

## МЕТОД ВИБРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ И АЭРОУПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ В КОМПРЕССОРЕ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2016

- В. В. Посадов** ведущий специалист, научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск, [vladimir.posadov@gmail.com](mailto:vladimir.posadov@gmail.com)
- А. Е. Ремизов** доктор технических наук, профессор, профессор кафедры авиационных двигателей, Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва, [ad@rsatu.ru](mailto:ad@rsatu.ru)

Исследовано влияние внешних факторов на возникновение опасных аэродинамических (вращающийся срыв) и аэроупругих (флаттер) колебаний в компрессоре авиационного газотурбинного двигателя (ГТД). Предложен метод диагностики опасных колебаний, основанный на анализе частотных характеристик. Новым в методе является внесение в него элементов прогнозирования. При этом о возникновении опасных колебаний судят по достижению амплитудой динамического сигнала соответствующего порогового уровня, прогнозируемого в зависимости от условий работы ГТД. В этом случае снижают режим его работы путём изменения расхода топлива и тем самым предотвращают развитие аварийной ситуации. Метод реализован при проведении стендовых испытаний авиационного ГТД.

*Газотурбинный двигатель; аэродинамические и аэроупругие колебания; диагностика.*

---

*Цитирование:* Посадов В.В., Ремизов А.Е. Метод вибрационной диагностики аэродинамических и аэроупругих колебаний в компрессоре газотурбинного двигателя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 4. С. 126-132. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-4-126-132

подавляющее большинство поломок деталей ГТД, в том числе широкохордных лопаток вентилятора, имеют усталостный характер и связаны с переменными напряжениями, возникающими в них при колебаниях. На стадиях проектирования и доводки современных ГТД важно исключить возникновение опасных форм колебаний, характеризующихся резким ростом вибрационных напряжений одновременно во всех элементах рабочего колеса ГТД (лопатках, замках, дисках и др.) до опасных значений. К таким колебаниям относятся аэродинамические (вращающийся срыв) и аэроупругие колебания (флаттер).

Вращающийся срыв и флаттер возникают на частотах, не кратных частоте вращения ротора, при этом вращающийся срыв является чисто аэродинамическим явлением и может возникнуть даже на абсолютно жёстких лопатках. Природа этих колебаний и борьба с ними различны, но проявления во многом похожи, прежде всего в высокой энергетике колебаний. Поэтому актуальность исследований определяется необходимостью своевременной и надёжной диагностики аэродинамических и аэроупругих колебаний.

Несмотря на значительные успехи теории флаттера лопаток рабочих колес осевых компрессоров ГТД, экспериментальные исследования остаются основным источником достоверной информации о воздействии различных факторов и особенностей конструкции рабочего колеса на его аэроупругую устойчивость. Поэтому необходим эффективный и надёжный метод, для разработки которого необходимо было решить следующие задачи:

- выполнить сравнительный анализ существующих методов прогнозирования и диагностики флаттера;

- провести экспериментальные исследования аэродинамических и аэроупругих колебаний для ГТД различного класса тяги с целью выявления диагностических признаков;

- разработать методы, алгоритмы и программы для своевременной диагностики аэродинамических и аэроупругих колебаний.

В [1] представлена характеристика состояния проблемы диагностики аэродинамических и аэроупругих колебаний, происходящих в компрессоре низкого давления ГТД, проанализированы условия их возникновения и особенности проявления. Проведён сравнительный анализ, разработана классификация аналитических и экспериментальных методов прогнозирования аэродинамических и аэроупругих колебаний. Дано сравнение классических аналитических методов и расчётных исследований.

На рис. 1 для двух ГТД различного класса тяги представлен прогноз возникновения флаттера с использованием вероятностно-статистического метода (выделено заливкой) и результаты экспериментальной проверки (отмечено штриховкой). Результаты эксперимента не подтвердили прогноз по причине недостаточной наполненности базы экспериментальных данных.

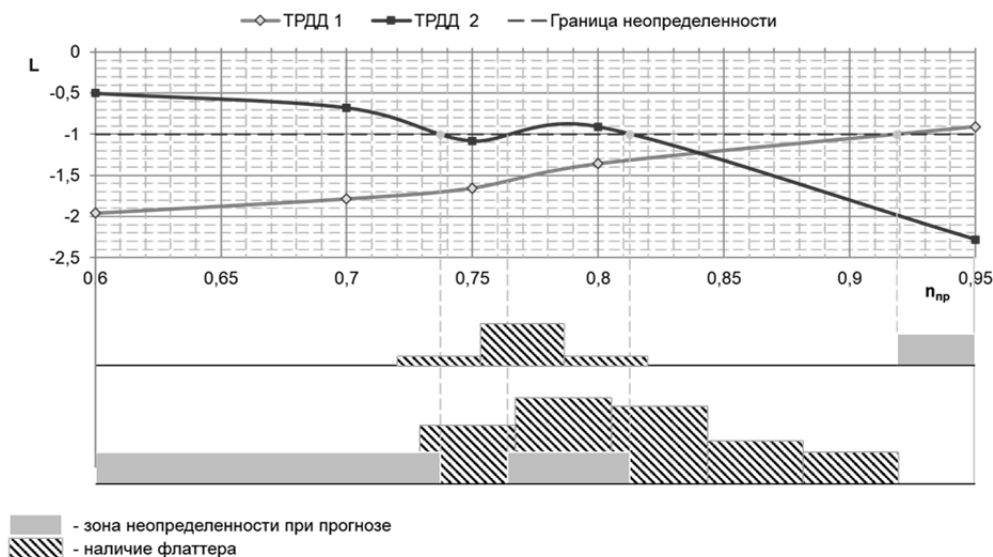


Рис. 1. Верификация результатов прогнозирования флаттера ( $L$  – функция правдоподобия [2])

Анализ существующих методов диагностики аэродинамических и аэроупругих колебаний показал необходимость их развития (усовершенствования и создания новых, более эффективных), в том числе с элементами прогнозирования, позволяющих определять дальнейшее развитие процесса.

Исследования влияния внешних факторов (бокового ветра и демпферов, установленных в замках лопаток) на уровень вибрационных напряжений в лопатках было проведено при испытаниях авиационного ГТД класса тяги 8 тонн, имеющего достаточно податливый диск по причине облегчения конструкции [3]. В процессе проведения эксперимента выполнено определение аэродинамических и прочностных характеристик одного из вариантов вентилятора на различных режимах работы двигателя путём изменения угла раскрытия регулируемого сопла вентилятора. При этом в качестве контролируемых параметров использовались газодинамические параметры по тракту двигателя как в первом, так и во втором контуре, а также определяемый по ним коэффициент газодинамической устойчивости ступени вентилятора. По результатам экспериментальных исследований для различных условий проведения испытаний построены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), показанные на рис. 2.

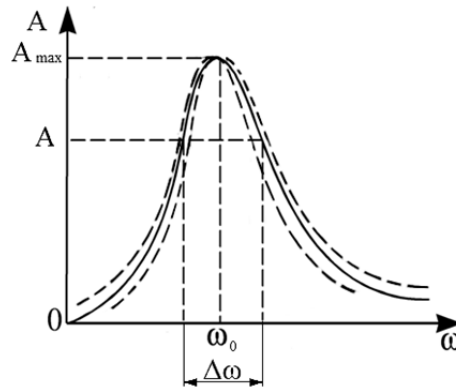


Рис. 2. Экспериментально полученные АЧХ в области диагностической частоты при аэродинамических и аэроупругих колебаниях

Выведены формулы, позволяющие по выбранным АЧХ и параметрам демпфирования определять пороговые уровни (амплитуды сигналов в точке  $A$ ):

$$A = \frac{A_{\max}}{\sqrt{1 + \frac{\Delta\omega^2}{\gamma^2 \omega_0^2}}}, \quad (1)$$

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

где  $A_{\max}$  – амплитуда максимальных колебаний по АЧХ;  $\gamma$  – коэффициент демпфирования;  $\Delta\omega$  – разность частот, соответствующих равным амплитудам  $A$  на обеих ветвях АЧХ;  $\omega_0$  – резонансная частота;  $\delta$  – логарифмический декремент колебаний.

Испытания, проведённые при различных условиях, позволили установить квази-пропорциональную зависимость между вибрационными напряжениями и уровнем вибрации на диагностической частоте флаттера, определяемой по известной формуле:

$$f_{\text{флатт}} = f_m + m f_p, \quad (3)$$

где  $f_m$  – частота собственных колебаний лопаток на различных частотах вращения рабочего колеса;  $m$  – число узловых диаметров;  $f_p$  – частота вращения рабочего колеса ГТД.

В процессе исследований установлено, что для диагностики целесообразно использовать частотные характеристики сигналов, полученные при различных условиях проведения испытаний.

Процесс диагностики представлен как прохождение сигнала через узкополосный следящий фильтр (рис. 3), настроенный на диагностическую частоту флаттера или вращающегося срыва. Выбор и настройка фильтра на диагностическую частоту производятся по АЧХ, построенным на основании предварительно проведённых экспериментальных исследований; пороговые уровни сигналов, при достижении которых производится снижение режима работы ГТД, определяются по АЧХ и параметрам демпфирования.

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

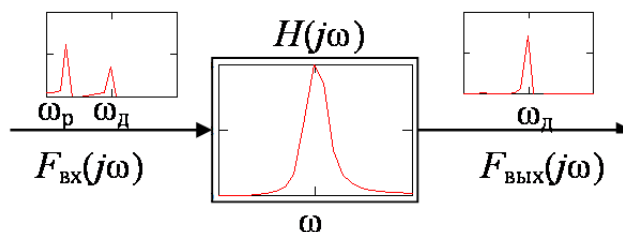


Рис. 3. Прохождение входного вибрационного сигнала через фильтр

В процессе исследований рассматривалась полосовая фильтрация динамического сигнала с использованием полосно-пропускающего фильтра Баттерворта четвёртого порядка, имеющего передаточную функцию:

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

где  $K$  – общий коэффициент усиления фильтра четвёртого порядка;  $C, D, E$  – нормированные коэффициенты;  $Q = \frac{\omega_0}{\omega_{cp2} - \omega_{cp1}}$  – добротность фильтра, характеризующая его качество.

Передаточная функция позволяет выделить из динамического сигнала составляющую на диагностической частоте флаттера или вращающегося срыва и осуществить слежение за ней, т.е. осуществить диагностику этих процессов. Метод диагностики, основанный на анализе АЧХ [4], осуществляют следующим образом.

Определяют диагностическую частоту флаттера  $f_{\partial AK}$  по формуле (3) и диагностическую частоту вращающегося срыва  $f_{\partial BC}$  для ступеней компрессора, в которых возможно его возникновение, по формуле, учитывающей геометрические характеристики и параметры воздушного потока. При этом учитывают, что на всех режимах работы ГТД справедливо:  $f_{\partial BC} < f_p < f_{\partial AK}$ .

Для различных условий работы ГТД строят АЧХ на диагностических частотах флаттера  $f_{\partial AK}$  и вращающегося срыва  $f_{\partial BC}$  по заранее полученным данным экспериментальных исследований ГТД или, при их отсутствии, проводят необходимые исследования для их получения, при этом ГТД препарируют тензорезисторами и хотя бы одним вибропреобразователем.

Полученные для различных условий проведения испытаний АЧХ (рис. 4) заносят в память системы управления ГТД.

По АЧХ выбирают узкополосные следящие фильтры и настраивают их на диагностические частоты флаттера  $f_{\partial AK}$  и вращающегося срыва  $f_{\partial BC}$ . Количество фильтров для каждого вида диагностируемых колебаний может определяться количеством диагно-

стических частот по интересующим (как правило, наиболее опасным) формам колебаний.

АЧХ характеризуется добротностью  $Q$ , которая связана с логарифмическим декрементом колебаний  $\delta$ , характеризующим демпфирование колебательной системы.

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

В зависимости от условий работы ГТД выбирают предварительно построенные для флаттера и вращающегося срыва АЧХ, по которым определяют параметр демпфирования, в качестве которого используют, например, логарифмический декремент колебаний  $\delta$ . Кроме логарифмического декремента колебаний  $\delta$  в качестве параметра демпфирования может быть использован коэффициент демпфирования  $\gamma$ , определяемый как  $\gamma = \frac{\delta}{\pi}$ .

По выбранным АЧХ и значениям параметров демпфирования определяют пороговые уровни сигналов при флаттере и вращающемся срыве – амплитуды сигнала в точке  $A$  (рис. 4), например по формулам (1), (2). Для этого достаточно использовать одну восходящую ветвь АЧХ, полученную при наборе частоты вращения ГТД.

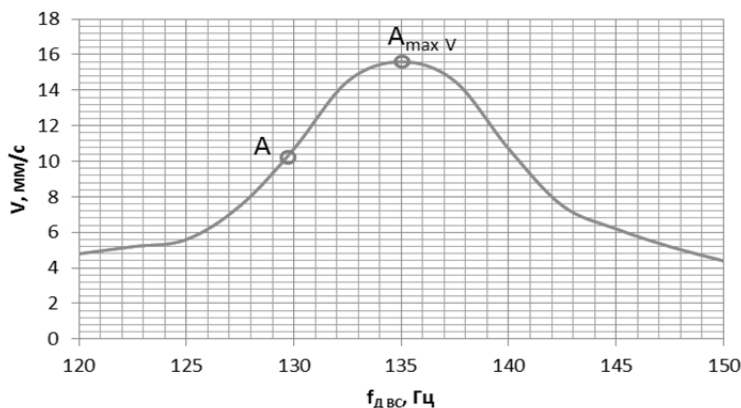


Рис. 4. АЧХ-зависимость амплитуды виброскорости от диагностической частоты сигнала, используемая при выборе и настройке фильтра

При достижении порогового уровня  $A$  амплитудой сигнала, попадающего в полосу пропускания фильтра, настроенного на диагностическую частоту флаттера  $f_{двс}$ , делают вывод о наличии флаттера.

При достижении порогового уровня  $A$  амплитудой сигнала, попадающего в полосу пропускания фильтра, настроенного на диагностическую частоту вращающегося срыва  $f_{двс}$ , делают вывод о наличии вращающегося срыва.

При диагностировании одного из видов колебаний изменяют режим работы ГТД с целью недопущения повреждения его деталей и узлов.

В разработанном методе реализованы элементы прогнозирования: предсказывая, каким будет следующее значение динамического сигнала на диагностической частоте при флаттере, можно значительно раньше начать изменение режима работы ГТД путём изменения расхода топлива, что позволяет предотвратить развитие аварийной ситуации при возникновении опасных колебаний.

Метод реализован при диагностике флаттера и вращающегося срыва осевого компрессора в процессе проведения стендовых испытаний авиационного ГТД. Для этого были разработаны алгоритмы диагностики [5], реализованные в виде программы, которые позволяют своевременно предупредить о возникновении опасной ситуации, свя-

занной с увеличением вибрационных напряжений в деталях компрессора до опасных значений. Метод исключает постановку ложного диагноза за счёт настройки фильтров на соответствующие диагностические частоты.

### Библиографический список

1. Ремизов А.Е., Посадов В.В. Методы прогнозирования флаттера рабочего колеса компрессора авиационного газотурбинного двигателя // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2012. № 2 (23). С. 85-91.

2. Михайлов В.М., Хориков А.А. К вопросу о вероятностно-статистическом прогнозировании флаттера бандажированных колес компрессоров // Труды ЦИАМ. 1981. № 953. С. 257-267.

3. Посадов В.В., Посадов В.В. Диагностика срывного флаттера рабочего колеса газотурбинного двигателя // Сб. докладов международной научно-технической конференции «Климовские чтения – 2014. Перспективные направления развития авиадвигателестроения». СПб.: Скифия-принт, 2014. С. 208-216.

4. Посадов В.В., Посадов В.В. Метод диагностики флаттера компрессора авиационного газотурбинного двигателя // Сб. докладов международной научно-технической конференции «Климовские чтения – 2015. Перспективные направления развития авиадвигателестроения». СПб.: Скифия-принт, 2015. С. 111-118.

5. Посадов В.В., Посадов В.В., Ремизов А.Е. Алгоритмы диагностики аэродинамических и аэроупругих колебаний компрессора авиационного газотурбинного двигателя // Контроль. Диагностика. 2016. № 3 (213). С. 34-38.  
DOI: 10.14489/td.2016.03.pp.034-038

## METHOD OF VIBRATION DIAGNOSTICS OF AERODYNAMIC AND AEROELASTIC OSCILLATIONS IN GAS TURBINE ENGINE COMPRESSOR

© 2016

**V. V. Posadov** leading specialist, NPO «Saturn», Rybinsk, Russian Federation, [vladimir\\_posadov@gmail.com](mailto:vladimir_posadov@gmail.com)

**A. E. Remizov** Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Aircraft Engines, Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovov, Rybinsk, Russian Federation, [ad@rsatu.ru](mailto:ad@rsatu.ru)

The paper analyzes aeroelastic (flutter) and aerodynamic (rotating stall) oscillations in gas turbine engine compressors. We review the external factors that influence these oscillations. We propose a new method of diagnosing hazardous oscillations. The method is based on the analysis of frequency characteristics. The novelty of the method is elements of forecasting introduced in it. We infer the presence of dangerous oscillations by a certain threshold level of the amplitude of the dynamic signal. We forecast this threshold depending on the operation conditions of a gas turbine engine. If the amplitude of the signal reaches the threshold level the engine speed is decreased by changing the rate of fuel consumption. This measure prevents an emergency. The method was implemented during bench tests of an aircraft gas turbine engine.

*Gas turbine engine; aerodynamic and aeroelastic oscillations; diagnostics.*

---

*Citation:* Posadov V.V., Remizov A.E. Method of vibration diagnostics of aerodynamic and aeroelastic oscillations in gas turbine engine compressor. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. V. 15, no. 4. P. 126-132. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-4-126-132

## References

1. Remizov A.E., Posadov V.V. Forecasting approach to GTE compressor impeller flutter. *Vestnik RGATU*. 2012. No. 2 (23). P. 85-91. (In Russ.)
2. Mikhaylov V.M., Khorikov A.A. On statistically distributed forecasting of flutter in compressor shrouded impellers. *Trudy TsIAM*. 1981. No. 953. P. 257-267. (In Russ.)
3. Posadov V.V., Posadov V.V. Diagnostika sryvnogo flattera rabocheho koleasa gazoturbinnogo dvigatelya. *Sb. докладов mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Klimovskie chteniya – 2014. Perspektivnye napravleniya razvitiya aviadvigatelestroeniya»*. SPb.: Skifiya-print Publ., 2014. P. 208-216. (In Russ.)
4. Posadov V.V., Posadov V.V. Metod diagnostiki flattera kompressora aviatsionnogo gazoturbinnogo dvigatelya. *Sb. докладов mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Klimovskie chteniya – 2015. Perspektivnye napravleniya razvitiya aviadvigatelestroeniya»*. St. Petersburg: Skifiya-print Publ., 2015. P. 111-118. (In Russ.)
5. Posadov V.V., Posadov V.V., Remizov A.E. Algorithms of aerodynamic and aeroelastic vibrations diagnostics in compressor of gas turbine engine. *Kontrol'. Diagnostika*. 2016. No. 3 (213). P. 34-38. (In Russ.) DOI: 10.14489/td.2016.03.pp.034-038