

УДК 531.767

## ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДОПЛЕРОВСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ЛОПАТОК ЭНЕРГОАГРЕГАТОВ

© 2013 А. И. Данилин, А.А. Грецов

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

Поступила в редакцию 02.12.2013

В статье представлены особенности математического моделирования параметров сигнала на выходе доплеровского преобразователя перемещений лопаток энергоагрегата и сравнение полученных результатов с экспериментальными данными.

Ключевые слова: математическая модель, лопатки, амплитуда, частота, энергоагрегат

Среди множества способов определения параметров колебаний вращающихся элементов энергоагрегатов особый интерес представляет доплеровский метод, основанный на измерении доплеровского смещения частоты сигнала, отраженного от контролируемой поверхности. Он позволяет провести многопараметровую оценку и измерение характеристик колебательно-деформационного состояния лопаток, а именно, амплитуды, частоты и фазовых соотношений их динамических перемещений, величины статической деформации, формы колебаний лопаток и некоторых других [1].

Для реализации доплеровского метода определения параметров колебаний вращающихся элементов наибольшее распространение получили автодинные преобразователи, благодаря малым габаритам, стоимости и простоте конструктивного исполнения. Принцип действия таких преобразователей основан на возмущении параметров автоколебаний СВЧ генератора под воздействием отраженного от объекта излучения, что вызывает также изменение постоянной составляющей тока или напряжения активного элемента. Кроме этого при автодинном построении датчиков обеспечиваются одновременно функции передатчика, приемника отраженного от объекта излучения и преобразователя с усилением полезного сигнала. В силу перечисленных достоинств широкое распространение получили радиоволновые автодинные первичные преобразователи СВЧ диапазона, в частности, реализованные на диодах Ганна, которые обладают малой потребляемой мощностью, высокой точностью и малой инерционностью [2].

*Данилин Александр Иванович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Радиотехника».*

*E-mail: aidan@ssau.ru*

*Грецов Андрей Александрович, аспирант кафедры «Радиотехника». E-mail: greckov1989@rambler.ru*

Наиболее простую конструкцию имеют автодинные преобразователи, регистрирующие сигнал в цепи питания генератора [3]. СВЧ излучение, отраженное от поверхности жестко закрепленной в колесе лопатки, воздействует на диод Ганна и изменяет его энергетические параметры, тем самым вызывая колебания тока в цепи его питания. Информационный сигнал в данном случае будет описываться уравнением:

$$s(t) = A(t) \sin(\omega_D \cdot t + \varphi_o),$$

где  $A(t)$ ,  $\omega_D$ ,  $\varphi_o$  – амплитуда, частота и начальная фаза информационного сигнала на выходе доплеровского преобразователя соответственно;

Рассмотрим особенности математического моделирования информационных изменений амплитуды, частоты и фазы выходного сигнала доплеровского преобразователя.

На рис. 1 представлена графическая модель системы для определения мощности информационного потока  $P_{нрм}$ , попадающего в приемник после отражения от поверхности лопатки, пересекающей при своем движении поток излучения доплеровского преобразователя [2].

Мощность информационного потока принятого приемником может быть определена по формуле:

$$P_{нрм} = P_{изл} \sum_{n=1}^j \sum_{i=1}^i P_{изл ij} \cdot P_{нрм ij},$$

где  $P_{изл}$  – мощность зондирующего излучения первичного преобразователя;

$P_{изл ij}$  – весовой коэффициент мощности излучения  $i$ -го луча  $j$ -го точечного излучателя;

$P_{нрм ij}$  – весовой коэффициент мощности принятого  $i$ -го луча  $j$ -го точечного излучателя;

В прямоугольной системе координат  $XYZ$  расположен приемно-передающий элемент доплеровского преобразователя, излучающая поверхность которого совпадает с плоскостью  $XOZ$ , а центр этой плоскости совпадает с началом отсче-

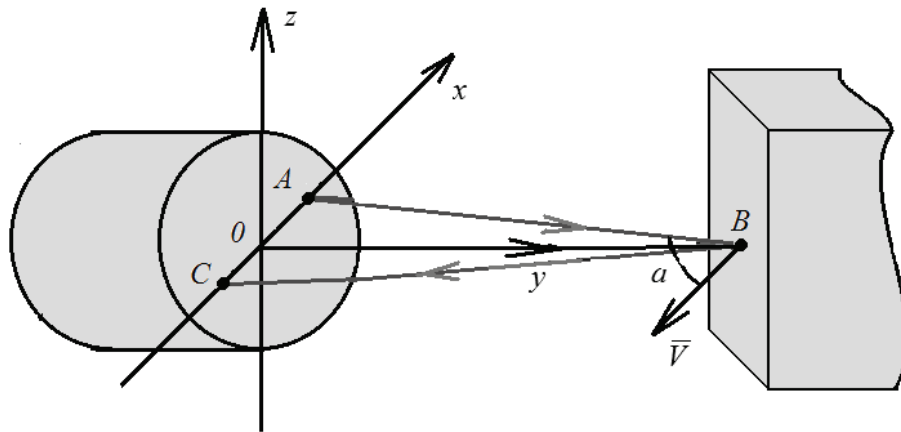


Рис. 1. Схема взаимодействия автодинного преобразователя с поверхностью лопатки

та. Излучаемый автодином поток представляется пучком лучей, который формируется совокупностью точечных излучателей, равномерно распределенных внутри круга радиуса  $r$ . Круг разбивается на кольца шириной  $\Delta$ , каждому кольцу соответствует весовой коэффициент интенсивности излучения, которое имеет нормальное распределение в плоскости доплеровского преобразователя. Таким образом формируется зондирующее излучение в направлении поверхности контролируемой лопатки. Поскольку геометрические размеры лопатки во много раз превышают размеры сформированного точечного излучателя, то можно воспользоваться аппаратом геометрической оптики для определения потока, отраженного от поверхности наблюдаемого объекта и попадающего на приемник [4].

Разбиение излучающей поверхности преобразователя на точечные источники представлено на рис. 2.

Луч, отраженный от поверхности наблюдаемого объекта, падает на активную зону приемника, которая также разбита на кольцевые участки с весовыми коэффициентами соответствующими распределению интенсивности принятого излучения в плоскости преобразователя.

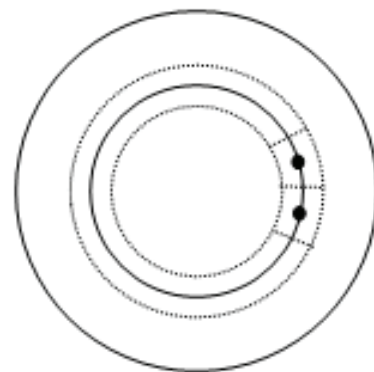


Рис. 2. Разбиение излучающей поверхности преобразователя на точечные источники

В качестве объекта наблюдения выбрана лопатка идеальной прямоугольной формы установленная в лопаточном колесе под углом 45 градусов к оси излучателя.

На рис. 3 представлено сечение рассматриваемой системы плоскостью  $XOY$ , и отмечены характерные положения лопатки в активной зоне датчика. Точечные излучатели на границах приемно-передающего элемента автодинного преобразователя обозначены  $i_1$  и  $i_2$ . На рис. 4 приведена зависимость амплитуды выходного сигнала

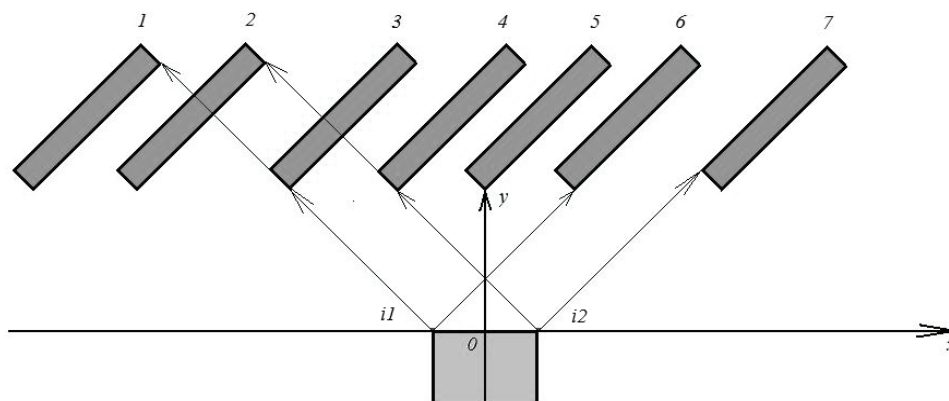
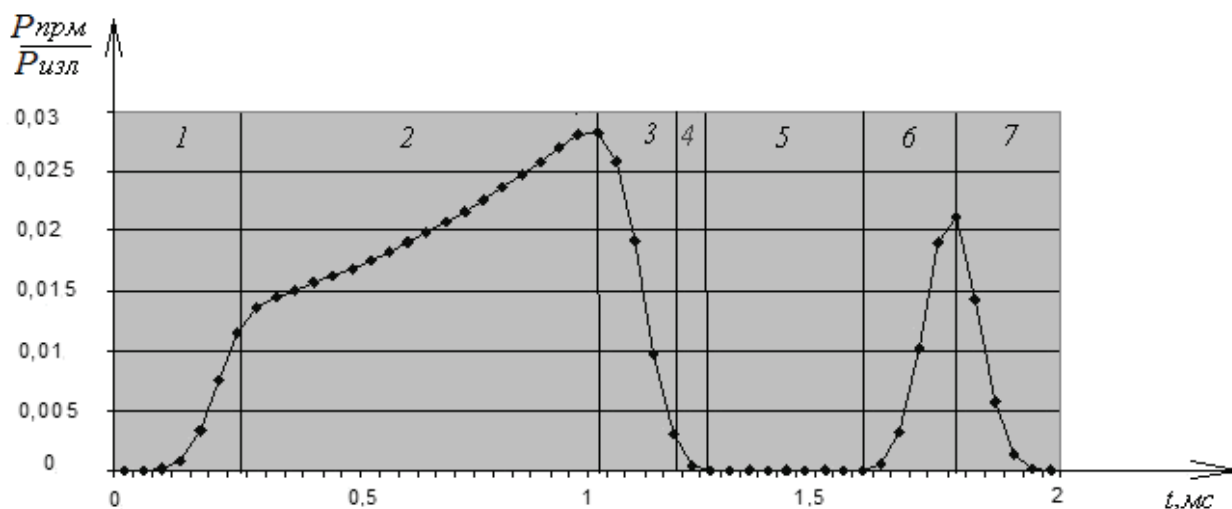


Рис. 3. Сечение моделируемой системы плоскостью  $XOY$



**Рис. 4.** Изменение амплитудной компоненты выходного сигнала автодинного преобразователя для исследуемой прямоугольной лопадки

ла автодинного преобразователя от координат расположения лопадки в активной зоне датчика.

В момент времени, когда лопадка находится в зоне 1, на автодин попадают первые лучи излучателя  $i_1$ , отразившиеся от поверхности лопадки и на выходе преобразователя начинает формироваться передний фронт сигнала. До этого момента сигнал на выходе автодинного преобразователя равен нулю. В процессе вращения диска, лопадка переходит в зону 2, которая характеризуется тем, что на лопадку начинают попадать лучи от всех точечных источников излучения ( $i_1$  и  $i_2$ ), при этом амплитуда сигнала на выходе преобразователя продолжает нарастать, но фронт имеет меньшую крутизну. В зоне 3 поверхность лопадки становится недоступна для части лучей точечного излучателя  $i_1$  и амплитуда сигнала начинает падать, до момента пока лопадка не выйдет из зоны 4 и автодин не перестанет принимать отраженный сигнал. В зоне 5 сигнал, отраженный от лопадки не попадает на приемник и на выходе доплеровского преобразователя амплитуда сигнала равна нулю. Когда лопадка переходит в зону 6, на выходе автодинного преобразователя вновь появляется нарастающий фронт сигнала, что обусловлено отражением лучей точечного излучателя  $i_1$  от поверхности лопадки. Затем на выходе доплеровского преобразователя появляется спадающий фронт сигнала, до тех пор, пока лопадка не окажется в зоне 7 и не выйдет из активной зоны датчика.

Частота доплеровского сигнала на выходе автодинного преобразователя определяется известным выражением:

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

где  $f_o$  – рабочая частота генерации автодинного преобразователя,  $c$  – скорость света;  $V$  –

проекция мгновенной линейной скорости лопадки на ось  $x$  в точке падения зондирующего луча на ее поверхность;  $\alpha$  – угол между осью диаграммы направленности датчика и направлением движения объекта.

Скорость движения лопадки в точке падения зондирующего луча определяется выражением:

$$V = \omega_R [R + \Delta z(t)], \quad (2)$$

где  $\Delta z$  – проекция зондирующего луча на ось  $z$  системы координат изображенной на рис. 1.

Угол между зондирующим лучом датчика и направлением движения объекта, определяется по формуле:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{\Delta y(t)}{\Delta x(t)}\right), \quad (3)$$

где  $\Delta x = OA$ ,  $\Delta y = OB$  – проекции зондирующего луча, попавшего на поверхность лопадки, на соответствующие оси системы координат изображенной на рис. 1;

Подставив выражения (2) и (3) в формулу (1), получим зависимость доплеровской частоты от времени:

$$f_D(t) = \frac{2f_o}{c} \omega_R [R + \Delta z(t)] \cos \left[ \arctg\left(\frac{\Delta y(t)}{\Delta x(t)}\right) \right].$$

На рис. 5 представлена зависимость частоты доплеровского сигнала от времени.

Форма сигнала на выходе автодинного преобразователя также зависит от его начальной фазы. На рис. 6 представлена зависимость частоты доплеровского сигнала от времени с фазой  $\frac{3\pi}{4}$ .

При фазовом сдвиге отличном от нуля на центральном пике выходного сигнала начинает формироваться характерный провал.

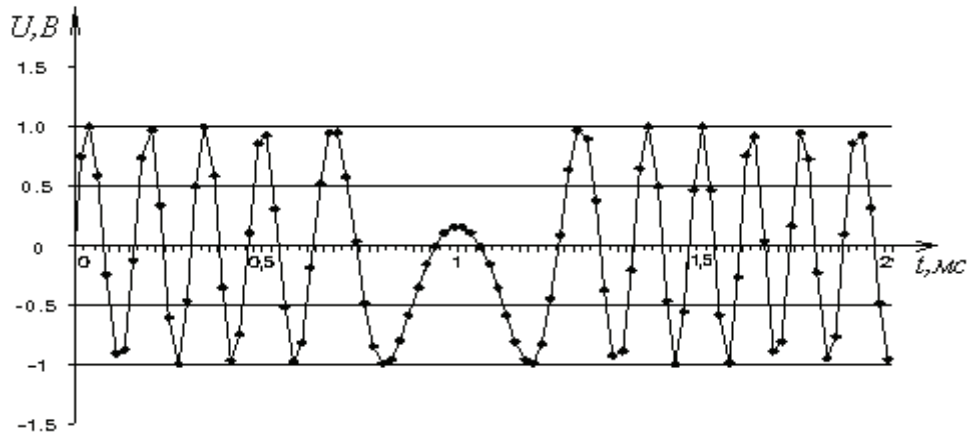


Рис. 5. Зависимость частоты доплеровского сигнала от времени

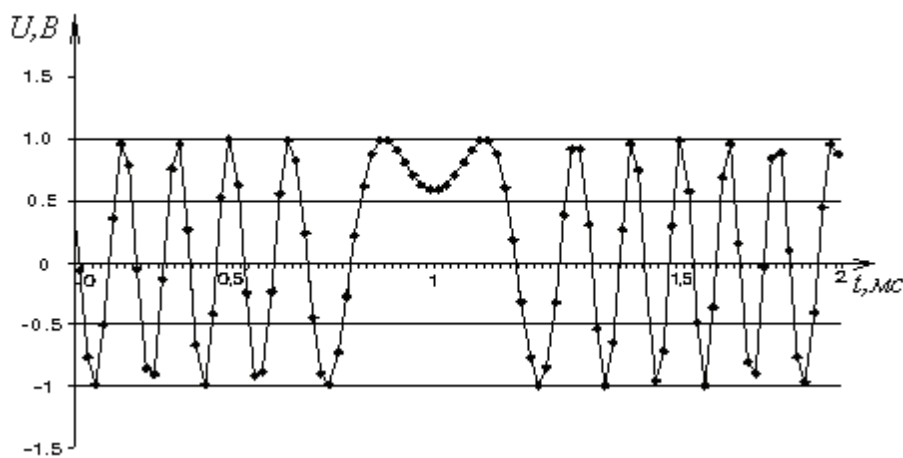


Рис. 6. Зависимость частоты доплеровского сигнала сдвинутого по фазе на  $\frac{3\pi}{4}$  от времени

Учитывая приведенные особенности моделирования выходного сигнала доплеровского преобразователя, составлен алгоритм вычислений потока, попадающего на фотоприемник. На основании этого алгоритма разработана компьютерная программа, реализующая на языке Pascal, метод численного интегрирования. В программе были учтены граничные условия и исходные данные, принятые в рассматриваемой системе.

Для проверки полученных теоретических положений был проведен эксперимент, который был реализован на установке, имитирующей лопаточное колесо, со следующими параметрами:

Диаметр лопаточного колеса,  $R$ : 123 мм;

Длина лопатки,  $l$ : 20 мм;

Ширина лопатки,  $b$ : 14 мм;

Толщина лопатки,  $h$ : 2 мм;

Минимальное расстояние от кромки лопатки до доплеровского преобразователя: 7,5 мм;

Ширина диаграммы направленности доплеровского преобразователя,  $\Theta$ : 120 градусов;

Количество лопаток в колесе: 7;

Частота вращения лопаточного колеса,  $\omega_R$ :

$$2\pi 50 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

На рис. 7 изображена амплитуда выходного сигнала доплеровского преобразователя полученная в результате эксперимента.

Можно заметить, что амплитуда доплеровского сигнала, полученного в результате моделирования перемещения прямоугольной лопатки, отражающие плоскости которой представлены аналитическими выражениями, и лопатки, используемой в эксперименте, заметно отличаются. Это обусловлено тем что, у лопаток экспериментального стенда при механической обработке скруглены кромки. В результате данного скругления была сформирована отражающая поверхность, формирующая пик на амплитудной характеристике.

На рис. 8 и 9 представлены сигналы на выходе автодинного преобразователя полученные в результате математического моделирования и в результате эксперимента соответственно.

Таким образом, можно констатировать, что сигнал, полученный в результате математического моделирования взаимодействия зондирующего потока с контролируемой поверхностью совпадает по форме с данными полученными во время эксперимента. Следовательно, в доплеров-

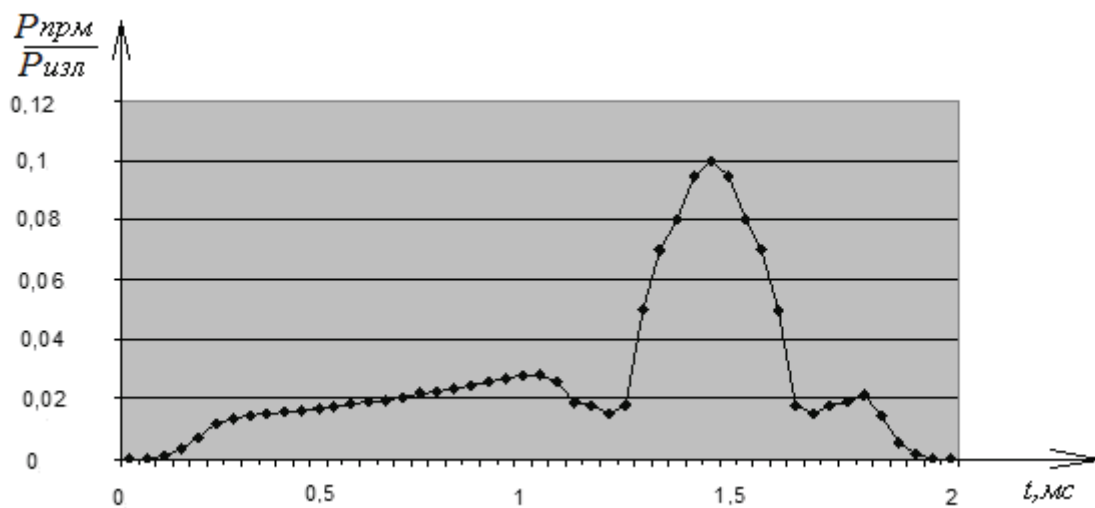


Рис. 7. Амплитуда сигнала на выходе автодинного преобразователя

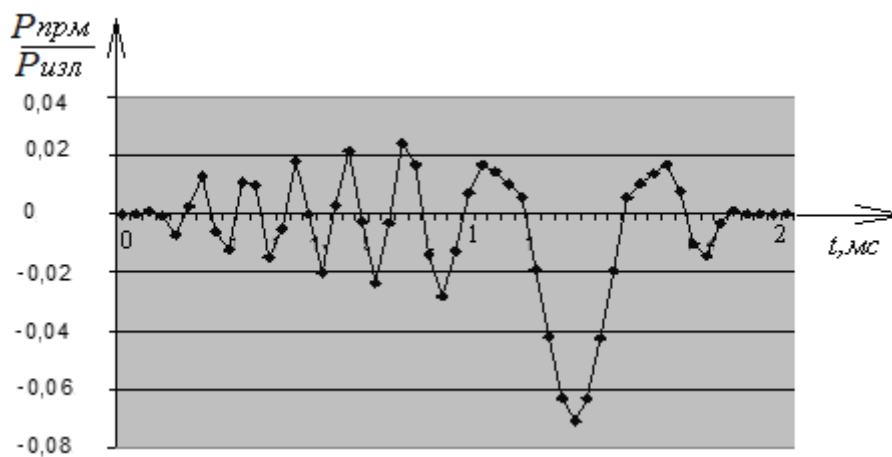


Рис. 8. Сигнал, полученный на выходе автодинного преобразователя в результате математического моделирования

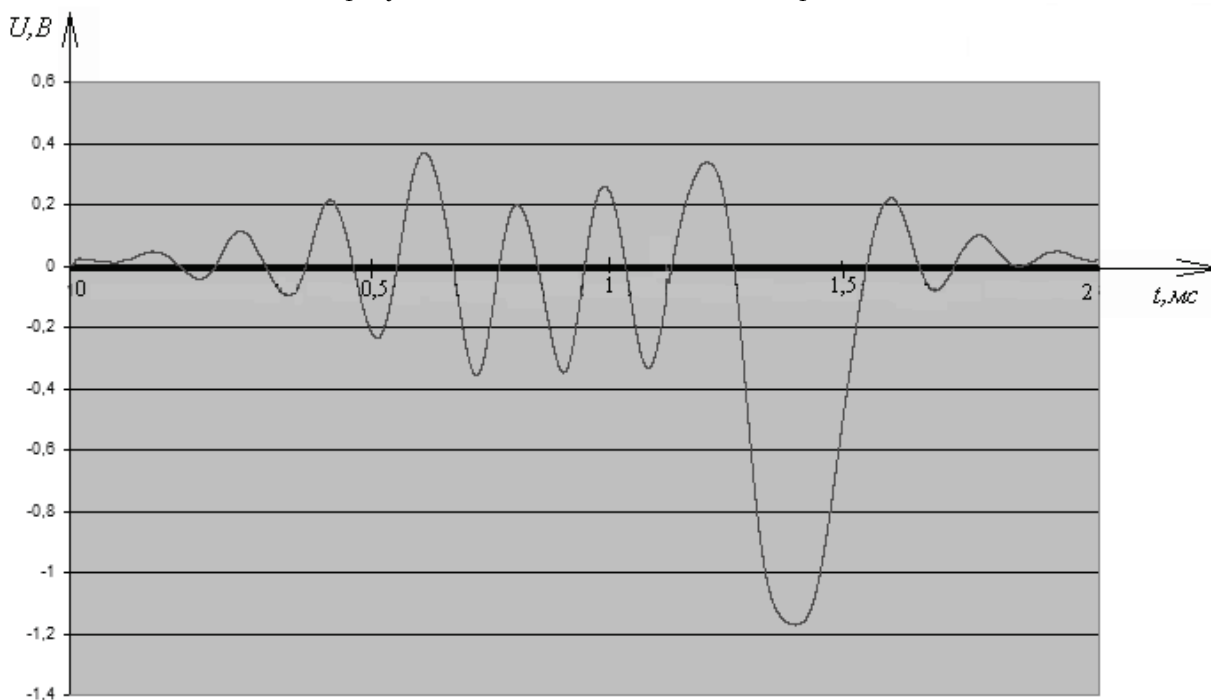


Рис. 9. Сигнал, полученный на выходе автодинного преобразователя в результате эксперимента

ском сигнале содержится информация о частоте вращения лопаточного колеса и форме поверхности лопатки. В дальнейшем данная математическая модель может быть уточнена и дополнена компонентами, учитывающими колебательные перемещения лопатки, что позволит определять параметры этих колебаний по экспериментальным данным.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилин А.И., Грецов А.А. Доплеровский метод определения параметров колебаний элементов вращающихся узлов энергоагрегатов // Вестник СГАУ. 2012. №3 (34). Часть 2. С. 171-179.
2. Данилин А. И. Бесконтактные измерения деформационных параметров лопаток в системах контроля и управления турбоагрегатами. Самара: Самарский научный центр РАН, 2008. 218 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.
4. Изюмова Т.И. Свиридов В.Т. Волноводы, коаксиальные и полосковые линии. М.: Энергия, 1975. 112 с.

#### FEATURES MATHEMATICAL MODELING DOPPLER TRANSDUCER FOR PARAMETERS OF DISPLACEMENTS BLADES POWER UNIT

© 2013 A.I. Danilin, A.A. Gretskov

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

The paper presents the features of mathematical modeling parameters of the output signal of the Doppler displacement transducer vane power unit and results are compared with experimental data.  
Key words: mathematical model, blades, amplitude, frequency, power unit.

---

*Alexander Danilin, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head at the Radio Department.  
E-mail: aidan@ssau.ru  
Andrey Gretskov, Graduate Student at the Radio Department,  
E-mail: greckov1989@rambler.ru*