

ДИСКРЕТНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОК ТУРБОАГРЕГАТОВ

© 2011 А. И. Данилин, В. М. Гречишников

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Рассматривается новый класс измерительных преобразователей, предназначенных для контроля угловых и линейных перемещений торцов лопаток турбомашин, реализующих дискретно-фазовый метод. Особенностью преобразователей является определение дискретных фаз колебательного движения лопаток первичным преобразователем, в котором конструктивно и функционально интегрированы объект контроля, источник и приёмник зондирующего излучения оптического или радиоволнового диапазона.

Турбоагрегат, лопатки, дискретно-фазовый метод, дискретно-фазовые преобразователи перемещений.

Обеспечение высокой надёжности вращающихся узлов (ВУ) изделий машиностроения, в первую очередь различных энергетических установок (ЭУ) на базе турбоагрегатов, увеличение их эксплуатационного ресурса, снижение эксплуатационных расходов и эксплуатация по техническому состоянию обуславливают потребность в информации о фактическом, реальном состоянии нагруженных элементов ВУ. По этой причине оказывается востребованной разработка эффективных автоматизированных средств диагностики и длительного контроля состояния элементов вращающихся силовых узлов ЭУ, которое, в свою очередь, определяется динамической совокупностью линейных и угловых перемещений этих элементов. Примерами таких перемещений могут являться: статическая закрутка и крутильные колебания валов мощных электродвигателей и электрогенераторов, роторов турбин и компрессоров, статический изгиб и раскрутка, изгибные и крутильные колебания лопаток турбоагрегатов и др.

Среди прочих контролируемых узлов особо выделяются лопатки турбоагрегатов, которые с точки зрения механических динамических нагрузок являются наиболее ответственными

элементами многих ЭУ. Автоматизированный контроль угловых и линейных перемещений (УЛП) ВУ ЭУ в настоящее время осуществляется в основном с помощью устройств, реализующих дискретно-фазовый метод измерения (ДФМ) [1]. Сущность ДФМ основана на преобразовании дискретных значений (фаз) перемещений, определяемых в пределах периода каждого оборота $T_{об}$ ВУ, в пропорциональные временные интервалы Δt_i , длительности которых подвергаются статистической обработке на интервале $T \gg nT_{об}, n \gg 1$, n – число оборотов ротора ВУ, соответствующее интервалу статистического накопления, в результате чего определяются $\Delta t_{max} \sim y_{max}$, $\Delta t_{min} \sim y_{min}$ и $\Delta t_{cp} \sim y_{cp}$, где y_{max} , y_{min} , y_{cp} – максимальное, минимальное и среднее значения контролируемого перемещения за время накопления (усреднения).

Для формирования временных интервалов в известных разработках используются минимум два датчика, один из которых расположен внутри ЭУ, а другие – снаружи. Как показывает практика, установка внутреннего датчика требует глубокого препарирования ЭУ из-за необходимости установки дополнительных крепёжных, токосъёмных и других

конструктивных элементов, что снижает надёжность как устройства контроля, так и ЭУ в целом.

В то же время в связи с возрастанием требований к точности и достоверности контроля перемещений ВУ ЭУ возникает необходимость в создании нового поколения устройств, которые в силу специфики построения и методики использования целесообразно выделить в самостоятельный класс средств измерений – дискретно-фазовые преобразователи перемещений (ДФПП). Особенность преобразователей данного класса заключается в том, что значения дискретных фаз перемещений формируются с помощью расположенного в технологическом отверстии корпуса ЭУ одно – или двухканального первичного преобразователя, в котором конструктивно и функционально интегрированы объект контроля, источник и приёмник зондирующего излучения (ЗИ) оптического или радиоволнового диапазона. Такое конструктивное решение позволяет обеспечить получение необходимой информации при минимальном уровне препарирования ЭУ (используется лишь одно технологическое отверстие в корпусе Ø 8-10 мм), что не оказывает сколько-нибудь заметного влияния на прочность конструкции ЭУ в целом.

Проведённый анализ научно-технической и патентной информации показал, что комплексные исследования технических возможностей ДФПП динамически нагруженных ВУ ЭУ до сих пор не проводились, что препятствует их широкому использованию в процессе доводки, испытаний и технической эксплуатации различных изделий машиностроения.

Рассмотрено два направления. Первое – это устройства эксплуатационного контроля предельных перемещений, предназначенные для постоянной и продолжительной работы в составе турбомашин. Для его реализации используется диагностический признак дефектного состояния лопатки –

изменение взаимного перемещения её торца в лопаточном венце [1] по мере развития дефекта в условиях действия на лопатку как статических, так и динамических нагрузок. Структурная схема устройства контроля предаварийных (предельных) перемещений торцов лопаток на базе ДФПП представлена на рис. 1.

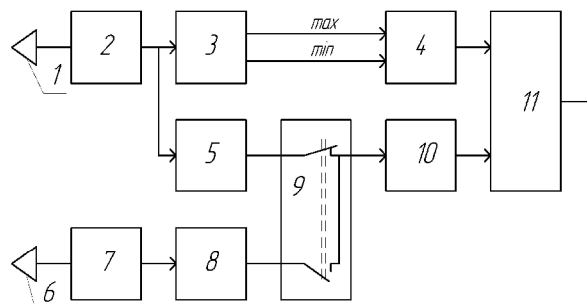


Рис. 1. Структурная схема устройства диагностирования дефектных лопаток турбоагрегатов на базе ДФПП

Периферийный датчик 1, установленный в корпусе турбоагрегата над траекторией движения торцов лопаток, генерирует электрические сигналы взаимодействия с торцами лопаток. Временные интервалы τ_i между прямоугольными импульсами формирователя 2, соответствующие окружному шагу между торцами лопаток, преобразуются в цифровой код в блоке 3. В этом же блоке из N текущих оборотов ротора определяются величины максимальных и минимальных значений для каждого шага. Полученные экстремальные значения каждого межлопаточного интервала поступают в блок 4, где определяется значение τ_{si} каждого шага в соответствии с выражением: $\tau_{si} = (\tau_{imax} + \tau_{imin}) / 2$. Кроме этого, прямоугольные импульсы с формирователя 2 поступают в блок 5, где временные интервалы τ_i суммируются за N оборотов ротора и находится средний за N оборотов период вращения ротора:
$$T_s = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^K \tau_{ij}.$$
 Если техническая реализация турбоагрегата позволяет установить датчик 6 оборотной метки

ротора, то его электрические сигналы преобразуются формирователем 7 в прямоугольные импульсы, которые поступают в блок 8, в котором определяется средний период вращения ротора за N оборотов: $T_s = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N T_j$.

Полученные значения T_s в блоке 10 делятся на количество лопаток K в колесе, и определяется средний шаг по колесу за N оборотов ротора: $\tau_s = T_s / K$.

Определённые таким образом τ_{si} и τ_s сравниваются между собой в блоке 11 сравнения. Если τ_s отличается от τ_{si} на некоторую пороговую величину Δ , то на выходе блока 11 генерируется сигнал о возникновении дефекта в одной или нескольких лопатках.

Определение амплитуд колебаний лопаток осуществляется следующими двумя способами. Первый, когда в процессе контроля первичный преобразователь ДФПП фиксирует моменты прохождения возле него торцов лопаток. В этом случае определяются усреднённые амплитуды колебаний пар лопаток, следующих друг за другом в лопаточном венце. Отсутствие датчика оборотов и оборотной метки не позволяет осуществлять привязку измерений к конкретной паре лопаток лопаточного венца. С другой стороны, при построении устройств – сигнализаторов предаварийных деформаций лопаток – на основании амплитудного критерия важно выделить наличие превышения амплитуды колебаний некоторой предельной величины, после чего должен быть сгенерирован сигнал тревоги. Поэтому некоторое уменьшение функциональных возможностей подобных сигнализаторов [2] даёт выигрыш в надёжности и стоимостных характеристиках подобных ДФПП.

В следующем варианте реализации способа определения амплитуд колебаний лопаток [3] вводится в рассмотрение датчик оборотов, который позволяет идентифицировать конкретную лопатку относительно оборотной метки и

осуществлять синхронизацию измерений по отношению к конкретному и постоянному месту ротора. Такая привязка позволяет определять фазовые компоненты колебательного перемещения каждой лопатки, увеличивать точность контроля информативных параметров посредством исключения взаимного влияния на результат измерения временных положений соседних лопаток и, кроме этого, идентифицировать номера дефектных лопаток.

Второе направление – это создание ДФПП-2 для проведения экспериментальных стендовых исследований лопаточных колёс с целью получения полной объективной информации о перемещениях лопаток. ДФПП-2, позволяющий контролировать угловые перемещения торцов лопаток, расширяет функциональные возможности классического ДФМ за счёт увеличения чувствительности при определении угловых перемещений на высших формах колебаний лопаток и локальных процессах, обусловленных кромочными или пластиночными высокочастотными колебаниями. ДФПП-2 реализован в оптическом диапазоне длин волн.

Способы реализации ДФПП-2 разделяются на две группы. В способах первой группы на торцах лопаток формируют зеркально и диффузно отражающие участки, причём их расположение может быть как поперечным, так и продольным относительно торца лопатки (табл. 1). В способах второй группы измеряют величину микронеровностей h на торцах готовых лопаток и выбирают соответствующие излучатели и фотоприёмники.

При определении угловых перемещений лопаток в соответствии со способами первой группы используют светопроводящую систему (СПС) для направления зондирующего излучения на траекторию движения торцов лопаток. Как правило, СПС представляет собой разновидность V-образных световодов, общий конец которых в виде приёмно-

Таблица 1

Основные структурные схемы для реализации ДФПП-2			
Расположение отражающих участков		Разноволновые источники излучения	Комбинированное использование ОЭП-ВТП
Продольное	Поперечное		

передающего коллектора (ППК) устанавливается в корпусе турбоагрегата. Первый конец СПС подключается к источнику излучения, а второй – к фотоприёмнику.

В зависимости от поперечной или продольной ориентации диффузно и зеркально отражающих участков, выполненных на торцах лопаток, используются различные схмотехнические реализации, позволяющие выделить и сформировать информационные и опорные сигналы. Затем измеряется временной интервал между серединами опорного и информационного импульсов, который и является величиной, пропорциональной величине углового положения торцов лопаток.

При определении деформаций в соответствии со способами второй группы ППК СПС также устанавливается в корпусе турбомшины. Первые два свободных конца СПС подключаются к источникам излучения с $\lambda_1 \approx 8h$ и $\lambda_2 \approx h$, соответственно. Поток излучения с ППК попадает на торцы лопаток и отражается от них: один с длиной волны λ_1 – зеркально, второй с длиной волны λ_2 – диффузно. Вторые два свободных конца СПС подключаются к селективным фотоприёмникам, имеющим максимальную спектральную чувствительность, соответственно при λ_1 и λ_2 . Селективные фотоприёмники выделяют диффузно и зеркально отражённые потоки излучения, которые затем преобразуются в

электрические измерительные и опорные сигналы, временной интервал между которыми является искомым информативным параметром.

В Самарском государственном аэрокосмическом университете к настоящему времени разработаны нестандартные компьютеризированные системы диагностики и средства контроля вращающихся элементов ЭУ, построенные на основе ДФПП. Предложены и апробированы конструктивные и схмотехнические решения, реализованные в устройствах контроля УЛП лопаток турбомашин, позволившие решить ряд важнейших задач, а именно:

- получение информации об УЛП динамически нагруженных элементов вращающихся узлов турбоагрегатов, необходимой для прогнозирования остаточного ресурса, например лопаточных аппаратов ГТД, и оптимизирования сроков проведения их ремонтов с продлением межремонтного периода эксплуатации;

- снижение трудоёмкости общей эксплуатации турбоустановок путём проведения восстановительно-ремонтных работ на стадии раннего определения увеличения УЛП торцов лопаток при развитии в них дефектов;

- обнаружение предельно допустимых УЛП торцов лопаток турбоагрегатов и предотвращение в связи с этим аварийных ситуаций, связанных с лопаточными поломками.

Библиографический список**References**

1. Данилин, А.И. Критерии дискретно-фазового контроля рабочего состояния лопаток и их реализуемость в системах автоматического управления турбоагрегатами [Текст] / А.И. Данилин, А.Ж. Чернявский // Вест. Самар. гос. аэрокосм. ун-та. – 2009. – №1(17). – С. 107-115.
2. Пат. 2177145 Российская Федерация, МПК⁷ G 01 H 1/08. Сигнализатор предаварийных деформаций лопаток турбомашин [Текст] / Данилин А.И., Чернявский А.Ж.; заявл. 29.03.00; опубл. 20.12.01, Бюл. № 35. – 4с.
3. Пат. 2341781 Российская Федерация, МПК⁷ G 01 H 11/06. Способ измерения амплитуды колебаний лопаток турбомашин и устройство для его осуществления [Текст]/ Данилин А.И., Чернявский А.Ж., Адамов С.И.; заявл. 05.02.07; опубл. 20.12.08, Бюл. № 35. – 7с.

1. Danilin, A.I. Criteria for discrete-phase control of working conditions of blades and their implementability in the turbo-units automated control systems [Text] / A.I. Danilin, A.G. Chernyavskiy // Vestnik of Samara State Aerospace University. – 2009. – №1(17). – PP. 107-115.
2. Patent 2177145 Russian Federation, International Class G 01 H 1/08. Signalling device of pre-failure deformations of turbomachine blades [Text] / Danilin A.I., Chernyavskiy A.G.; filed 29.03.00; published 20.12.01, bulletin № 35. – 4p.
3. Patent 2341781 Russian Federation, International Class G 01 H 11/06. Method of measuring amplitude vibration of turbomachine blades and device for its realization [Text]/ Danilin A.I., Chernyavskiy A.G., Adamov S.I.; filed 05.02.07; published 20.12.08, bulletin № 35. – 7p.

DISCRETE-PHASE MOVEMENT TRANSDUCERS FOR THE DETERMINATION OF TURBINE BLADE VIBRATION PARAMETERS

© 2011 A. I. Danilin, V. M. Grechishnikov

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

A new class of measuring transducers is described. They are intended to control angular and linear blade tip movements of turbounits. These transducers use the discrete-phase method (blade tip timing) and their special feature is the determination of discrete blade vibration phases by the primary transducer in which the object of the control, the source and the receiver of the probe radiation of either optical or radiofrequency range are constructively and physically integrated.

Turbounit, blades, discrete-phase method, blade tip timing, discrete-phase movement transducers.

Информация об авторах

Данилин Александр Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), aidan@ssau.ru. Область научных интересов: измерительные системы, разработка методов и электронной аппаратуры для определения параметров эксплуатационного состояния лопаток турбоагрегатов.

Гречишников Владимир Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), gv@ssau.ru. Область научных интересов: измерительные системы, разработка методов и электронной аппаратуры для определения параметров эксплуатационного состояния лопаток турбоагрегатов.

Danilin Alexander Ivanovich, candidate of technical sciences, associate professor of the radio engineering and medical diagnostic systems department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), aidan@ssau.ru. Area of research: developing methods and designing electronic equipment for determining parameters of turbine-unit blade operating condition.

Grechishnikov Vladimir Mikhaylovich, doctor of technical sciences, professor, head of the electrical engineering department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), gv@ssau.ru. Area of research: developing methods and designing electronic equipment for determining parameters of turbine-unit blade operating condition.