

ДОПЛЕРОВСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ВРАЩАЮЩИХСЯ УЗЛОВ ЭНЕРГОАГРЕГАТОВ

© 2012 А. И. Данилин, А. А. Грецков

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

Предлагаются методики определения параметров колебаний элементов вращающихся узлов энергоагрегатов радиолокационным доплеровским методом, основанные на данных, полученных с помощью дискретно-фазовых преобразователей перемещений.

Энергоагрегат, лопатки, доплеровский радиолокационный метод, дискретно-фазовый метод.

Обеспечение высокой надёжности вращающихся узлов изделий машиностроения, в первую очередь 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 вращающихся элементов. По этой причине оказывается востребованной разработка эффективных автоматизированных средств диагностики и контроля состояния элементов вращающихся силовых узлов ЭУ, которое в свою очередь определяется статическими и динамическими угловыми и линейными перемещениями (УЛП) этих элементов. Примерами УЛП являются: 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. [1].

Реализованным на практике методом как оперативного, так и длительного контроля состояния элементов ВУ ЭУ является бесконтактный дискретно-фазовый метод (ДФМ). Однако внедрение известного классического метода дискретно-фазовых измерений сдерживается как на штатных, так и на экспериментальных ЭУ вследствие необходимости выполнения глубокого препарирования энергоагрегата для установки датчиков в его внутреннем тракте. Установка внутренних датчиков требует монтажа дополнительных крепёжных, токосъёмных и других конструктивных элементов, что сни-

жает надёжность как устройства контроля, так и ЭУ в целом. Кроме того, классический ДФМ имеет существенный недостаток, связанный с резким уменьшением чувствительности при измерении локальных УЛП, обусловленных высшими формами колебаний элементов вращающихся узлов энергетических установок. В то же время в связи с возрастанием требований к точности и достоверности контроля перемещений элементов вращающихся узлов (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 (ПП), в котором конструктивно и функционально интегрированы источник и приёмник зондирующего излучения (ЗИ) оптического или радиоволнового диапазона и электронные узлы первичной обработки сигналов. 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.

Среди множества способов реализации ДФМ особый интерес представляет доплеровский метод измерения параметров колебаний элементов ВУ ЭУ, например, лопаток турбоагрегатов, основанный на измерении доплеровского смещения частоты сигнала, отражённого от контролируемой поверхности. Он позволяет провести многопараметровую оценку и измерение характеристик колебательно-деформационного состояния лопаток, а именно, амплитуды, частоты и фазовых соотношений колебательных процессов лопаток, величины статической деформации, формы колебаний лопаток и некоторых других.

Измерение перемещений доплеровским методом широко используется в различных научно-технических областях. Например, в ультразвуковом диапазоне эффект Доплера используют в медицине и дефектоскопии. Однако указанный частотный диапазон не позволяет получить удовлетворительную точность при измерении перемещений элементов ВУ энергоагрегата в связи с высокой скоростью вращения его ротора. Использование доплеровского метода в оптическом диапазоне волн позволяет исключить этот недостаток. Однако использование оптических преобразователей для определения параметров перемещений лопаток турбоагрегатов в эксплуатационном режиме затруднительно вследствие быстрого загрязнения оптической системы (оптически-активного окна), контактирующей с рабочей средой внутреннего тракта турбомашин.

Свободным от этих недостатков является доплеровский радиолокационный метод, работающий в СВЧ диапазоне. Также следует отметить, что одним из главных достоинств данного метода остаётся минимальный уровень препарирования энергоагрегата для установки датчиков, так как имеется возможность использования автодинных преобразователей СВЧ сигнала.

К настоящему времени известно применение радиоволнового доплеровского измерителя для контроля скорости вращения валов судовых дизельных двигателей, роторов турбин. Располагая доплеровские измерительные датчики скорости вращения на противоположных концах вала или ротора двигательной установки, можно в реальном

времени определять их мгновенные скорости [2]. Сравнивая измеренные скорости вращения отдельных частей ротора или вала, можно судить о параметрах их крутильных колебаний. Регистрация крутильных колебаний в широком частотном диапазоне обеспечивает для энергетического оборудования возможность контроля задеваний “ротор-статор”, идентификацию и принятие решений об аварийной защите при межвитковых коротких замыканиях в обмотках генераторов, позволяет сделать выводы о надёжности механической трансмиссии, анализировать причины колебаний нагруженных валопроводов. Таким образом, бесконтактный радиолокационный доплеровский метод все шире внедряется в практику определения технического состояния энергетических объектов.

В качестве характерного примера конкретной реализации предлагаемого способа можно рассмотреть определение параметров колебаний лопаток турбомашин. Для этого в корпусе турбоагрегата устанавливается неподвижный бесконтактный датчик, выполненный в виде автодинного СВЧ преобразователя. Данный преобразователь, реализованный на диоде Ганна [3], обладает малыми потребляемой мощностью и инерционностью. Поэтому он является перспективным для построения систем управления и контроля параметров и характеристик элементов подвижных узлов турбоагрегата. Ось диаграммы направленности излучения датчика ориентирована перпендикулярно геометрической оси периферийной части плоскости пера контролируемой лопатки. При перемещении лопатки мимо датчика в выходном сигнале датчика появляется частотно-модулированная доплеровская составляющая, обусловленная движением лопатки. Известно, что доплеровская частота на выходе автодинного преобразователя определяется выражением

$$f_D(t) = \frac{2f_o}{c} V \cos(\alpha), \quad (1)$$

где f_o - рабочая частота генерации автодинного преобразователя, c - скорость света; V - мгновенная линейная скорость периферийной части поверхности лопатки; α - угол между осью диаграммы направленности датчика и направлением движения объекта.

В силу конструктивных особенностей установки датчика контролируемая лопатка находится в зоне видимости датчика непродолжительное время по сравнению с шагом лопаток, поэтому можно принять $\alpha \approx 0^0$.

При вращении лопаточного колеса мгновенная скорость периферийной части поверхности пера лопатки и, соответственно, доплеровская частота складываются из двух составляющих, первая из которых обусловлена круговым движением торца лопатки вследствие вращения лопаточного колеса, а вторая обусловлена колебательными перемещениями пера лопатки:

$$\omega_D = \omega_{DR} + \omega_{DL},$$

где ω_D - доплеровское приращение частоты;

ω_{DR} - доплеровская составляющая, обусловленная круговым движением торца лопатки;

ω_{DL} - доплеровская составляющая, обусловленная колебаниями пера лопатки;

Определим диапазон доплеровских частот для лопаточного колеса со следующими параметрами: радиус колеса $R = 0,45\text{ м}$, длина лопатки $L = 0,05\text{ м}$, диапазон частот вращения вала ΔF_0 от 8Гц до 167Гц, частота колебаний лопатки $f_{DR} = 200\text{ Гц}$. Частота генерации автодинного СВЧ преобразователя $f = 30\text{ ГГц}$.

Тогда в соответствии с [3] доплеровская частота определяется по формуле:

$$f_D = \frac{2\Delta F_0(R+L)f_0}{c}.$$

Для турбоагрегата с перечисленными выше параметрами получают следующие значения: доплеровское приращение частоты на минимальных и максимальных оборотах двигателя, обусловленное вращением вала, $f_{ДВ\text{мин}} = 800\text{ Гц}$ и $f_{ДВ\text{макс}} = 16700\text{ Гц}$, соответственно; доплеровское приращение частоты, обусловленное колебанием пера лопатки, $f_{ДЛ} = 2000\text{ Гц}$.

Считая в первом приближении, что лопатка совершает гармонические колебания, движение её торца будет описываться формулой [3]:

$$x(t) = A \sin(\Omega t + \varphi), \quad (2)$$

где A - амплитуда колебаний торца лопатки, Ω - частота колебаний пера лопатки,

φ - начальная фаза колебаний пера лопатки.

Поскольку в реальных турбоагрегатах доплеровская частота, вызванная окружным движением торца лопатки вследствие вращения ротора турбомашин, имеет порядок нескольких десятков килогерц, а доплеровское приращение, вызванное колебательным движением пера лопатки, имеет порядок единиц килогерц, то выходной сигнал автодинного преобразователя, в первом приближении, можно считать квазигармоническим. Тогда полная фаза выходного сигнала будет определяться выражением:

$$\Psi(t) = \int_0^t \omega_D(t) dt = \omega_{DR}t + A \frac{2\omega_0}{c} \sin(\Omega t + \varphi).$$

Поэтому аналитическое выражение информационного сигнала после ограничения по амплитуде для устранения паразитной амплитудной модуляции принимает следующий вид:

$$S(t) = A_0 \cos \left[\omega_{DR}t + A \frac{2\omega_0}{c} \sin(\Omega t + \varphi) \right].$$

Полученный сигнал можно рассматривать как модулированный по частоте, причём доплеровская частота, обусловленная круговым движением торца лопатки ω_{DR} , связана прямо пропорционально с частотой вращения ротора турбомашин ω_R :

$$\omega_{DR} = \frac{2\omega_0}{c} V_R = \frac{2\omega_0}{c} R\omega_R = M\omega_R,$$

где R - радиус лопаточного колеса.

Поэтому, если при синхронном детектировании информационного сигнала в качестве опорной частоты использовать величину $M \cdot \omega_R$, то из сигнала $S(t)$ выделяется компонент, содержащий в своём составе параметры колебательного движения лопатки:

$$u(t) \approx A_0 \frac{2\omega_0}{c} \sin(\Omega t + \varphi) = Ak \sin(\Omega t + \varphi).$$

Следовательно, выходной сигнал синхронного детектора содержит информацию о начальной фазе, частоте и амплитуде колебаний лопатки.

Структурная схема устройства для определения фазы, частоты и амплитуды колебаний лопаток вращающегося колеса турбомашин приведена на рис. 1 и содержит:

- автодинный СВЧ преобразователь 1, установленный в корпусе турбомашин 2;

- блок 3 регистрации отражённого сигнала;
- усилитель-ограничитель 4;
- синхронный детектор 5 и амплитудный детектор 6;
- аналоговый компаратор 7;
- возбудитель 8 оборотной метки, установленный на роторе или диске лопаточного колеса;
- импульсный оборотный датчик 9, установленный на неподвижной детали турбомашины напротив траектории движения возбудителя 8;
- формирователь 10 импульсов оборотной метки;
- блок 11 преобразования временного интервала в аналоговое напряжение;
- управляемый генератор 12;
- аналогово-цифровой преобразователь 13;
- микроконтроллер 14.

Микроконтроллер является выходным блоком устройства и позволяет получать, запоминать, обрабатывать по определённому алгоритму входную информацию, хранить и выдавать конечную информацию в необходимом для пользователя виде, отображая полученные результаты на экране монитора.

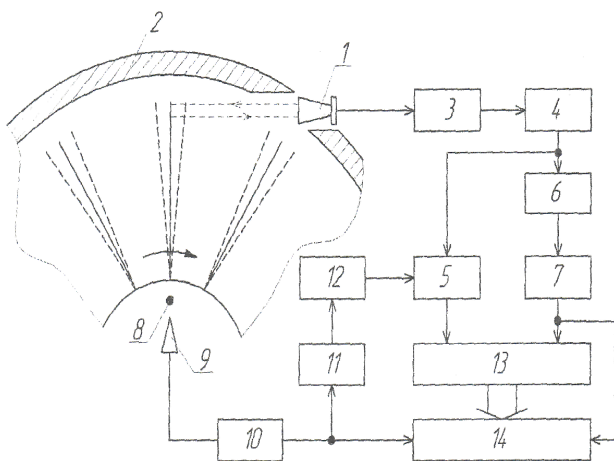


Рис. 1. Структурная схема доплеровского измерителя фазы, частоты и амплитуды колебаний лопаток турбомашин

Устройство работает следующим образом: автодинный преобразователь 1, установленный в корпусе 2 турбомашины, генерирует СВЧ излучение, направленное на периферийную часть плоскости пера лопатки. Отражённое от плоскости пера лопатки из-

лучение воздействует на активный элемент автодинного преобразователя 1 и меняет его энергетические параметры. Эти изменения регистрируются блоком 3 регистрации отражённого сигнала таким образом, что выделяется частотно модулированный сигнал доплеровской частоты на его выходе (рис. 2, сигнал S_1), содержащий в своём составе частоту, обусловленную круговым движением лопатки, и составляющую, обусловленную колебательным движением лопатки.

Далее этот сигнал поступает на вход усилителя-ограничителя 4, где происходит его усиление и ограничение по амплитуде, в результате чего устраняется паразитная амплитудная модуляция (рис. 2, сигнал S_2). Ограниченный по амплитуде сигнал поступает на входы синхронного детектора 5 и амплитудного детектора 6. Для формирования синхронизирующих импульсов, соответствующих конкретным лопаткам, сигнал с выхода амплитудного детектора 6 поступает на аналоговый компаратор 7, с выхода которого снимаются прямоугольные импульсы (рис. 2, сигнал S_3), каждый из которых соответствует конкретной лопатке в колесе.

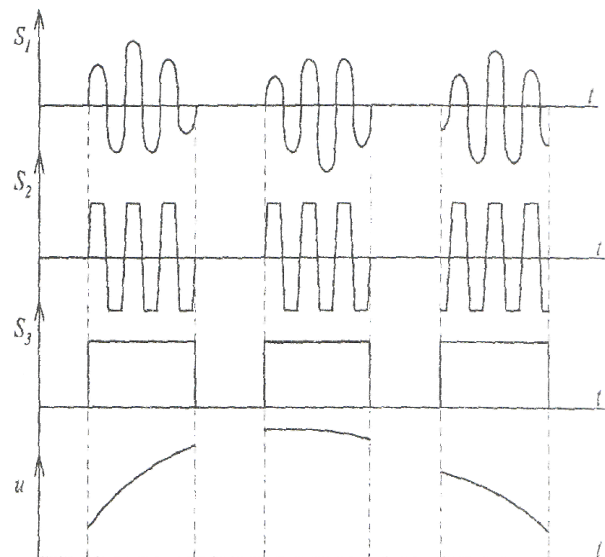


Рис. 2. Временные диаграммы работы устройства

Оборотная метка 8, установленная на диске лопаточного колеса, проходя возле импульсного датчика 9, формирует на его выходе сигнал взаимодействия, который подается на формирователь 10 оборотной мет-

ки. Сформированный по амплитуде и длительности прямоугольный импульс далее поступает на вход блока 11 преобразования временного интервала (периода вращения ротора турбомашин) в управляющее напряжение, которое затем подаётся на управляющий вход управляемого генератора 12 и изменяет частоту на его выходе пропорционально частоте вращения ротора турбоагрегата. Выходные колебания управляемого генератора 12, всегда с частотой пропорциональной частоте вращения ротора турбомашин и являющиеся опорными для синхронного детектирования, поступают на второй вход синхронного детектора 5. В результате синхронного детектирования формируется выходное напряжение (рис. 2, сигнал u), отображающее закон колебательного движения лопатки в течение времени существования (приёма) отражённого излучения от конкретной лопатки, причём параметры этого напряжения содержат информацию о фазе, частоте и амплитуде колебаний лопаток.

Далее напряжение с выхода синхронного детектора подаётся на информационный вход аналого-цифрового преобразователя 13, а на его вход синхронизации поступают прямоугольные импульсы с компаратора 7. Аналого-цифровой преобразователь 13 производит преобразование выходного аналогового напряжения синхронного детектора в цифровой код с привязкой к конкретной лопатке колеса в соответствии с синхронизирующими импульсами компаратора 7. Информационный цифровой код с выхода АЦП 13, прямоугольные импульсы с формирователя 10 оборотной метки и синхронизирующие импульсы с компаратора 7 поступают на соответствующие разряды входного интерфейса микроконтроллера.

В соответствии с алгоритмом работы микроконтроллера осуществляется привязка оцифрованного напряжения синхронного детектора к текущему времени за счёт внутреннего таймера и по синхронизирующим импульсам компаратора 7 определяется номер конкретной лопатки колеса в привязке к оборотной метке. Кроме этого, в микроконтроллере реализуется алгоритм аналитического определения частоты, фазы и амплитуды колебаний лопаток по трём выборкам,

взятым через равные промежутки времени, из оцифрованного сигнала синхронного детектора.

В качестве примера обработки сигнала с синхронного детектора рассмотрим два метода определения параметров колебаний лопаток.

При работе энергоагрегата лопатка находится в активной зоне датчика некоторый промежуток времени. Таким образом, на выходе синхронного детектора существует информационный сигнал, изображённый на рис. 3.

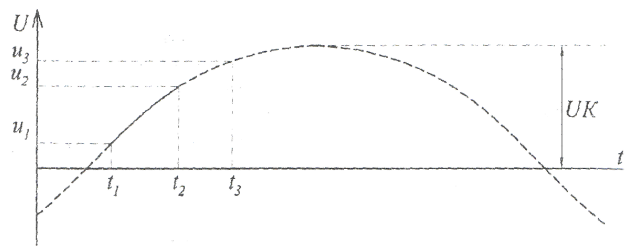


Рис. 3. Сигнал на выходе синхронного детектора

Данный сигнал в течение времени $t_1 \dots t_3$ является фрагментом движения $u(t)$ некоторой конкретной лопатки. При этом в момент времени t_1 на выходе частотного детектора будет сформировано напряжение u_1 , в момент времени t_2 это напряжение равно u_2 , в момент времени t_3 напряжение равно u_3 .

Выберем равные промежутки времени $t_2 - t_1 = t_3 - t_2 = \tau$. Амплитуда колебания лопатки A с учётом коэффициентов преобразования измерительной системы равна

$$A = UK,$$

где U - амплитуда доплеровского сигнала, K - коэффициент преобразования измерительной системы. Эти величины можно связать системой уравнений

$$\begin{cases} u_1 = UK \sin(\Omega t_1 + \varphi), \\ u_2 = UK \sin(\Omega(t_1 + \tau) + \varphi), \\ u_3 = UK \sin(\Omega(t_1 + 2\tau) + \varphi). \end{cases}$$

В результате получаем систему уравнений с неизвестными U , Ω и φ , решениями которой будут параметры информационного сигнала.

Решив данную систему уравнений, получим

$$\cos(\Omega\tau) = \frac{u_1 + u_3}{2 \cdot u_2} = P.$$

Таким образом, частота колебаний лопатки определяется аналитическим выражением

$$\Omega = \frac{1}{\tau} \arccos\left(\frac{u_1 + u_3}{2u_2}\right) = \frac{1}{\tau} \arccos(P).$$

Для определения начальной фазы можно исходить из соотношения:

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{UK \sin[\Omega(t_1 + \tau) + \varphi]}{UK \sin(\Omega t_1 + \varphi)},$$

$$\frac{u_2}{u_1} = \cos(\Omega\tau) + \frac{\sin(\Omega\tau)}{\operatorname{tg}(\Omega t_1 + \varphi)} = \delta.$$

Отсюда

$$\operatorname{tg}(\Omega t_1 + \varphi) = \frac{\sin(\Omega\tau)}{\delta - \cos(\Omega\tau)} = \frac{\sqrt{1 - P^2}}{\delta - P}.$$

В результате начальная фаза колебаний лопатки определится формулой

$$\varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{\sqrt{1 - P^2}}{\delta - P}\right) - \frac{t_1}{\tau} \arccos(P).$$

Амплитуда колебаний лопатки определяется выражением

$$\begin{aligned} A &= \frac{u_1}{\sin(\Omega t_1 + \varphi)} = \\ &= \frac{u_1}{\sin\left(\frac{t_1}{\tau} \arccos(P) + \operatorname{arctg}\left(\frac{\sqrt{1 - P^2}}{\delta - P}\right) - \frac{t_1}{\tau} \arccos(P)\right)} = \\ &= \frac{u_1}{\sin\left(\operatorname{arctg}\left(\frac{\sqrt{1 - P^2}}{\delta - P}\right)\right)} = \frac{u_1}{\sqrt{(\delta - P)^2 + 1 - P^2}}. \end{aligned}$$

Коэффициент преобразования измерительной системы K определяется опытным путём при калибровочных измерениях.

Таким образом, изначальная функциональная достаточность доплеровского метода ставит его в ряд перспективных разработок по исследованию характеристик энергонагруженных объектов.

Главной особенностью данного метода является точная аналитическая зависимость параметров колебаний лопаток от значений доплеровского приращения частоты.

При выполнении алгоритма аналитического определения параметров колебаний лопаток необходимо наложить ограничения,

позволяющие исключить появление неопределённостей типа деления на ноль либо проводить дополнительный анализ таких ситуаций.

Свободным от этого недостатка является второй метод, позволяющий определять амплитуду и перемещения лопатки.

Во время вращения лопаточного колеса под воздействием центробежных и аэродинамических сил лопатка начинает совершать колебательные движения. Считая в первом приближении, что лопатка совершает гармонические колебания, движение её торца будет описываться выражением (2). Колеблющаяся во время вращения ротора лопатка обладает максимальной кинетической энергией, которая описывается выражением

$$W_K = \frac{mV^2}{2},$$

где m - масса лопатки;

V - максимальная скорость движения лопатки.

Потенциальная энергия лопатки при упругих деформациях под воздействием центробежных и аэродинамических сил будет определяться формулой

$$W_{II} = \frac{kA^2}{2},$$

где k - коэффициент упругости лопатки.

Для колеблющихся тел выполняется закон сохранения полной механической энергии, по которому максимальная кинетическая энергия переходит в энергию упругой деформации [3]:

$$\begin{aligned} W_K &= W_{II}, \\ \frac{mV^2}{2} &= \frac{kA^2}{2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Определим из формулы (3) амплитуду колебаний лопатки:

$$A = V \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (4)$$

Выразив скорость V из формулы (1) и подставив в выражение (4), получим:

$$A = \frac{f_{D_{\max}} c}{2f_0} \sqrt{\frac{m}{k}}, \quad (5)$$

где $f_{D_{\max}}$ - максимальное приращение доплеровской частоты.

Подставив в выражение (5) зависимость доплеровского приращения частоты от

времени $f_D(t)$, получим закон перемещений лопатки во времени:

$$x(t) = \frac{f_D(t)c}{2f_0} \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Коэффициент упругости для каждой лопатки определяется экспериментально. Для этого к торцу лопатки прикладывается сила F и измеряется амплитуда отклонения оси нагруженной лопатки A_0 от оси лопатки находящейся в статическом состоянии. Тогда коэффициент упругости определяется по формуле [5]:

$$k = \frac{F}{A_0}.$$

Следует отметить, что модель второго метода определения параметров колебаний лопаток является упрощённой, так как не учитывает разные линейные скорости боковой поверхности лопатки и распределение массы лопатки. Тем не менее, она позволяет наглядно представить реализацию способа определения амплитуды колебаний лопаток. В дальнейшем, уточнив характеристики параметров модели, можно будет повысить точность определения амплитуды колебаний лопаток. В настоящее время не существует детальной проработки способов реализации радиолокационного доплеровского метода. Модели, создаваемые для описания формирования доплеровских сигналов, не учитывают взаимные зависимости излученной и отражённой электромагнитных волн автотинных систем. Это приводит к тому, что сигнал в общем виде становится негармоническим даже при движении отражающей поверхности с постоянной скоростью. Не исследованы метрологические характеристики доплеровских измерителей параметров колебаний лопаток турбоагрегатов, не выявлены причины, влияющие на точность подобных измерительных устройств.

Задачи, которые приходится решать при этом, связаны с обработкой коротких

сложномодулированных колебаний и выделений из них информационных составляющих. Существующие методики и классические аналоговые схемы детектирования подобных сигналов принципиально ограничены временем накопления и усреднения получаемой информации, внутренними инерционностями активных элементов. Переход к быстродействующим цифровым системам требует разработки новых алгоритмов цифровой фильтрации (вейвлет-анализ) протекающих процессов и оценке их эффективности. Возможно применение к решению подобных задач корреляционной теории обработки информационных сигналов.

Библиографический список

1. Заблоцкий, И.Е. Бесконтактные измерения колебаний лопаток турбомашин [Текст] / И.Е. Заблоцкий, Ю.А. Коростелёв, Р.А. Шипов. - М.: Машиностроение, 1977. - 160 с.
2. Воротопин, С.Д. Автотинные датчики КВЧ-диапазона и устройства на их основе [Текст] / С.Д. Воротопин, В.И. Юрченко // Электронная промышленность.-1998. -№1-2. -С. 110-115.
3. Данилин, А.И. Бесконтактные измерения деформационных параметров лопаток в системах контроля и управления турбоагрегатами [Текст] / А.И. Данилин. - Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2008. -218с.
4. Пат. 2207523 Российская Федерация, МПК G01H11/06. Способ определения колебаний лопаток вращающегося колеса турбомашин и устройство для его осуществления [Текст]/ Данилин А.И., Чернявский А.Ж.; заявл. 24.10.01; опубл. 27.06.03, Бюл. № 18. - 4с.
5. Трофимова Т.И. Курс физики [Текст] / Т.И. Трофимова. - М.: Академия, 2006. - 560 с.

DOPPLER METHOD FOR MEASURING FLUCTUATIONS OF ELEMENTS ROTATIONG PARTS POWER

© 2012 A. I. Danilin, A. A. Gretskov

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

Proposed methodology for determining the oscillation parameters of elements rotating parts power units radar Doppler method, based on data obtained using a discrete phase displacement transducers that implement discrete-phase method.

Power unit, blades, Doppler radar method, discrete-phase method.

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). E-mail: aidan@ssau.ru. Область научных интересов: измерительные системы, разработка методов и электронной аппаратуры для определения параметров эксплуатационного состояния лопаток турбоагрегатов.

Грецков Андрей Александрович, инженер, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: greckov1989@rambler.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). E-mail: aidan@ssau.ru. Area of research: developing methods and designing electronic equipment for determining parameters of turbine-unit blade operating condition.

Gretskov Andrey Aleksandrovich, electronics engineer, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: greckov1989@rambler.ru. Area of research: developing methods and designing electronic equipment for determining parameters of turbine-unit blade operating condition.