

УДК. 534.631

Б.А. Гордеев<sup>1,2</sup>, С.Н. Охулков<sup>1,2</sup>, А.Н. Осмехин<sup>3</sup>, А.С. Плехов<sup>2</sup>**ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА ДОПЛера НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРАЦИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ВОЛНОВЫМИ МЕТОДАМИ<sup>1</sup>**ФГБУН «Институт проблем машиностроения Российской Академии наук»<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева<sup>2</sup>,  
АО «ОКБМ И.И. Африкантов»<sup>3</sup>,**Объект исследования:** электромеханические комплексы.**Цель:** определение погрешностей при измерении параметров движения волновыми методами магнитореологического демпфера при действии на него ударных или вибрационных нагрузок.**Результаты:** Проведена оценка погрешностей фазовых измерений виброперемещений электромеханических комплексов волновыми методами. Показано влияние эффекта Доплера отраженного сигнала на изменение его спектра, который может использоваться в качестве диагностического признака при исследовании ударных нагрузок.**Область применения:** измерения виброперемещений волновыми методами в системах демпфирования ударных нагрузок силовых электромеханических установок и механического оборудования.*Ключевые слова:* ударные нагрузки; ультразвуковой фазовый вибропреобразователь; акустическое зондирование; исследуемая поверхность магнитореологического трансформатора; частотная модуляция отраженной волны; влияние эффекта Доплера.**Введение**

В статье рассматриваются актуальные вопросы оценки погрешностей при фазовых измерениях виброперемещений с использованием волновых методов. Анализируется влияние девиации отраженного от исследуемого объекта ультразвукового луча на погрешность фазовых измерений между излученным и отраженным сигналами. Показано влияние эффекта Доплера отраженного сигнала на изменение его спектра, который может использоваться в качестве диагностического признака при исследовании ударных процессов.

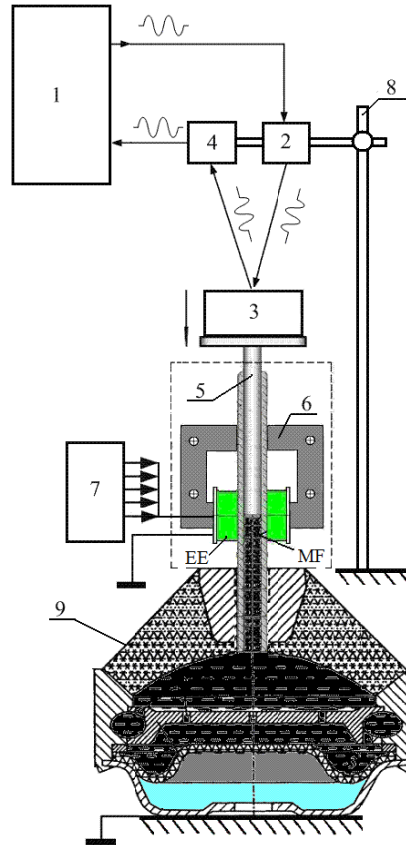
Для обоснования более точного измерения виброперемещений путем акустического зондирования исследуемой поверхности объектов при ударных нагрузках необходимо оценить влияние на погрешность измерения фазовой и частотной модуляции отраженной волны [1]. Для подтверждения теоретические выводы авторами были проведены дальнейшие экспериментальные исследования, позволившие обосновать и предложить более точные методы измерения виброперемещений путем акустического зондирования поверхности объектов при ударных нагрузках [2].

**Экспериментальная установка**

На рис. 1 приведена схематически модель измерительного устройства, ультразвукового фазового вибропреобразователя, где блок 1 включает в себя задающий генератор, электромагнитного сигнала частотой 32 кГц, фазовый и частотный детекторы. Блок 2 – излучающий преобразователь, преобразующий электромагнитный сигнал частотой 32 кГц в акустический сигнал той же частоты.

Частота 32 кГц выбрана потому, что длина волны излученного акустического сигнала в воздушной среде порядка  $10^{-2}$  м. Это условие позволяет выбрать рабочую точку в центре прямолинейного участка характеристики фазового детектора и исключить нелинейные искажения при измерениях. 3 - исследуемый объект, опорная плата демпфера, которая может подвергаться ударным нагрузкам. 4 - приемный измерительный преобразователь преобра-

зующий, отраженный от исследуемого объекта, акустический сигнал в электромагнитный той же частоты. 5 - шток, жестко соединенный с опорной платой демпфера и погруженный в его рабочую камеру, заполненную магнитореологической жидкостью. 6-магнитопровод с укрепленным соленоидом ЕЕ и питаемого от источника 7. MF-рабочая магнитореологическая жидкость, меняющая вязкость при действии магнитного поля. 8 - штатив, на котором закреплены излучающий и приемный ультразвуковые преобразователи. 9 - гидравлический демпфер вибрационных и ударных нагрузок, подлежащий исследованию.



**Рис. 1. Модель ультразвукового фазового вибропреобразователя**

Если исследуемый объект, демпфер 9, не подвергается действию вибрационных или ударных нагрузок, то фаза отраженного от опорной платы 3 акустического сигнала не меняется относительно опорного, излученного, и блок 1 это регистрирует.

При действии на опорную плату 3 демпфера 9 широкополосного вибросигнала, или ударного импульса, показанного на рис. 1 стрелкой, опорная плата перемещается, и фаза отраженного ультразвукового луча меняется относительно опорного – излученного. При помощи блока 7 запитывается обмотка соленоида ЕЕ и в системе MF - 5 - 6 создаётся замкнутое магнитное поле, которое шунтируется магнитореологической жидкостью MF, заполняющей рабочую камеру демпфера. Меняя силу тока запитывающую соленоид, меняется и магнитная индукция, пронизывающая слои магнитореологической жидкости, шунтирующей магнитное поле. Вязкость жидкости изменяется, таким образом, демпфер перестраивается на другую частоту [10, 11].

#### **Характер движения отражающей поверхности**

В случае движения границы с постоянной скоростью  $V$  закон движения границы  $l(t) = L_1 + Vt$ , где  $L_1$  - начальное расстояние от источника излучения до границы раздела сред.

Тогда закон движения границы запишется в виде [1]

$$f(t) = -h \left[ \frac{1-V/c}{1+V/c} - \frac{2L_1}{c(1+V/c)} \right]. \quad (1)$$

При таком законе движения границы раздела сред для гармонического источника излученный  $h(t)$  и отраженный  $f(t)$  акустические сигналы представляются в виде

$$h(t) = A_1 \sin \omega_0 t, \quad f(t) = -A_2 \sin(\omega_1 t + \Phi),$$

где  $A_1$  и  $A_2$  - амплитуды излученного и отраженного сигналов соответственно;  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ,  $\omega_1 = 2\pi f_1$  и  $f_0$ ,  $f_1$  - круговые и циклические частоты излученного  $h(t)$  и отраженного  $f(t)$  акустических сигналов,  $\Phi$  - постоянный набег фаз. Между круговыми и циклическими частотами отраженного и излученного акустических сигналов имеется зависимость, которая соответствует двойному эффекту Доплера:

$$\omega_1 = \omega_0 \frac{1-V/c}{1+V/c} = 2\pi f_1 = 2\pi f_0 \frac{1-V/c}{1+V/c} \rightarrow f_1 = f_0 \frac{1-V/c}{1+V/c}, \quad (2)$$

где  $V$ , м/с - виброскорость отражающей поверхности объекта.

Допустим, что скорость движения границы раздела сред много меньше скорости распространения акустической волны  $V/c = \dot{l}(t)/c \ll 1$ , тогда выражение (2) можно представить в виде ряда

$$\omega_1 = \omega_0 \left[ 1 - \dot{l}(t)/c + 2\dot{l}(t)^2/c^2 - 2\dot{l}(t)^3/c^3 + \dots \right]. \quad (3)$$

Интегрируя (3), находим фазу отраженного сигнала:  $\omega_1 t \approx \omega_0 \left( t - \frac{2l}{c} \right)$ .

При этом отраженную волну теперь можно представить в виде

$$f_+(t+x/c) \approx A_0 \sin \left[ \omega_0 \left( t - \frac{2l(t)}{c} \right) \right],$$

где  $l(t) = L + \Delta(t)$ .

Рассмотрим случай движущейся границы по закону  $\Delta t = l_0 \sin \Omega t$ ,

Тогда

$$f_+(t+x/c) = -A_0 \sin \left[ \omega_0 \left( t - \frac{2L}{c} - 2l_0 \sin \Omega t \right) \right]. \quad (4)$$

Последнее выражение можно привести к виду

$$f_+ = A_0 [J_0(m) \cos \omega_0 t - 2J_1(m) \sin \Omega t \sin \omega_0 t + 2J_2(m) \cos 2\Omega t \cos \omega_0 t - 2J_3(m) \cos 3\Omega t \sin \omega_0 t + \dots], \quad (5)$$

где  $J_n(m)$  - функция Бесселя первого рода  $n$ -го порядка от аргумента  $m = \Delta\omega_d/\Omega = \Delta f/F$  - индекс частотной модуляции,  $\Delta\omega_d$  - девиация частоты отраженного акустического сигнала [1, 3, 9].

Таким образом, в спектр отраженного сигнала вклад различных боковых составляющих определяется величиной  $m$ .

Рассмотрим режимы частотной модуляции при малых и больших значениях  $m$ . Если  $m \ll 1$ , то имеют место приближенные равенства

$$\sin(m \sin \Omega t) \approx m \sin \Omega t, \quad \cos(m \sin \Omega t) \approx 1,$$

При этом выражение (5) можно записать

$$\begin{aligned} \alpha(t) &\approx A_0(\cos \omega_0 t - m \sin \Omega t \sin \omega_0 t) = \\ &= A_0 \left[ \cos \omega_0 t + \frac{m}{2} \cos(\omega_0 + \Omega)t - \frac{m}{2} \cos(\omega_0 - \Omega)t \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

При АМ фазы колебаний боковых частот симметричны относительно несущей частоты, а при угловой модуляции фаза колебания нижней боковой частоты сдвинута на  $180^\circ$  [3, 9].

При значениях индексов  $m$ , изменяющихся в интервале от 0,5 до 1, приобретает некоторое значение вторая пара боковых частот, ввиду чего ширина спектра должна быть равна  $4\Omega$ . Далее при  $1 < m < 2$  приходится учитывать третью и четвертую пары боковых частот и т.д.

Поскольку при низкочастотных колебаниях границы раздела сред виброскорость мала, то девиация частоты отраженного сигнала также мала [4]. Тогда выделение информативной составляющей из отраженного акустического сигнала целесообразно проводить путем фазового детектирования [8]. Изменение фазового сдвига между излученным и отраженным от границы сигналами адекватно изменению перемещения  $l(t)$  границы раздела сред. Поэтому учитывая изменение параметров исследуемого процесса, можно выбирать оптимальный способ обработки полученной информации с минимизацией погрешностей.

При ударных нагрузках исследуемой поверхности объектов при измерении виброперемещений методом акустического зондирования на погрешность измерения существенное влияние оказывает частотная модуляция отраженной волны [5]. При ударных нагрузках исследуемая поверхность объекта модулирует отраженную акустическую волну по фазе и частоте. При этом частотная модуляция иногда превалирует над фазовой модуляцией. Тогда целесообразно исследовать отраженную ультразвуковую волну не только по фазе, но и по спектру, в частности по боковым гармоникам относительно несущей частоты излученного сигнала.

Мгновенная круговая частота  $\omega(t) = 2\pi f(t)$  с фазой  $\theta(t) = \varphi(t)$  отраженного акустического сигнала связана соотношением

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt, \quad (7)$$

поэтому частотная и фазовая модуляция взаимосвязаны, и их объединяют также общим названием - угловая модуляция [3, 9].

При частотной модуляции мгновенная частота сигнала изменяется по закону модулирующего сигнала, при фазовой модуляции - фаза. Поэтому модуляция частоты отраженной акустической волны от вибрирующей поверхности объекта по тестовому гармоническому закону (рис.2) с частотой  $\Omega = 2\pi F$  представляется в виде

$$u_{\text{мод}}(t) = U_{\text{мод}} \cos \Omega t. \quad (8)$$

При частотной и фазовой модуляции соответственно получим

$$\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega_d \cos \Omega t, \quad (9)$$

где  $\Delta\omega_d = kU_{\text{мод}}$  - девиация частоты;

$$\theta(t) = \omega_0 t + \Delta\varphi_d \cos \Omega t + \theta_0, \quad (10)$$

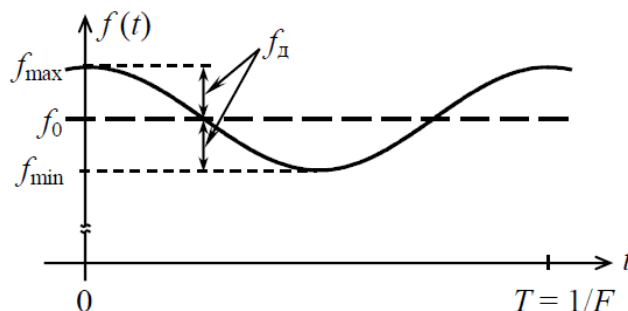
где  $\Delta\varphi_d = kU_{\text{мод}}$  - девиация фазы.

Акустическое, отраженное колебание:

$$u(t) = U_0 \cos \theta t = U_0 \cos \theta \int_0^t \omega(t) dt. \quad (11)$$

Диапазон изменения частоты отраженного от вибрирующей поверхности объекта

акустического сигнала при его частотной модуляции по гармоническому закону с частотой  $\Omega = 2\pi F$  (8) показан на (рис.2).



**Рис. 2. Диапазоны изменения частоты отраженного от вибрирующей поверхности акустического сигнала при его частотной модуляции, где эффектом Доплера можно пренебречь**

С учетом (9) несущее колебание (11) примет вид

$$u(t) = U_0 \cos \left( \omega_0 t + k \int_0^t U_m \cos \Omega t \right) = U_0 \cos(\omega_0 t + m_q \sin \Omega t), \quad (12)$$

где  $m = \Delta\omega_d / \Omega = \Delta f / F$  - индекс частотной модуляции.

При фазовой модуляции по тестовому гармоническому закону вибрирующей поверхности объекта (8) с учетом (10) отражённое акустическое колебание (11) принимает вид

$$u(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + \Delta\varphi_d \cos \Omega t + \theta_0), \quad (13)$$

где  $\Delta\varphi_d$  - девиация фазы, или индекс фазовой модуляции.

Из (10) и (11) следует, что при частоте  $\Omega = \text{const}$  модулирующего тестового гармонического сигнала от вибрирующей поверхности объекта отличить частотную и фазовую модуляции не представляется возможным. Это различие можно обнаружить только при изменении частоты  $\Omega = 2\pi F$  вибрирующей поверхности объекта.

### Выводы

Измерение изменения фазы отражённого акустического сигнала относительно опорного, падающего на исследуемую поверхность можно проводить с минимальной допустимой погрешностью только при скоростях исследуемого объекта не более, той когда она достигает 1,0% от скорости распространения фронта зондирующей волны. Если скорость исследуемого объекта превышает данный порог, то начинает проявляться девиация частоты отражённого сигнала, в спектре которого появляются дополнительные гармоники.

Выяснение причин возникновения погрешностей при волновых измерениях параметров движения, как и при всех иных измерениях всегда является полезным с метрологической точки зрения.

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект №15-19-10026).*

### Библиографический список

1. Пат. № 2472109 на изобретение. Ультразвуковой фазовый вибропреобразователь / Гордеев Б.А., Куклина И.Г., Голубева К.В., Гордеев А.Б. по заявке №2011130282/28(044754) от 18 июля 2012 г. Опубл. 10.01.2013. Бюл. №1.

2. **Гоноровский, И.С.** Частотная модуляция и её применения / И.С. Гоноровский. – М.: Связь-издат, 1948. – 283 с.
3. **Takeda, Y.** “Velocity Profile Measurement by Ultrasonic Doppler Shift Method”, // Int. J. Heat Fluid Flow 1986. Vol. 7. №. 4. P. 313-318.
4. H. Kikura, Y. Takeda and F. Durst, “Velocity Profile Measurement of the Taylor Vortex Flow of a Magnetic Fluid Using the Ultrasonic Doppler Method” // Exp. Fluids 1999. – Vol. 26. – №. 3. – P. 208–214.
5. M. Toda, S. Tosima Theory of curved, clamped, piezoelectric film air-borne transducers // IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control. – 2000. – V.47. – № 6. – P. 1421–1431.
6. T.E. Gomez Acoustic impedance matching of piezoelectric transducers to the air // IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr. and Freq. Contr. – 2004. – V. 51. – № 5. – P. 624–633.
7. **Kazakov, V.V.** Measurement of vibration field by ultrasonic phase vibrodisplacement meters // Proceed. XV session RAS. Acoustical measurements. – М.: GEOS. – 2004. – P.1.
8. Пат. на изобретение №2407029 Гидравлическая виброопора / Гордеев Б.А., Синев А.В., Куплинова Г.С. Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27 декабря 2010 года, бюл. № 36.
9. Пат. на изобретение № 2561610. Магнитоэологический амортизатор / Гордеев Б.А., Ерофеев В.И., Охулков С.Н., Тумаков С.Ф.; опубликовано 27.08.2014, бюл. № 24.

*Дата поступления  
в редакцию 10.04.2017*

**B.A. Gordeev<sup>1,2</sup>, S.N. Okhulkov<sup>1,2</sup>, A.N. Osmekhin<sup>3</sup>, A.S. Plekhov<sup>2</sup>**

## **INFLUENCE OF EFFECT OF DOPPLER ON THE ERROR IN MEASUREMENT OF VIBRATION OF ELECTROMECHANICAL COMPLEXES WAVE METODAMI**

FGBUN "Institute of problems of mechanical engineering of the Russian Academy of Sciences"<sup>1</sup>,  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeyev<sup>2</sup>,  
JSC Experimental Design Bureau of Mechanical Engineering of I. I. Afrikantov<sup>3</sup>,

**Object of probe:** electromechanical complexes at action of mechanical loadings

**Purpose:** definition of errors at measurement of parameters of the movement of a seating of the magnetorheological snubber at action on it shock or vibration loadings.

**Results:** The assessment of errors of phase measurements of vibroconveyances the elektromekhanicheskikh of complexes is carried out by wave methods. Influence of effect of Doppler of the reflected signal on change of its range which can be used as a diagnostic sign at probe of shock loadings is shown.

**Scope:** measurements of vibroconveyances by wave methods in systems of damping of shock loadings of power electromechanical plants and the mechanical equipment.

*Key words:* shock loadings; ultrasonic phase vibroconverter; acoustic sounding; the studied surface of the magnetorheological transformer; frequency modulation of the reflected wave; influence of effect of Doppler.