости, учитывающей геометрические характеристики и параметры воздушного потока. Для различных режимов работы ГТД справедливо неравенство $f_{\delta \text{ ВС}} < f_p < f_{\delta \text{ АК}}$, где f_p – частота вращения ротора.

2) Для различных условий работы ГТД по результатам экспериментальных исследований строят АЧХ на диагностических частотах флаттера и вращающегося срыва, которые вносят в память системы управления ГТД.

3) По АЧХ выбирают узкополосные следящие фильтры и настраивают их на диагностические частоты флаттера и вращающегося срыва. Количество фильтров для каждого вида диагностируемых колебаний определяется количеством диагностических частот по наиболее опасным формам колебаний.

4) Измеряют корпусную вибрацию вибропреобразователем, установленным на корпусе ГТД вблизи исследуемой ступени рабочего колеса. В качестве параметра вибрации используют виброскорость.

5) В зависимости от условий работы ГТД выбирают предварительно построенные для флаттера и вращающегося срыва АЧХ, по которым определяют параметр демпфирования, в качестве которого используют логарифмический декремент колебаний $\delta \approx \pi / Q$ или коэффициент демпфирования $\gamma = \delta / \pi$.

6) По выбранным АЧХ и значениям параметра демпфирования определяют, например, по зависимости (3), пороговые уровни сигналов при флаттере и вращающемся срыве – амплитуду A сигнала (рисунок 3). Для этого достаточно использовать одну восходящую ветвь АЧХ, полученную при наборе частоты вращения ГТД. Результаты экспериментов добавляют в базу данных.

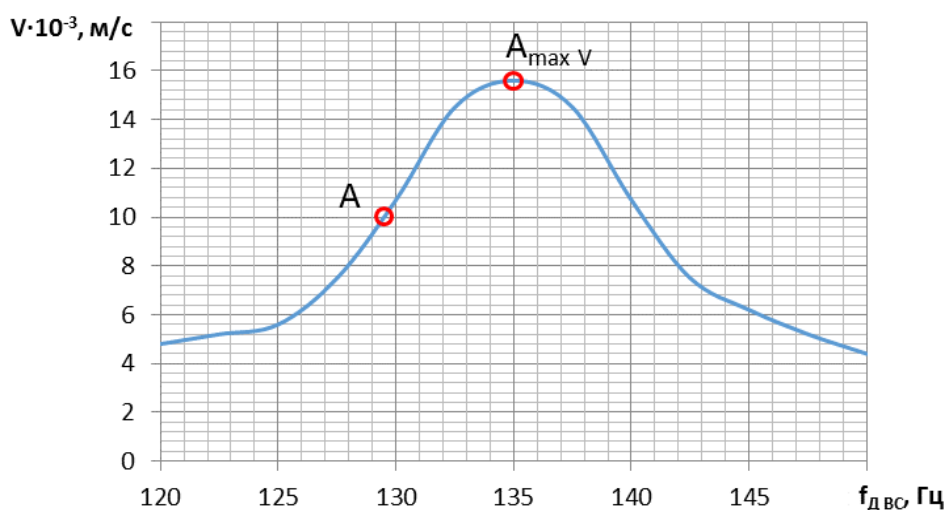


Рисунок 3 – АЧХ – зависимость амплитуды виброскорости от диагностической частоты сигнала, используемая при выборе и настройке фильтра

7) При достижении порогового уровня A амплитудой сигнала, попадающего в полосу пропускания фильтра, настроенного на диагностическую частоту флаттера или вращающегося срыва, диагностируют колебания соответствующего вида.

8) При диагностировании флаттера или вращающегося срыва изменяют режим работы ГТД с целью недопущения повреждения его деталей и узлов.

Метод реализован при стендовых испытаниях авиационного ГТД при проверке на отсутствие флаттера и вращающегося срыва.

При отсутствии возможности выполнять диагностику с помощью следящего фильтра дополнительно был разработан метод диагностики по коэффициенту

эксцесса, согласно которому по результатам экспериментальных исследований быстропеременных процессов задают пороговые уровни для сигналов с датчика пульсаций давления потока и вибропреобразователя, установленных на статорных деталях ГТД вблизи рабочего колеса, достижение которых свидетельствует о возникновении опасных колебаний. Определяют соответствующие им пороговые значения коэффициентов эксцесса, характеризующих потерю устойчивости. Вид колебаний определяют по моментам времени, в которые значения коэффициентов эксцесса для сигналов с указанных датчиков достигают пороговых значений. Метод был реализован при определении вида колебаний авиационного ГТД.

Пятая глава посвящена разработке алгоритмов диагностики, реализованных в виде программ, которые позволяют своевременно предупреждать возникновение опасной ситуации, связанной с увеличением вибрационных напряжений в деталях компрессора до опасных значений.

Диагностирование аэродинамических и аэроупругих колебаний состоит из двух этапов: расчетного определения диагностических частот и идентификации составляющих на них в спектре динамического сигнала.

Для диагностирования колебаний при отсутствии следящего фильтра дополнительно был разработан алгоритм, реализация которого не требует дополнительных затрат при подготовке к испытаниям. Программа, разработанная по методу диагностики с использованием коэффициента эксцесса (рисунок 4), позволяет оценивать изменения в техническом состоянии ГТД при возникновении аэродинамических и аэроупругих колебаний, а также трендов вибрации.

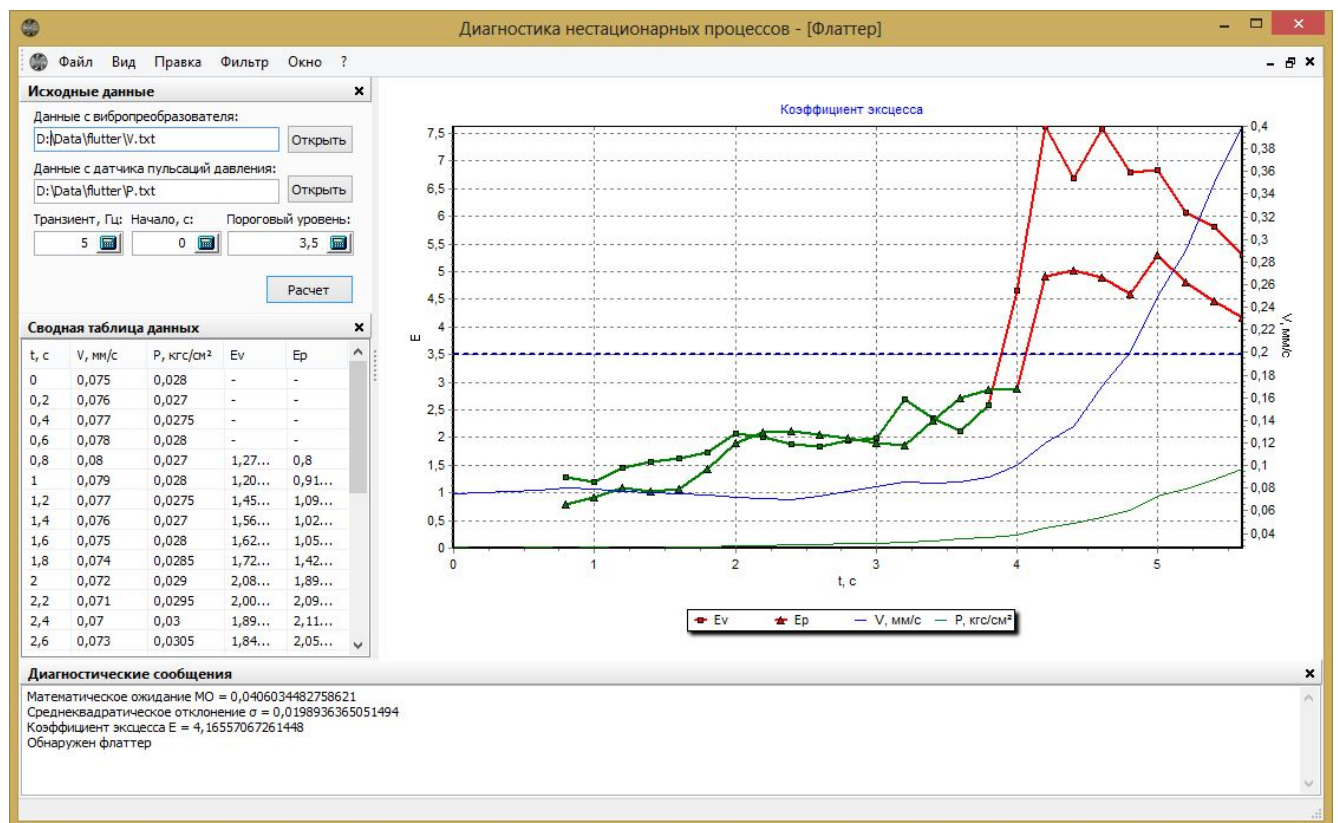


Рисунок 4 – Результат диагностики флаттера

Разработан алгоритм, основанный на анализе исходных данных и прогнозе дальнейшего развития динамического процесса с помощью рекурсивного алгоритма Невилла, основанного на уравнении Лагранжа. Алгоритм позволяет при минимальных затратах машинного времени производить полиномиальную экстраполяцию функции с заданной точностью. Алгоритм реализован при прогнозировании изменений динамических сигналов при изменении технического состояния ГТД.

Предложена инженерная методика расчёта элементов системы диагностики флаттера – частотно-избирательных устройств различных порядков с заданной неравномерностью в полосе пропускания, реализованная в виде программы.

Заключение содержит перечень основных результатов работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1) На основании проведенного анализа методов диагностики и прогнозирования аэродинамических и аэроупругих колебаний установлено, что для повышения своевременности вибрационной диагностики опасных колебаний необходимо дополнить ее элементами прогнозирования.

2) Исследовано влияние внешних факторов (бокового ветра и демпферов в замках лопаток) на возникновение аэродинамических и аэроупругих колебаний в компрессоре ГТД, что позволило разработать критерий прогнозирования, позволяющий предсказать их развитие.

3) Разработан метод вибрационной диагностики аэродинамических и аэроупругих колебаний по прогнозируемому в зависимости от условий проведения испытаний значению амплитуды вибрационного сигнала. Метод сокращает затраты и сроки доводки ГТД за счет проведения испытаний на минимальном количестве опытных ГТД. Метод защищен патентом РФ на изобретение и реализован в виде алгоритма и программных средств диагностики;

4) Разработана математическая модель вибрационной диагностики аэродинамических и аэроупругих колебаний, позволяющая анализировать их развитие с использованием критерия прогнозирования.

5) Получена зависимость для определения диагностической частоты флаттера, учитывающая изменение параметров лопаток, воздушного потока, а также механическую и аэродинамическую связанность колебаний.

6) Разработаны конструктивные мероприятия, направленные на снижение вибрационных напряжений рабочего колеса ГТД:

- способ комплектования рабочих лопаток компрессора в колесе, учитывающий как массовые, так и частотные характеристики рабочих лопаток, защищенный патентом РФ на изобретение;

- способ повышения устойчивости рабочего колеса ГТД к флаттеру за счет изгиба пера лопатки без перепрофилирования и увеличения массы, защищенный патентом РФ на изобретение.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

публикациях, включенных в перечень ВАК:

1) **Ремизов, А. Е.** Методы прогнозирования флаттера рабочего колеса компрессора авиационного газотурбинного двигателя [Текст] / А.Е. Ремизов, В.Вл. Посадов // Вестник РГАТУ. – Рыбинск: РГАТУ, 2012. – № 2 (23). – С. 85 – 91.

2) **Посадов, В. Вл.** Универсальный метод диагностики аэроупругих колебаний и анализа трендов вибраций при длительных испытаниях газотурбинного двигателя [Текст] / Посадов В.Вл., Ремизов А.Е. // Вестник РГАТУ. – Рыбинск: РГАТУ, 2014. – № 1 (28). – С. 7-12.

3) **Посадов, В. Вл.** Диагностика и прогнозирование флаттера компрессора авиационного газотурбинного двигателя [Текст] / В.Вл. Посадов, В.Вал. Посадов, А.В. Фирсов // Контроль. Диагностика. – М., 2015. – № 1 (199). – С. 52-60

4) **Посадов, В. Вл.** Алгоритмы диагностики аэродинамических и аэроупругих колебаний компрессора авиационного газотурбинного двигателя [Текст] / В. Вл. Посадов, В. Вал. Посадов, А. Е. Ремизов // Контроль. Диагностика. – М., 2016. – № 3 (213). – С. 34-38.

5) **Посадов, В. Вл.** Контроль упругомассовых характеристик лопаточного венца газотурбинного двигателя в целях повышения устойчивости к флаттеру [Текст] / В. Вл. Посадов, В. Вал. Посадов, С. В. Багров // Контроль. Диагностика. – М., 2017. – № 2. – С. 48-52.

6) **Посадов, В. Вл.** Метод вибрационной диагностики аэродинамических и аэроупругих колебаний в компрессоре газотурбинного двигателя [Текст] / В.Вл. Посадов, А.Е. Ремизов // Вестн. Самар. ун-та. Т. 15. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. –2016. – № 4. – С. 126-132.

прочих публикациях:

7) **Посадов, В.Вл.** Исследование устойчивости к флаттеру решетки профилей авиационного ГТД в нестационарном потоке [Текст] / В.Вл. Посадов, В.Вал. Посадов, А.Е. Ремизов // Динамика и виброакустика машин: сб. тез. докл. – Самара.:СГАУ, 2012. – Т. 2. – С. 60-62.

8) **Пат. 2511773 Российская Федерация, МПК⁸ G 01 M 15/14.** Способ диагностики колебаний рабочего колеса турбомшины [Текст] / В.Вл. Посадов, А.В. Фирсов, В.Вал. Посадов; заявитель и патентообладатель ОАО «НПО «Сатурн». - № 2013108563/06; заявл. 26.02.13; опубл. 10.04.14, Бюл. № 10.

9) **Посадов, В.Вл.** Вывод соотношений, определяющих условия возникновения флаттера компрессора авиационного газотурбинного двигателя [Текст] / В.Вл. Посадов, А.Е. Ремизов, В.Вал. Посадов // Авиация и космонавтика – 2013 :сб. тез. докл. – М., 2013. – С. 379 – 381.

10) **Посадов, В.Вл.** Исследование природы срывного флаттера рабочего колеса компрессора авиационного газотурбинного двигателя [Текст] / В.Вл. Посадов, В.Вал. Посадов, А.А. Еремин, А.Е. Ремизов // Климовские чтения – 2013 : сб. докл. – СПб., 2013. – С. 110 – 118..

11) **Посадов, В.Вл.** Диагностика нестационарных процессов при стендовых испытаниях газотурбинного двигателя [Текст] / В.Вл. Посадов, В.Вал. Посадов // Климовские чтения – 2013 / Перспективные направления развития двигателестроения: сб. докл. – СПб., 2013. – С. 118 – 127.

12) Методика расчетного определения нестационарных процессов в работе газотурбинного двигателя: программа для ЭВМ / В.Вл. Посадов, В.Вал. Посадов. – М., 2013 – Свидетельство № 2013619784. – Бюл. № 4.

13) Методика расчета диагностических частот подшипников газотурбинного двигателя: программа для ЭВМ / В.Вл. Посадов, А.В. Фирсов, В.Вал. Посадов. – М., 2013 – Свидетельство № 2013619785. – Бюл. № 4.

14) **Пат. 2533526 Российская Федерация, МПК⁸ F 04 D 29/38.** Способ обеспечения устойчивости рабочих лопаток турбомашин к автоколебаниям [Текст] / В.Вл. Посадов, В.Вал. Посадов, А.В. Фирсов; заявитель и патентообладатель ОАО «НПО «Сатурн». - № 2013138533/06; заявл. 19.08.13; опубл. 20.11.14, Бюл. № 32.

15) Методика определения вращающегося срыва в компрессоре газотурбинного двигателя: программа для ЭВМ / В.Вл. Посадов, В.Вал. Посадов, О.Я. Ибрагимов, О.Л. Посадова. – М., 2014 – Свидетельство № 2014613330. – Бюл. № 4.

16) **Посадов, В.Вл.** Обеспечение устойчивости к флаттеру рабочих лопаток авиационного газотурбинного двигателя [Текст] / В.Вл. Посадов // сб. тез. докл. – Рыбинск: РГАТУ, 2015. – Т. 2. – С. 14-18.

17) Методика прогнозирования изменений динамических сигналов и оценки трендов вибрации в темпе проведения испытаний ГТД: программа для ЭВМ / В.Вл. Посадов, В.Вал. Посадов, О.Л. Посадова. – М., 2014 – Свидетельство № 2014614715. – Бюл. № 6.

18) **Пат. 143574 Российская Федерация, МПК⁸ F 01 D 25/06.** Устройство демпфирования колебаний рабочих лопаток вентилятора газотурбинного двигателя [Текст] / В.Вл. Посадов, В.Вал. Посадов, Н.В. Пикунов; заявитель и патентообладатель ОАО «НПО «Сатурн». - № 2014108352/06; заявл. 04.03.14; опубл. 27.07.14, Бюл. № 21.

19) **Посадов, В.Вл.** Диагностика срывного флаттера рабочего колеса газотурбинного двигателя [Текст] / В.Вл. Посадов, В.Вал. Посадов // Климовские чтения – 2014 : сб. докл. – СПб., 2014. – С. 208-216.

20) **Посадов, В.Вл.** Прогнозирование флаттера лопаток вентилятора газотурбинного двигателя [Текст] / В.Вл. Посадов, В.Вал. Посадов // Климовские чтения – 2014 / Перспективные направления развития двигателестроения: сб. докл. – СПб., 2014. – Т. 1. – С. 216-225.

21) **Посадов, В.Вл.** Диагностика аэроупругих колебаний и анализ трендов вибраций при испытаниях газотурбинного двигателя [Текст] / В.Вл. Посадов, В.Вал. Посадов, А.Е. Ремизов // Динамика и виброакустика машин : сб. тез. докл. – Самара, 2014. – С. 467-468..

22) **Пат. 2590983 Российская Федерация, МПК⁸ F 01 D 5/10.** Способ комплектования лопаток рабочего колеса турбомашин [Текст] / В.Вл. Посадов,

В.Вал. Посадов, С.В. Багров; заявитель и патентообладатель ОАО «НПО «Сатурн». - № 2014143962/06; заявл. 30.10.14; опубл. 10.07.16, Бюл. № 19.

23) Пат. **2598983 Российская Федерация, МПК⁸ G 01 M 15/14**. Способ диагностики вида колебаний рабочих лопаток осевой турбомашины [Текст] / В.Вл. Посадов, В.Вал. Посадов; заявитель и патентообладатель ОАО «НПО «Сатурн». – № 2015113417/06; заявл. 10.04.15; опубл. 10.10.16, Бюл. № 28.

24) **Посадов, В.Вл.** Исследования и диагностика флаттера осевого компрессора авиационного газотурбинного двигателя [Текст] / В.Вл. Посадов, А.Е. Ремизов // Академические Жуковские чтения: сб. тез. докл. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2013. – С. 36-47.

25) Методика прогнозирования изменений динамических сигналов и оценки трендов вибраций: произведение науки / В.Вл. Посадов, В.Вал. Посадов. – М., 2015 – Свидетельство №15-565. – 13 с.

26) **Посадов, В.Вл.** Метод диагностики флаттера компрессора авиационного газотурбинного двигателя [Текст] / В.Вл. Посадов, В.Вал. Посадов // Климовские чтения – 2015 : сб. докл. – СПб., 2015. – С. 111-118.

27) **Посадов, В.Вл.** Метод вибрационной диагностики аэродинамических и аэроупругих колебаний в компрессоре ГТД [Текст] / В.Вл. Посадов // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: сб. докл. – Самара, 2016. – Т. 1. – С. 195-196.