УДК 621.452.3-226-752.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЬЕЗОДЕМПФИРОВАНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЛОПАТКАХ ТУРБОМАШИН

Бортников А.Д.
ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова», Москва
adbortnikov@ciam.ru

Ключевые слова: гашение колебаний, пьезоэлемент, лопатка турбомашины.

Нормативные документы на вибрации лопаток турбомашин содержат высокие требования по допустимым уровням вибрационных напряжений в зависимости от режима работы двигателя, расположения в составе двигателя и формы колебаний.

Возникновение переменных напряжений в лопатках связано с действием на них изменяющихся во времени нагрузок. Выделяют два вида колебаний, способных проявляться как опасные: вынужденные резонансные колебания и автоколебания. В настоящем исследовании внимание уделено вынужденным колебаниям, которые являются следствием воздействия на лопатку внешних сил, связанных с неоднородностью окружного потока, набегающего на вращающееся колесо.

В условиях постоянно растущих эксплуатационных параметров газотурбинных двигателей (ГТД) приходится изыскивать все новые средства демпфирования колебаний для обеспечения мало- и многоцикловой выносливости деталей, особенно на нерасчетных режимах работы. Помимо способов, заключающихся в рассеянии энергии колебаний силами различного вида трения, исследуются методы гашения колебаний с помощью пьезоэлементов (ПЭ). Такие нетрадиционные способы организации демпфирования деталей турбомашин в настоящее время трудны в практической реализации, но для дальнейшего их использования необходимо опережающее изучение.

Поэтому развитие теоретических и экспериментальных работ по углубленному изучению принципов и возможностей пьезодемпфирования применительно к деталям ГТД является актуальной научно-исследовательской задачей. Основные трудности такого изучения заключаются в размещении ПЭ и электрических цепей внутри двигателя, и обеспечении их эффективной работы. Для практического решения первой задачи необходимо размещение элементов пьезоцепи внутри узлов, что частично рассматривается в данной работе, второй – использование бесконтактной передачи сигналов и обеих задач – повышение мощности ПЭ.

При обширной литературе, относящейся к теории и различным техническим приложениям ПЭ, имеется мало публикаций, непосредственно касающихся специфики пьезодемпфирования лопаток ГТД.

Гашению вынужденных резонансных колебаний лопаток ГТД с помощью пьезоэлементов посвящены работы [1-4]. Существенным недостатком этих работ является отсутствие количественных данных о снижении вибронапряжений в лопатках при уровнях вибрации, сравнимых с эксплуатационными.

Известно противоположное использование пьезоэлементов – в составе вибродинамических стендов для возбуждения колебаний. В данном исследовании предлагается принципиальная возможность возбуждения резонансных колебаний в лопатках и блисках турбомашин с помощью закрепленных на них ПЭ для проведения усталостных испытаний, публикации по данной теме отсутствуют.

На примере установившихся вынужденных колебаний одномассового осциллятора и нестационарных продольных колебаний упругого стержня продемонстрированы характерные особенности вибрационного взаимодействия пьезоэлементов и механических систем. Результаты расчетного моделирования с использованием волнового варианта метода конечных элементов подтвердили, что сосредоточенная нагрузка от ПЭ и внешняя вынуждающая нагрузка с точки зрения частотного анализа действуют как идентичные возбудители. С

помощью сосредоточенной нагрузки от ПЭ возможно гашение вынужденных колебаний, эффективность которого зависит от многих факторов: типа и мощности ПЭ, их числа и взаимного размещения, и положения на детали при разных формах колебаний, фаз настройки ПЭ относительно вынуждающих сил и между собой. Показана теоретическая возможность практически полного гашения резонансных колебаний, а также условие возникновения эффекта активного «антигашения» колебаний.

Перечисленные особенности вибрационного взаимодействия пьезоэлементов и стержня распространены и на изгибные колебания лопатки ГТД. С помощью метода конечных элементов решена задача активного пьезодемпфирования резонансных колебаний натурной рабочей лопатки компрессора при креплении на ее противоположных сторонах двух изгибных ПЭ (сенсора и актюатора), соединенных системой с обратной связью. Расчетно подтверждена возможность значительного снижения резонансных вибронапряжений лопатки с условием управления колебаниями пропорционально скорости изменения сигнала электрического напряжения ПЭ-сенсора.

Лабораторные испытания активного пьезодемпфирования резонансных вибронапряжений той же лопатки компрессора с двумя ПЭ, соединенными системой с обратной связью, подтвердили практическое достижение гашения колебаний при соответствующих параметрах обратной связи. Благодаря активному пьезодемпфированию удалось снизить резонансные вибронапряжения первой изгибной формы лопатки на 82%. Показана работоспособность ПЭ при высоких исходных уровнях резонансных вибронапряжений в лопатке 40…120 МПа.

На примере крупноразмерной лопатки вентилятора показана потенциальная возможность размещения на ней пьезоэлементов без дополнительной доработки конструкции лопатки. Экспериментально достигнуто снижение напряжений на 3…15% в зависимости от формы колебаний, что может быть использовано для повышения устойчивости лопатки вентилятора к автоколебаниям.

Экспериментально показана возможность размещения на статорной лопатке ПЭ и пассивной демпфирующей цепи, содержащей резистор. Достигнуто снижение вибрации на 12% при исходном уровне вибронапряжений в лопатке 150 МПа.

Расчетно показана возможность возбуждения резонансных колебаний во вращающемся титановом блиске с помощью одного ПЭ, расширяющий возможности проведения усталостных испытаний, в том числе с асимметрией цикла.

Список литературы

1. Active piezoelectric vibration control of subscale composite fan blades / Duffy K.P. [et al.] // Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers. 2012. Vol. 44731. P. 1217-1226.

2. Neubauer M., Schwarzendahl S., Han X. Shunted piezoceramics for vibration damping–modeling, applications and new trends // Smart Actuation and Sensing Systems-Recent Advances and Future Challenges. Intech Open. 2012. P. 695-716.

3. Sénéchal A. Réduction de vibrations de structure complexe par shunts piézoélectriques: Application aux turbomachines: Thèse de doctorat. Paris, CNAM. 2011. 249 p.

4. Botta F., Rossi A. Introductory PZT actuators optimal working configuration experimental study in a turbofan engine fan rotor blade // ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection. 2020. 11 p.

Сведения об авторе

Бортников Андрей Дмитриевич, ведущий инженер. Область научных интересов: динамика и прочность деталей турбомашин.

STUDY OF TURBOMACHINE BLADES PIEZO DAMPING VIBRATION STRESS

Bortnikov A.D.
Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, adbortnikov@ciam.ru

Keywords: oscillation damping, piezoelectric element, turbomachine blade

This work is about a method for blades damping using piezoelectric elements. The efficiency of active and passive piezo damping of turbomachine blades and the performance of piezo elements at high variable loads are demonstrated. The method of resonant oscillations excitation in a rotating blisk using a piezo element is shown.