

КОМБИНИРОВАННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОК ТУРБОАГРЕГАТОВ

© 2018 У.В. Бояркина, А.А. Грецов, С.А. Данилин, Е.Е. Дудкина

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 03.04.2018

В работе рассматриваются оптоэлектронные системы, обеспечивающие контроль деформационного состояния нагруженных лопаток турбоагрегатов. Проведен краткий анализ первичных преобразователей для реализации дискретно-фазового метода. Предложена реализация комбинированного оптоэлектронного СВЧ преобразователя для определения параметров крутильных колебаний лопаток, позволяющего минимизировать уровень препарирования корпуса турбоагрегата. Предложен метод определения амплитуды крутильных колебаний с использованием комбинированного преобразователя.

Ключевые слова: лопатка, крутильные колебания, оптоэлектронный преобразователь, СВЧ преобразователь, турбоагрегат.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании и доводке турбоагрегатов особое внимание уделяется безопасности их эксплуатации. В связи с этим к элементам вращающихся узлов турбоагрегатов предъявляются особые требования, связанные с их длительной и надежной работой. В первую очередь это касается лопаток, как самых многочисленных элементов, деформационное состояние которых зависит от аэродинамических и центробежных нагрузок, а также от воздействия высоких температур. Существуют критические значения рабочих параметров, превышение которых ведет к необратимым деформациям, и как следствие, к повреждению лопаток и выходу из строя турбоагрегата. Потребность в информации о реальном деформационном состоянии лопаток на рабочих режимах турбоагрегатов, обуславливает необходимость в разработке эффективных средств диагностики и контроля их перемещений, к которым в первую очередь относят изгибные и крутильные колебания, а также их комбинации.

Среди прочих задач контроля деформационного состояния лопаток особый интерес представляет определение параметров их крутильных колебаний, как одного из наиболее распространенных видов деформаций. Например, известны случаи возбуждения резонансных колебаний лопаток по высокочастотной крутильной форме

при работе двигателя в полете на режиме малого газа, когда происходит снижение самолета с эшелона [1]. Помимо этого, крутильные колебания являются одним из самых опасных видов колебаний. На рис. 1 представлена фотография повреждений лопатки компрессора низкого давления ГТД ДН-80, полученных под воздействием сил кручения. По этой причине разработка аппаратуры для контроля параметров крутильных колебаний является важным и перспективным направлением для построения систем управления режимами работы турбоагрегатов.



Рис. 1. Повреждение лопатки компрессора низкого давления ГТД ДН-80, вызванные воздействием крутильных колебаний

1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ЛОПАТОК

Бесконтактный контроль параметров крутильных колебаний лопаток может быть осуществлен ёмкостными, индукционными, вихретоковыми, радиоволновыми и оптоэлектронными преобразователями. Ёмкостные преобразователи обладают низкой стоимостью и технологичностью, для них характерна плохая помехозащищенность и, кроме этого, примене-

Бояркина Ульяна Викторовна, аспирант.

E-mail: uvbojarkina@yandex.ru

Грецов Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники.

E-mail: greckov1989@rambler.ru

Данилин Сергей Александрович, аспирант.

E-mail: sad1st07@yandex.ru

Дудкина Елена Евгеньевна, аспирант.

E-mail: staku@rambler.ru

ние данного типа преобразователя возможно только для контроля деформационного состояния металлических лопаток. Преобразователи вихретокового типа обеспечивают бесконтактные измерения параметров крутильных колебаний лопаток, однако для большинства из них существуют ограничения по температуре, связанные с разрушением изоляционных покрытий обмоток катушек преобразователя. Кроме этого, перед эксплуатацией необходима калибровка преобразователя, так как его характеристики зависят от степени экранирования его информационных обмоток окружающим материалом корпуса двигателя и температуры в контролируемой зоне. Оптические преобразователи на основе кварцевого стекла сохраняют работоспособность при высоких рабочих температурах, имеют сравнительно небольшие габариты, просты в эксплуатации, обладают высокой чувствительностью и быстродействием, нечувствительны к электромагнитным помехам, однако подвержены загрязнению оптической системы, контактирующей с рабочей средой внутреннего тракта турбомашин [2]. Радиоволновые датчики свободны от вышеперечисленных недостатков, однако обладают большей инерционностью по сравнению с оптоэлектронными преобразователями. Таким образом, для работы в сложных условиях тракта турбоагрегата лучше всего подходят оптоэлектронные и радиоволновые датчики.

Эффективность работы контрольно-измерительной аппаратуры главным образом определяется методикой измерения. Способы измерения крутильных колебаний лопаток турбоагрегатов с помощью оптических систем развиваются с 70-х годов прошлого века. Одним из первых был предложен метод бесконтактного измерения параметров колебаний лопаток [3]. Сущность бесконтактного дискретно-фазового метода состоит в том, что относительные перемещения лопаток измеряются в отдельные моменты времени. Принцип работы устройств, реализующих бесконтактное измерение параметров колебаний лопаток турбомашин, основан на способе определения временных интервалов при прохождении периферийного сечения лопатки между первым и вторым периферийными датчиками в зависимости от динамически изменяющегося деформационного состояния лопатки. Крутильные колебания лопатки сопровождаются поворотом ее периферийного сечения, что определяет возникновение разницы в величинах амплитуды перемещений входной и выходной кромок лопатки. Угол поворота периферийного сечения лопатки определяют, опираясь на разницу между перемещениями входной и выходной кромок лопатки, найденных по временным интервалам между парами импуль-

сов, полученных от корневого датчика и первого периферийного датчика и от корневого и второго периферийного датчика. Одновременное измерение временных интервалов между парами импульсов: корневой датчик – периферийный датчик передней кромки и корневой датчик – периферийный датчик задней кромки, – позволяет определить перемещение входной и выходной кромок.

Применение дискретно-фазового метода имеет ограничения связанные с дискретностью поступления информации, которая зависит от скорости вращения ротора. Если лопатка осуществляет колебания с частотой кратной частоте вращения ротора, то временные интервалы на каждом обороте ротора будут одинаковыми, т.е. отклонения не будут регистрироваться преобразователем. Кроме этого при использовании данного метода необходимо учитывать погрешности, вносимые осевым перемещением торцов лопаток во время эксплуатации, вызванные колебаниями ротора или по причине нагревания и остывания корпуса турбины.

В 1998 году предложен способ определения деформации лопаток вращающегося колеса турбомшины [4], основанный на физическом принципе зависимости отражающих свойств поверхности материалов от качества их обработки и частоты электромагнитного излучения. Для реализации способа на торце периферийного сечения лопатки формируют диффузно и зеркально отражающие участки, расположенные последовательно друг за другом вдоль торца лопатки. Амплитуда импульсов, поступающих с выхода фотоприёмника, соответствующих зеркально отражённому потоку в несколько раз больше, чем амплитуда соответствующих диффузно отражённому потоку. Принцип измерения основан на определении временного интервала между серединами каждого импульса фотоприёмника. Измеренный временной интервал пропорционален величине деформации лопатки. Выходной сигнал вихретокового датчика, являющегося составной частью первичного комбинированного преобразователя, позволяет определять величину зазора между корпусом турбоагрегата и торцом лопатки. К недостаткам реализации такого способа можно отнести усложнение технологического процесса обработки торца лопатки при формировании на его поверхности диффузно и зеркально отражающих участков, а также согласование величин микронеровностей этих участков с длинами волн излучателей зондирующего потока.

В 2010 году Michael Twerdochib развил предложенную Заблоцким И.Е. идею контроля параметров колебаний лопаток с помощью волоконно-оптического датчика [5]. Первичный преобразователь представляет собой оптически

активное окно прямоугольной формы, содержащее линейно располагающиеся передающие и приёмные оптические волокна. Зондирующий поток источника освещения за счет передающих оптических волокон фокусируется на траекторию движения торцов лопаток. Торцы лопаток, проходя в зоне действия индикатрисы излучения зондирующего потока, отражают световой поток, который частично попадает на вход приёмных волокон, после чего направляется к фотоприёмнику. Осевая длина преобразователя прямоугольной формы позволяет регистрировать прохождение торцов лопаток от входной до выходной кромки. Дополнительно в схеме установлен корневой датчик, формирующий опорный сигнал за один период вращения ротора. Полученные данные о прохождении входной и выходной кромок торцов лопатки позволяют определить параметры крутильных колебаний лопаток на основе разницы между моментами прохождения обеих кромок для каждой лопатки за период вращения ротора в сочетании с известной шириной её входной кромки. Особая форма преобразователя позволяет не учитывать расположение преобразователя относительно узла деформации лопатки.

В 2015 году Michael Twerdochib усовершенствовал метод определения амплитуды, частоты и фазы колебания каждой лопатки в колесе на основе расчёта среднего времени прихода торцов лопаток [6]. В схему устройства введена цифровая камера, которая позволяет формировать серию изображений, фиксирующих прохождение периферийного сечения лопатки под датчиком. В качестве преобразователя используют жгут из оптических волокон и цифровую камеру. Ожидаемое время прибытия передней кромки лопатки указывает на начало режима съёмки, дополнительно излучается последовательность вспышек от источника света в направлении проходящей лопатки. Изображения проходящего колеблющегося торца лопатки формируются в цифровой камере при открытом затворе. Ожидаемое время отклонения задней кромки лопатки обозначает окончание режима съёмки. Совместное применение цифровой камеры и оптоэлектронного преобразователя позволяет компенсировать осевое перемещение лопатки.

Предложенный Michael Twerdochib способ контроля отклонения лопаток [6] был адаптирован Charles P. Gendrich для применения в эксплуатационных условиях турбоагрегата [7]. Предложенный способ отличается тем, что в активной области оптической камеры находится только выходная кромка торца лопатки. Далее осуществляется сравнение относительного положения торца лопатки на нескольких последовательных фотографиях во время вращения

ротора турбомашин. Последовательные временные изображения одного торца лопатки показывают относительное перемещение торца лопатки в активной зоне смотрового окна. При выходе отклонения торцов лопатки за пределы допустимых параметров формируется информационный сигнал.

В основу способа [8] контроля лопаток двигателя положен способ расчёта среднего времени прохождения торцом лопатки чувствительной области датчика. На основе корреляционного анализа данных фактических измерений, поступивших от каждого из двух преобразователей и опорных данных определяются пиковые значения корреляционной функции. При крутильных колебаниях торец лопатки поворачивается относительно оси узла деформации, поэтому происходит изменение толщины входной кромки лопатки, которое определяется изменением времени прохождения торцом лопатки чувствительной области датчика. Для вычисления параметра отклонения торца лопатки разницу между расчетным временем прохождения активной области датчика и фактическим временем прохождения умножают на текущую скорость вращения лопаток ротора. Применение данного метода позволяет фиксировать не только момент времени прохождения торцом лопатки датчика, но и анализировать изменение длительности импульса за временной интервал прохождения чувствительной области датчика.

Использование отражающих свойств поверхности при диагностике колебаний лопаток предлагается в способе [9]. Наличие штриховой упорядоченной поверхности позволяет с помощью одного преобразователя за один период вращения ротора получать информацию о параметрах текущих крутильных колебаний торца лопатки. Изменение длительности импульса, одной из трёх составляющих сигнала, полученного при отражении зондирующего потока от лопатки, свидетельствует об отклонении лопатки. На основе накопленной статистической информации, возможно определить амплитуду крутильных колебаний торца лопатки. Однако точность данного метода сильно зависит от наличия изгибных колебаний, совершаемых лопаткой, поскольку возникает неоднозначность информации о характере деформационных изменений.

Представленные в кратком обзоре методы бесконтактного измерения предоставляют информацию о параметрах колебаний лопаток турбоагрегата и отличаются быстродействием и экономичностью. Однако из большинства методов следует, что для получения достоверной и полной информации необходимо использовать несколько первичных преобразователей, расположенных в корпусе турбоагрегата. Увеличение

количества датчиков ведет к увеличению установочных отверстий, что отрицательно сказывается на прочности конструкции корпуса турбоагрегата в целом.

В связи с возрастанием требований к расширению функциональных возможностей и повышению точности измерительной аппаратуры контроля деформационных параметров лопаток турбоагрегатов возникает необходимость в одновременном определении параметров изгибных и крутильных колебаний лопаток, поскольку в случае близости собственных изгибных и крутильных форм колебаний лопаток значительно возрастает опасность автоколебаний. Перспективным направлением решения данной задачи является применение в контрольно-измерительной аппаратуре комбинированных первичных преобразователей.

2 МЕТОД КОНТРОЛЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ЛОПАТОК

Характерным примером применения комбинированных преобразователей является способ контроля деформационного состояния лопаток турбоагрегатов. Для этого в корпусе турбоагрегата устанавливается комбинированный СВЧ-оптоэлектронный преобразователь, расположенный радиально относительно центра вращения лопаточного колеса, как показано на рис. 2.

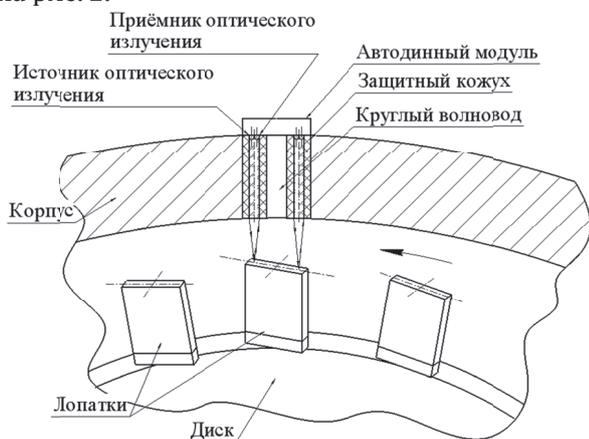


Рис. 2. Расположение комбинированного преобразователя в корпусе турбоагрегата

СВЧ преобразователь представляет совокупность автодинного модуля, выполненного на диоде Ганна, и излучающей системы, в виде круглого волновода. Ось диаграммы направленности излучения датчика ориентирована перпендикулярно торцу контролируемой лопатки. При перемещении лопатки в активной зоне датчика в цепи питания автодинного преобразователя возникают импульсы тока, амплитуда которых пропорциональна изменению зазора

между приемно-передающим элементом и контролируемой поверхностью. Величина зазора между приемно-передающим элементом и торцом контролируемой лопатки связана с амплитудой автодинного сигнала соотношением:

$$\xi = k U,$$

где ξ – зазор между приемно-передающим элементом и торцом контролируемой лопатки;

U – амплитуда автодинного импульса;

k – дифференциальная крутизна амплитудной характеристики автодина;

СВЧ преобразователь, входящий в состав комбинированного преобразователя позволяет контролировать величину зазора между ППЭ и торцом лопатки. Контроль данного параметра позволяет провести селекцию изгибных и крутильных деформаций: в том случае, когда зазор между ППЭ и торцом контролируемой лопатки равен установочному, лопатка подвергается воздействию только чисто крутильных колебаний.

Излучающая система оптоэлектронного преобразователя состоит из двух световодов (датчик 1 и датчик 2), расположенных параллельно стенкам круглого волновода, как показано на рис. 2. В результате активная зона оптоэлектронного преобразователя ограничивается двумя окружностями, как показано на рис. 3.

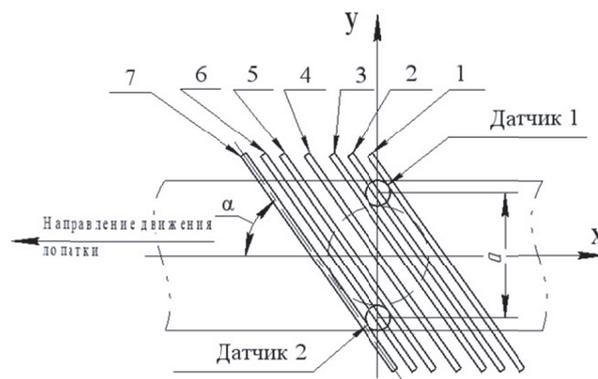


Рис. 3. Характерные моменты перемещения лопатки в активной зоне комбинированного преобразователя с двумя датчиками

На рисунке 3 представлено расположение приемно-передающего элемента первичного преобразователя в декартовой системе координат, начало отсчета, которой совпадает с центром лопаточного колеса, и отмечены характерные положения лопатки в активной зоне датчика. В момент времени, когда торец лопатки находится вне активной зоны датчика, сигнал на выходе оптоэлектронного преобразователя равен нулю.

В процессе вращения диска, лопатка переходит в положение 1, которое соответствует моменту входа входной кромки лопатки в активную зону датчика 1, в результате на выходе

оптоэлектронного преобразователя наблюдается нарастающий фронт сигнала, пока лопатка не перейдет в положение 2. Затем, наблюдается спад уровня сигнала, до момента, пока лопатка переходит в положение 3, которое соответствует выходу входной кромки из активной зоны. Таким образом, на выходе датчика 1 формируется информационный импульс, по наличию которого регистрируется момент пребывания лопатки в активной зоне первого излучателя.

В положение 4 лопатка находится вне активной зоны обоих излучателей и характеризуется нулевым уровнем информационного сигнала.

Аналогично, положение 5 соответствует моменту входа выходной кромки лопатки в активную зону датчика 2, положение 6 соответствует пребыванию торца лопатки в активной зоне датчика 2, а положение 7 – выходу выходной кромки из активной зоны.

Для дальнейшей обработки информационный сигнал подвергается компарированию. Временная диаграмма сформированного компаратором сигнала на выходе оптоэлектронного преобразователя, соответствующая его взаимодействию с торцом лопатки представлена на рис. 4.

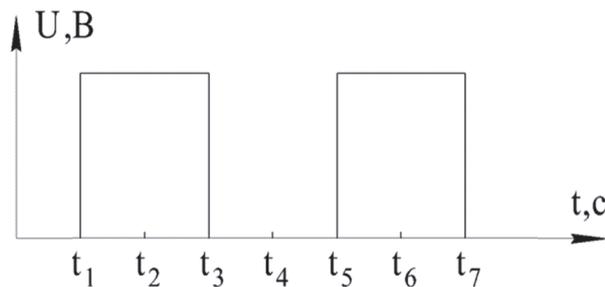


Рис. 4. Сигнал на выходе двухканальной оптоэлектронной части комбинированного преобразователя

При отсутствии крутильных колебаний торца лопатки длительность сигнала $\tau_1 = t_5 - t_1$, полученного при отражении зондирующего потока от контролируемой поверхности, будет постоянной. Если крутильные колебания присутствуют, длительность сигнала будет изменяться за каждый оборот ротора. Если частота вращения ротора во много раз превышает частоту крутильных колебаний лопаток справедливо соотношение:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\omega_B (R + L) \tau_1}{a},$$

где a – расстояние между оптоэлектронными датчиками по оси y ;

α – угол поворота лопатки;

R – радиус диска лопаточного колеса;

L – длина лопатки;

ω_B – циклическая частота вращения ротора;

Расположение оптоэлектронных преобразователей, представленное на рисунке 2, позволяет получить информацию о параметрах крутильных колебаниях лопаток. Методом статистического накопления собирается информация о дискретных фазах крутильных колебаний лопаток за счетное количество оборотов ротора. Затем из массива данных выбираются моменты времени τ_{MIN} и τ_{MAX} , соответствующие минимальному α_{MIN} и максимальному α_{MAX} углам поворота лопатки. Амплитуда крутильных колебаний определяется выражением:

$$\Theta_K = \frac{\alpha_{MAX} - \alpha_{MIN}}{2}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оптоэлектронные преобразователи активно используются для контроля крутильных колебаний лопаток. Перспективным направлением, позволяющим повысить функциональные возможности первичных преобразователей и выделить их в отдельный класс, является совместное использование оптоэлектронного и СВЧ преобразователей. Однако в настоящее время не существует детальной проработки способов реализации контроля деформационного состояния лопаток с помощью комбинированных преобразователей, что, безусловно, требует дополнительных исследований в этой области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шанявский А.А. Безопасное усталостное разрушение элементов авиаконструкций: синергетика в инженерных приложениях: Монография. Уфа, 2003. 803 с.
2. Данилин А.И. Бесконтактные измерения деформационных параметров лопаток в системах контроля и управления турбоагрегатами. Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2008. 218 с.
3. Заблоцкий И.Е., Коростелев Ю.А. Бесконтактные измерения колебаний лопаток турбомашин. М.: Машиностроение, 1977. 160 с.
4. А.с. 1450531 СССР, МКИЗ G 01 B 11/16. Способ определения деформации лопаток вращающегося колеса турбомашин и устройство для его осуществления/ В.А. Медников, А.И. Данилин. № 3982094/25-28; заявл. 29.11.85; опубл. 18.02.98, Бюл. № 33.-2 с.
5. Michael Twerdochib. Method and apparatus for monitoring blade vibration with a fiber optic ribbon probe: Patent US 2010/0076703 A1. 2010.
6. Michael Twerdochib. Apparatus to measure blade vibration in a turbine engine based on series of images exposed by an imager in response to a sequence of illumination bursts: Patent US 9014460 B2. 2015.
7. Clifford Hatcher, Jr., Raymond S. Nordlund. Optical based system and method for monitoring turbine

- engine blade deflection: Patent US 9708927 B2. 2017
8. Charles P. Gendrich. Monitoring one or more turbine engine rotor blades by correlating measurement data and reference data as a function of time: Patent US 9512736 B2. 2016.
9. Бояркина У.В., Щелоков Е.А. Оптоэлектронный

способ определения параметров крутильных колебаний лопаток ГТД // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций». Самара: Издательство СНЦ, 2015. С.11-13.

COMBINED TRANSDUCERS FOR MONITORING PARAMETERS OF TORSIONAL VIBRATIONS OF BLADES OF TURBINE

© 2018 U. V. Boyarkina, A. A. Gretskov, S. A. Danilin, E. E. Dudkina

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

The paper deals with optoelectronic systems that provide control of the deformation state of loaded blades of turbine units. A brief analysis of the primary converters for the implementation of the discrete-phase method. The realization of the combined optoelectronic microwave Converter for determining the parameters of torsional vibration of blades, which allows to minimize the level of preparation of the turbine unit body, is proposed. A method for determining the amplitude of torsional vibrations using a combined Converter is proposed.

Keywords: vane, torsional oscillations, an optoelectronic Converter, UHF Converter, turbocharger.

Ulyana Boyarkina, Postgraduate Student at the Radio-Engineering Department. E-mail: uvbojarkina@yandex.ru

Andrey Gretskov, Candidate of Technics, Associate Professor at the Radio-Engineering Department.

E-mail: greckov1989@rambler.ru

Sergey Danilin, Postgraduate Student at the Radio-Engineering Department. E-mail: sad1st07@yandex.ru

Elena Dudkina, Postgraduate Student at the Radio-Engineering Department. E-mail: staku@rambler.ru