

АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ СИГНАЛА ДОПЛЕРОВСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

© 2016

А. И. Данилин доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, aidan@ssau.ru

А. А. Грецов аспирант кафедры радиотехники, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, greckov1989@rambler.ru

В статье рассматриваются основные информационные особенности анализа выходного сигнала доплеровского преобразователя, позволяющие экспериментально определять параметры колебаний элементов вращающихся узлов энергоагрегатов. Представлен доплеровский дискретно-фазовый метод, имеющий меньше ограничений по сравнению с классическим дискретно-фазовым методом. Приведено теоретическое обоснование формирования выходного сигнала доплеровского преобразователя при его бесконтактном взаимодействии с поверхностью контролируемого объекта (рассматриваются характерные информационные участки выходного сигнала). На примере осциллограмм, полученных при проведении экспериментальных исследований, проведён анализ формы выходного сигнала вблизи его экстремальных значений при наличии и отсутствии колебаний контролируемого объекта. Рассматриваются отличительные особенности выходного сигнала, обусловленные вращением ротора и колебательным движением поверхности контролируемой лопатки.

Энергоагрегат; лопатки; доплеровский дискретно-фазовый метод; преобразователь.

Цитирование: Данилин А.И., Грецов А.А. Анализ информационных особенностей сигнала доплеровского преобразователя динамических перемещений // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 3. С. 170-177. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-170-177

Одним из перспективных методов определения параметров колебаний лопаток турбоагрегата является доплеровский дискретно-фазовый метод (ДДФМ), позволяющий определять деформационное состояние каждой лопатки рабочего колеса турбоагрегата в условиях ограниченного препарирования, т.е. при использовании одного периферийного датчика. Суть данного метода заключается в определении доплеровского смещения частоты сигнала, отражённого от контролируемой поверхности, и соответствующей интерпретации полученных значений в области механических напряжений и деформаций [1].

Принципиально возможности классического ДФМ [2] ограничиваются возможностями восстановления информационной функции по результатам её измерения при дискретных значениях аргумента. У всех реально существующих турбомашин конструктивные соотношения таковы, что частота вращения ротора всегда ниже наименьшей частоты собственных колебаний лопаток [2]. Поэтому при измерениях параметров колебаний лопаток нельзя воспользоваться классическим дискретным способом измерения с использованием отсчётов одного датчика в соответствии с теоремой Котельникова, поскольку частота дискретизации будет ниже наименьшей частоты колебаний лопаток. Однако использование априорной информации о динамических характеристиках перемещений, таких как максимальная и минимальная скорость движения лопатки, смена направления движения лопатки и т. д., позволяет решить данную проблему посредством статистической обработки информации, накопленной за несколько периодов вращения лопаточного колеса.

Целью работы является выявление информационных компонентов в доплеровском сигнале, позволяющих определить параметры перемещений контролируемого объекта.

При реализации ДДФМ предпочтение отдаётся автодинным преобразователям из-за их малых габаритов, виброустойчивости и простоте конструктивного исполнения. Кроме этого, при автодинном построении датчиков обеспечивается реализация в одном функциональном узле одновременно функции передатчика, приёмника, отражённого от объекта излучения и преобразователя с усилением полезного сигнала [3]. Формирование автодинного отклика связано и объясняется влиянием отражённого от контролируемой поверхности сигнала на режим работы автодинного преобразователя.

В корпусе энергоагрегата устанавливается первичный автодинный преобразователь (рис. 1), приёмно-передающий элемент (ППЭ) которого генерирует зондирующее СВЧ-излучение, направленное на поверхность контролируемого объекта.

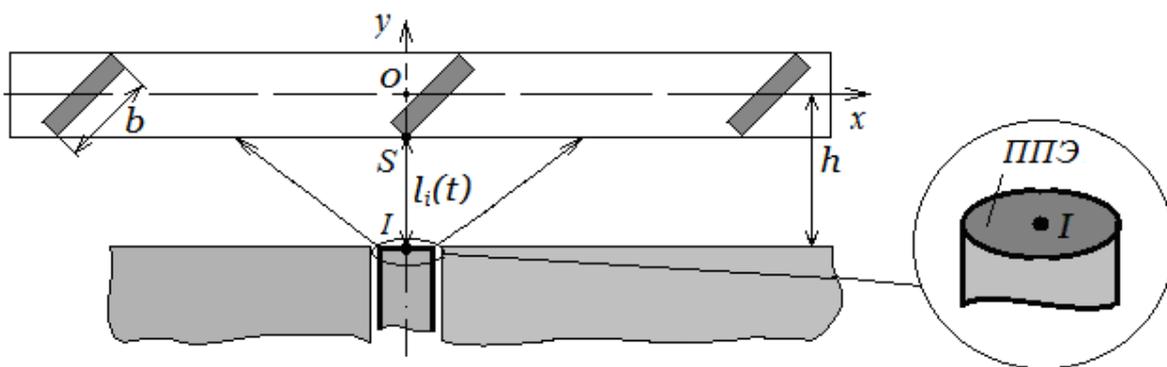


Рис. 1. Схема установки первичного преобразователя в корпусе экспериментальной установки

Излучённый зондирующий сигнал $u(t)$ определяется выражением:

$$u(t) = A_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где A_0, ω_0, φ_0 , – амплитуда, частота и начальная фаза сигнала, излучаемого первичным преобразователем.

Зондирующее излучение достигает поверхности контролируемой лопатки и, отражаясь от неё, частично поступает на приёмник излучения. Принятый после отражения от контролируемой поверхности сигнал $u_c(t)$ определяется выражением:

$$u_c(t) = A_c(t) \sin(\omega_0(t - \tau(t)) - \varphi_0), \quad (1)$$

где $A_c(t)$ – амплитуда сигнала, принятого первичным преобразователем; $\tau(t)$ – время запаздывания сигнала при распространении до контролируемого объекта и обратно, которое определяется по формуле:

$$\tau(t) = \frac{2l(t)}{c}, \quad (2)$$

где $l(t)$ – изменяющееся во времени расстояние, пройденное электромагнитной волной до торца контролируемого объекта и обратно; c – скорость электромагнитной волны в вакууме.

Частота зондирующего излучения связана со скоростью его распространения в пространстве:

$$\omega_0 = \frac{2\pi c}{\lambda}, \quad (3)$$

где λ – длина волны зондирующего излучения.

Подставив (2) и (3) в (1), выражение принятого сигнала преобразуем к виду:

$$u_c(t) = A_c(t) \sin\left(\omega_0 t - \varphi_0 - \frac{4\pi l(t)}{\lambda}\right). \quad (4)$$

При использовании приёмно-передающего элемента для излучения и приёма сигналов на активный элемент автодина воздействует сумма излучённого и принятого сигналов $u_p(t)$:

$$u_p(t) = u(t) + u_c(t), \quad (5)$$

$$u_p(t) = \sqrt{A_0^2 + A_c^2(t) + 2A_0A_c(t)\cos\left(2\varphi_0 + \frac{4\pi l(t)}{\lambda}\right)} \sin(\omega_0 t + \varphi),$$

$$\varphi = \arctg\left[\frac{A_0 \sin(\varphi_0) - A_c(t) \sin\left(\varphi_0 + \frac{4\pi l(t)}{\lambda}\right)}{A_0 \cos(\varphi_0) + A_c(t) \cos\left(\varphi_0 + \frac{4\pi l(t)}{\lambda}\right)}\right].$$

После нелинейного преобразования сигналов в автодине на его выходе формируется амплитудная составляющая сигнала $u_s(t)$, пропорциональная перемещениям контролируемого объекта:

$$u_s(t) = \sqrt{A_0^2 + A_c^2(t) + 2A_0A_c(t)\cos\left(2\varphi_0 + \frac{4\pi l(t)}{\lambda}\right)}.$$

Амплитудная составляющая выходного автодинного сигнала $u_s(t)$ раскладывается в ряд по формуле Тейлора и приводится к виду:

$$\sqrt{1+x} \approx 1 + \frac{x}{2}, x \in [-1;1],$$

$$u_s(t) \approx \sqrt{A_0^2 + A_c^2(t)} + \frac{A_0A_c(t)}{\sqrt{A_0^2 + A_c^2(t)}} \cos\left(2\varphi_0 + \frac{4\pi l(t)}{\lambda}\right). \quad (6)$$

Первое слагаемое в (6) соответствует постоянной составляющей сигнала и устраняется при последующей аппаратной обработке. При условии, что амплитуда излучённого сигнала во много раз превышает амплитуду принятого сигнала ($A_0 \gg A_c(t)$) и начальная фаза сигнала $\varphi_0 = 0$, в цепи питания автодина регистрируются колебания, которые в первом приближении можно считать квазигармоническими:

$$u_s(t) \approx A_c(t) \cos\left(\frac{4\pi l(t)}{\lambda}\right). \quad (7)$$

Таким образом, в результате бесконтактного взаимодействия доплеровского автодинного преобразователя с поверхностью контролируемого объекта (лопатки) в цепи питания автодина возникают пульсации тока, частота которых пропорциональна перемещениям, которые совершает лопатка.

Определение параметров динамических перемещений лопатки далее будет рассматриваться в прямоугольной системе координат с началом отсчёта в точке O – точке пересечения оси ротора с плоскостью лопаточного колеса (рис. 2).

В плоскости ППЭ лежит точечный источник зондирующего излучения (точка I , рис. 1), которое может быть представлено пучком лучей. Один из этих лучей зондирующего излучения пересекает середину ребра лопатки в точке S , координаты которой можно определить по выражениям:

$$\begin{aligned} x_S &= \left(R + \frac{L}{2}\right) \cos(\omega_R t + \varphi_R), \\ y_S &= A_V \sin(\omega_V t + \varphi_V), \\ z_S &= \left(R + \frac{L}{2}\right) \sin(\omega_R t + \varphi_R), \end{aligned} \quad (8)$$

где R – радиус лопаточного колеса (рис. 2); L – длина лопатки (рис. 2); b – ширина лопатки (рис. 1); ω_R , φ_R – соответственно частота и начальная фаза вращения лопаточного колеса; h – расстояние от приёмно-передающей плоскости до плоскости лопаточного колеса (рис. 1); A_V , ω_V , φ_V – соответственно амплитуда, частота и начальная фаза колебаний лопатки.

Координаты источника зондирующего излучения I определяются выражениями:

$$\begin{aligned} x_I &= 0, \\ y_I &= -h - 0,35b, \\ z_I &= R + \frac{L}{2}. \end{aligned} \quad (9)$$

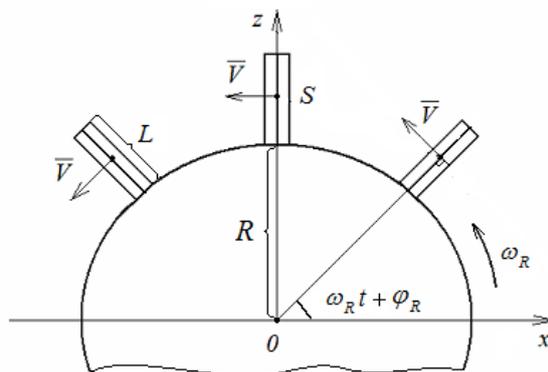


Рис. 2. Расположение лопаточного колеса в прямоугольной системе координат

Путь, пройденный лучом, пересекающим контролируемую поверхность в точке S , определится выражением:

$$l(t) = \sqrt{(x_s - x_I)^2 + (y_s - y_I)^2 + (z_s - z_I)^2}. \quad (10)$$

С учётом координат источника излучения выражение (10) принимает вид:

$$l(t) = \sqrt{(y_s - y_I)^2 + 2 \left(R + \frac{L}{2}\right)^2 - 2 \left(R + \frac{L}{2}\right)^2 \sin(\omega_R t + \varphi_R)}. \quad (11)$$

На основании выражения (11) построены графики изменения пути, пройденного зондирующим лучом от источника излучения до лопатки и обратно в процессе её движения (рис. 3). При построении графиков использовались следующие параметры имитирующего лопаточного колеса: $R = 123$ мм, $L = 20$ мм, $b = 20$ мм, $h = 7,5$ мм, $\omega_R = 100\pi \frac{\text{рад}}{\text{с}}$, $\varphi_R = 0$, $A_V = 0,4$ мм, $\omega_V = 120\pi \frac{\text{рад}}{\text{с}}$.

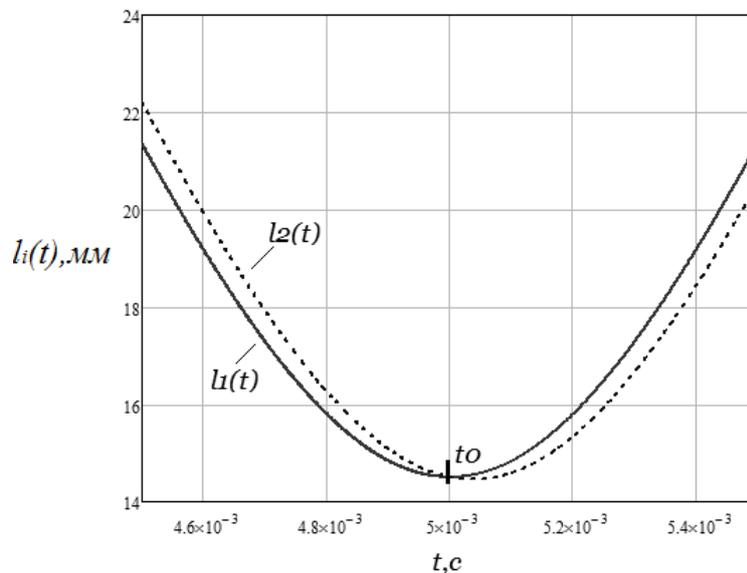


Рис. 3. Изменение расстояния, пройденного зондирующим лучом от источника излучения до лопатки и обратно:

$l_1(t)$ – при отсутствии колебаний; $l_2(t)$ – при наличии колебательного движения лопатки

При отсутствии колебаний лопатки минимальное расстояние, пройденное зондирующим лучом, достигается в момент времени t_0 (рис.3), когда точки I и S находятся на одной прямой, перпендикулярной к ППЭ. До этого момента времени лопатка приближается к датчику и полная фаза сигнала монотонно убывает. После прохождения временного момента t_0 лопатка начинает удаляться от датчика и полная фаза сигнала начинает монотонно расти. Поскольку траектория движения лопатки симметрична относительно плоскости XOY , то график на рис. 3 тоже симметричен. Если же присутствуют колебания лопатки, то возникает асимметрия относительно точки t_0 .

Для варианта расположения датчика, показанного на рис. 2, расстояние от датчика до колеблющейся лопатки с учётом (11) определяется выражением:

$$l(t_0) = h + 0,35b + A_v \sin(\omega_v t_0 + \varphi_v).$$

Это означает, что в момент времени t_0 полная фаза сигнала не зависит от составляющей перемещения, обусловленной вращательным движением лопатки, и в полной фазе сигнала будет присутствовать только колебательная составляющая перемещения:

$$u_s(t) = kA_c(t)A_0 \cos \left[\frac{4\pi(h + 0,35b + A_v \sin(\omega_v t_0 + \varphi_v))}{\lambda} \right].$$

На рис. 4 представлен нормированный по амплитуде выходной сигнал доплеровского преобразователя.

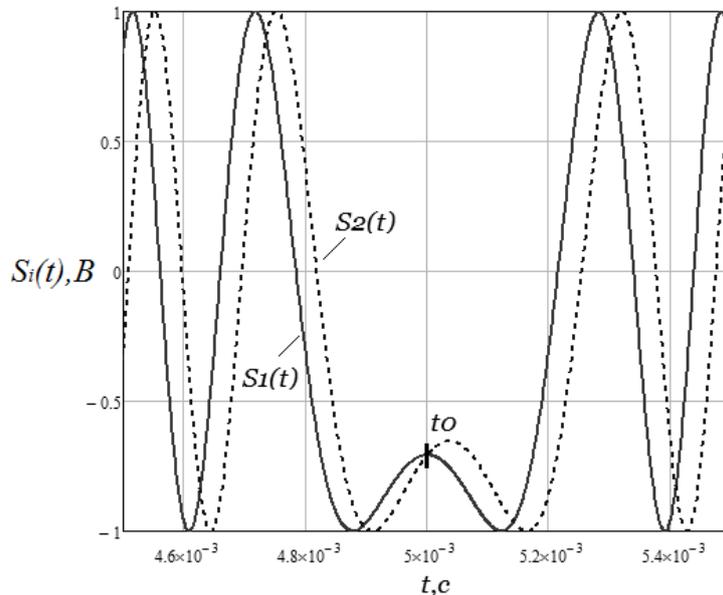


Рис. 4. Нормированный выходной сигнал доплеровского преобразователя:
 $s_1(t)$ – при отсутствии колебаний; $s_2(t)$ – при наличии колебательного движения лопатки

В сигнале имеется область с характерным провалом, обусловленным сменой направления движения лопатки и, как следствие, сменой знака скорости изменения полной фазы сигнала.

Для проверки правильности описания процессов формирования доплеровского информационного сигнала был проведён эксперимент, результаты которого представлены на рис. 5 в виде осциллограмм автодинных сигналов при отсутствии колебаний (а) и при наличии деформаций лопатки (б).

На экспериментальных осциллограммах (рис. 5) присутствуют области А и В с характерными пиковыми значениями сигнала. Следует отметить, что причиной сильной асимметрии сигнала на осциллограммах является разная интенсивность потока, отражённого от лопатки, так как её торцы имеют разную площадь.

Отсутствие вращательной составляющей движения лопатки в полной фазе выходного сигнала доплеровского преобразователя делает его пиковые области *A* и *B* (рис. 5) наиболее информативными для дальнейшего исследования с целью определения параметров колебаний лопаток.

Таким образом, в результате анализа выходного сигнала доплеровского преобразователя динамических перемещений установлено, что сигнал имеет область характерных изменений его формы при наличии колебательной составляющей в движении поверхности контролируемого объекта. Полученные результаты показывают, что величина наблюдаемых изменений в полной мере характеризуют параметры колебаний поверхности лопатки.

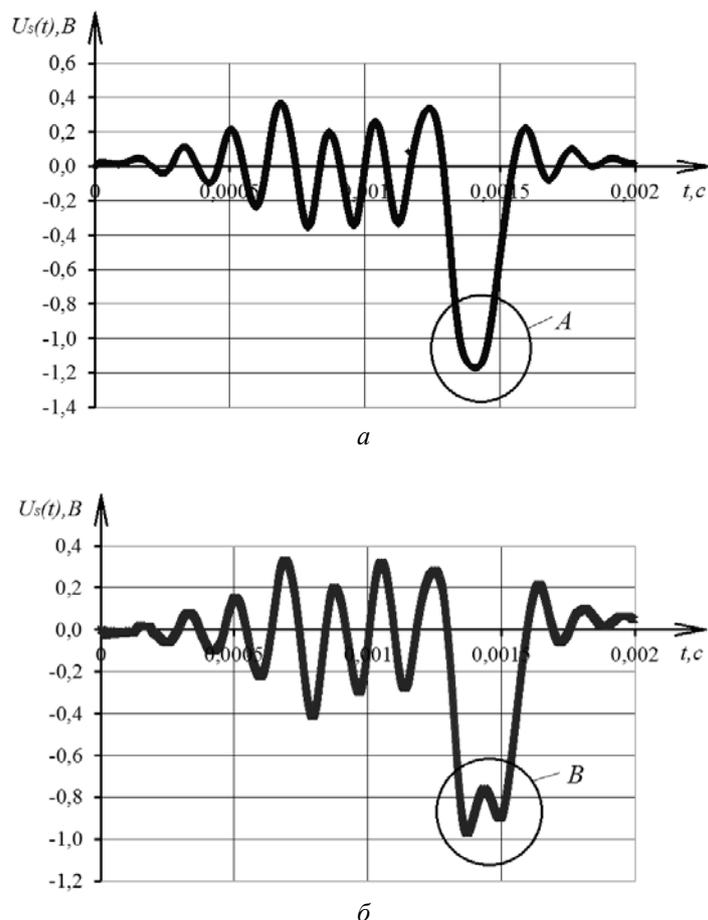


Рис. 5. Сигналы на выходе автодинного преобразователя: *a* – при отсутствии колебаний; *б* – при наличии деформаций лопатки

Библиографический список

1. Данилин А.И. Бесконтактные измерения деформационных параметров лопаток в системах контроля и управления турбоагрегатами. Самара: Самарский научный центр РАН, 2008. 217 с.
2. Заблоцкий И.Е., Коростелев Ю.А., Шипов Р.А. Бесконтактные измерения колебаний лопаток турбомашин. М.: Машиностроение, 1977. 159 с.
3. Носков В.Я., Смольский С.М. Регистрация автодинного сигнала в цепи питания генераторов и полупроводниковых диодов СВЧ (обзор) // Техника и приборы СВЧ. 2009. № 1. С. 14-26.

ANALYSIS OF INFORMATION CHARACTERISTICS OF A DYNAMIC DISPLACEMENT DOPPLER TRANSDUCER SIGNAL

© 2016

A. I. Danilin Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of Radio Engineering, Samara National Research University, Samara, Russian Federation, aidan@ssau.ru

A. A. Gretskov postgraduate student of the Department of Radio Engineering, Samara National Research University, Samara, Russian Federation, gretskov1989@rambler.ru

The article discusses the main features of the analysis of the Doppler transducer output signal that allow conducting experiments to determine the parameters of the oscillation of rotating elements of power units. A Doppler discrete-phase method that has fewer restrictions as compared to the classical discrete-phase method is presented. The theoretical rationale for the formation of the Doppler transducer output signal in the case of its non-contact interaction with the surface of the object under control (characteristic information sections of the output signal are considered) is presented. An analysis of the output waveform near its extreme values in the presence and absence of vibration of the controlled object is carried out using the waveforms obtained in conducting the pilot study as an example. Distinctive features of the output signal due to the rotation of the rotor and the vibrational motion of the surface of the blade controlled are discussed.

Power unit; blades; Doppler discrete-phase method; autodyne converter.

Citation: Danilin A.I., Gretskov A.A. Analysis of information characteristics of a dynamic displacement doppler transducer signal. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. V. 15, no. 3. P. 170-177. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-170-177

References

1. Danilin A.I. *Beskontaktnye izmereniya deformatsionnykh parametrov lopatok v sistemakh kontrolya i upravleniya turboagregatami* [Non-contact measurement of deformation parameters of blades in the systems of monitoring and control of turbine units]. Samara: Samarskiy Nauchnyy Tsentri RAN Publ., 2008. 217 p.
2. Zablotskiy I.E., Korostelev J.A., Shipov R.A. *Beskontaktnye izmereniya kolebaniy lopatok turbomashin* [Non-contact measurement of turbomachinery blade oscillation]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1977. 159 p.
3. Noskov V.Ya., Smolskiy S.M. Registration of an autodyne signal in the supply circuit of generators and UHF semiconductor diodes (review). *Tekhnika i pribory SVCh*. 2009. No. 1. P. 14-26. (In Russ.)