

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК. 621.752.3

Б.А. Гордеев^{1,2}, С.Н. Охулков^{1,2}, А.С. Плехов²

ОСОБЕННОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛНОВЫХ МЕТОДОВ ПРИ ТАРИРОВКЕ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ¹

Институт проблем машиностроения Российской Академии наук (ИПМ РАН)¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Объект исследования: Демпфер ударных нагрузок с магнитоэологическим трансформатором.

Цель: Оценка погрешностей при измерении деформаций в магнитоэологических трансформаторах, в которых дроссельные каналы заменены цилиндрическим зазором между двумя коаксиальными цилиндрами. При действии ударных нагрузок измерение перемещений волновыми методами связано с рядом особенностей, которые рассматриваются в данной статье

Результаты: Ошибка измерения фазы, а, следовательно, и виброперемещения, обусловлена соотношением скоростей зондирующего сигнала и исследуемых деформаций объекта - магнитоэологического демпфера.

Область применения: Системы демпфирования ударных нагрузок силовых электромеханических установок и механического оборудования.

Ключевые слова: деформации и микроперемещения в магнитоэологических трансформаторах; ультразвуковой фазовый измеритель; отраженный и излученный акустические сигналы; граница раздела сред; ошибки измерения фазы; точность и оценка погрешностей измерений; релаксация магнитоэологической жидкости.

Введение

В статье анализируются причины ошибки измерения фазы, обусловленные соотношением скоростей зондирующего сигнала и исследуемых деформаций объекта - демпфера с магнитоэологическим трансформатором (МРТ). При действии ударных нагрузок на демпфер с МРТ из-за проявления кавитационных процессов в его рабочей магнитоэологической жидкости (МРЖ) задача повышения точности измерений его деформаций волновыми методами становится актуальной.

Процесс измерения деформаций (перемещений) демпфера с магнитоэологическим трансформатором волновыми методами заключается в следующем (рис. 1) [1, 7, 8].

Продольные смещения излучаемой источником ультразвуковой волны U_t зондирующего сигнала определяются уравнением

$$U_t - c^2 U_x = 0,$$

где U_x - исходное смещение зондирующего сигнала; $c = \sqrt{E/\rho}$ - скорость звука в реологической среде, в качестве которой могут быть газы и жидкости; E - модуль упругости среды; ρ - удельная плотность среды.

Положим, что на границу раздела сред действуют ультразвуковые колебания от источника излучения и, отражаясь от поверхности исследуемого объекта, они принимаются согласованным приемником. Тогда условие непрерывности на границе раздела сред запишется в виде

$$Z_0 U_t(0,t) - E U_x(0,t) = \mu(t),$$

где $Z_0 = \sqrt{E\rho}$ - волновое сопротивление среды; $\mu(t)$ - заданная функция смещения.

Считая движущуюся границу непроницаемой для зондирующего сигнала, второе граничное условие при $x = L + l(t)$ запишется в виде

$$U[L + l(t)] = l(t),$$

где L - расстояние от источника до неподвижной границы; $l(t)$ - закон движения границы.

В качестве примера рассмотрим случай движения границы с постоянной скоростью V . В этом случае $l(t) = L_1 + Vt$, где L_1 - начальное расстояние от источника излучения до границы раздела сред, и тогда закон движения границы запишется в виде [7, 8]

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

Отсюда видно, что для гармонического источника

$$h(t) = A \sin \omega_0 t,$$

$$f(t) = -A \sin(\omega_1 t + \varphi),$$

где A - амплитуда, ω_0, ω_1 частоты излученного $h(t)$ и отраженного $f(t)$ акустических сигналов, φ - постоянный набег фаз.

Постоянный набег фаз определяется как:

$$\varphi = \frac{2\omega L_1}{c(1+V/c)}.$$

Между частотами отраженного и излученного акустических сигналов имеется следующая зависимость, которая соответствует двойному эффекту Доплера:

$$\omega_1 = \omega_0 \frac{1-V/c}{1+V/c}.$$

Следует иметь в виду, что и амплитуды падающего и отраженного сигналов в средах с реологическими свойствами не равны. Однако в данном случае информативными признаками будут девиация частоты за счет эффекта Доплера и модуляция фазы [7, 8].

В общем случае при произвольном движении границы раздела сред, если источник гармонический, принимаемый сигнал можно представить в следующем виде

$$f(t) = -A \sin \omega(t - 2l(t)R(t)/c), \quad (1)$$

где $R(t)$ - функция, характеризующая погрешность измерения фазы в данный момент времени.

При $R(t) = 0$ фаза отраженного сигнала относительно падающего (опорного) всегда имеет постоянное значение, так как в этом случае выражение (1) примет вид:

$$f(t) = A \sin \omega t,$$

где ω - частота отраженного акустического сигнала.

Если $R(t) < 0$, или $R(t) > 0$, то погрешность измерения фазы в данный момент времени обусловлена временем распространения акустического сигнала от объекта к приемнику. Так при виброскоростях, имеющих среднеквадратичное значение порядка 1 м/с, она соответствует 0,3% при расстояниях от объекта исследований 1 м.

Для извлечения информации о законе движения границы исследуемого объекта отраженный сигнал умножается на опорный $A_0 \sin(\omega t + \varphi)$, после которого обычно выделяют низкочастотную часть спектра, то есть рассматривают составляющую спектра:

$$f_n(t) = -\frac{AA_0 \cos(2\omega l(t)R(t)/c + \varphi)}{2},$$

откуда выделяется закон движения $l(t)$, считая в квазистатическом приближении $R(t) = 0$.

В данном методе измерения микроперемещений информативным параметром является-

ся индекс $m = \omega_d / \Omega$ – частотной модуляции отраженного зондирующего акустического сигнала, где ω_d – девиация частоты отраженного акустического сигнала; Ω_0 – частота вибраций.

На (рис. 1) представлена функциональная схема экспериментальной установки с ультразвуковым фазовым измерителем микроперемещений 1 по выявлению виброперемещений, обусловленных соотношением скоростей зондирующего сигнала и исследуемых деформаций магнитореологического демпфера 5-6-9 [1, 7, 8].

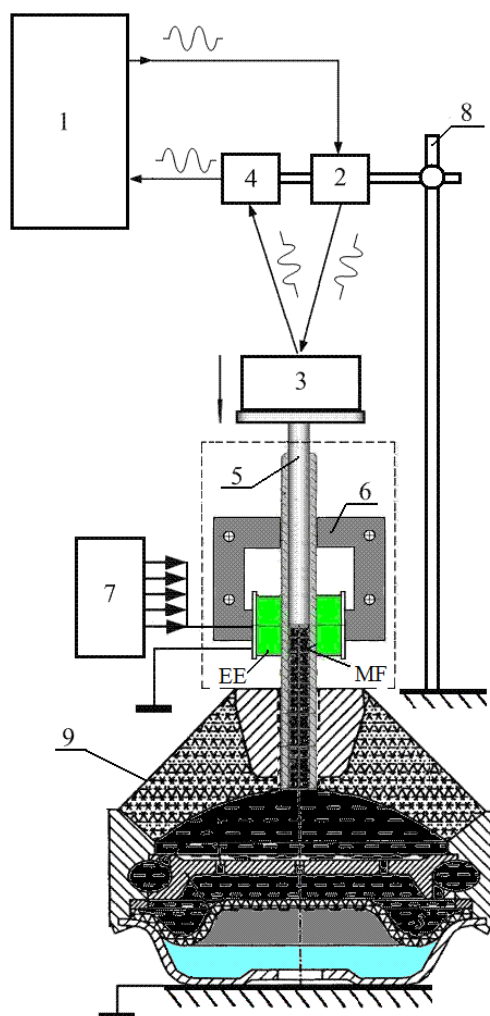


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки по выявлению виброперемещений МРТ

На функциональной схеме (рис. 1) показано: 1 – фазовый измеритель микроперемещений, 2 и 4 – пьезоэлектрические преобразователи, 3 – нагрузка с массой m , 5 – шток-поршень (материалы: сталь, феррит, латунь), 6 – возбуждающий электромагнит ортогонального магнитного поля, 7 – источник постоянного тока, 8 – консоль; 9 – гидроопора поршневого типа.

В магнитореологическом демпфере цилиндрический зазор, а также объемы рабочих камер заполнены МРЖ. Такая конструкция магнитореологических демпферов предпочтительна для демпфирования ударных нагрузок. На рис. 1 в магнитореологический демпфер с цилиндрическим зазором входит: коаксиальная внутренняя поверхность латунной проходной втулки, внешняя поверхность штока-поршня 5, возбуждающий электромагнит 6 и объемы основной и компенсационной камер гидроопоры поршневого типа 9 с МРЖ [3].

Пьезоэлектрические преобразователи – излучатель 2 и приёмник 4 акустических колебаний закреплены на консоли 8 и настроены на колебания механического и электрического резонансов с частотой 30 кГц [1, 7, 8].

При помощи ультразвукового фазового измерителя измерялись микроперемещения рабочего штока-поршня 5 с нагрузкой 3.

В работе [1] была выявлена линейная зависимость скорости перемещения латунного штока-поршня в цилиндрическом зазоре с МРЖ от величины магнитной индукции (рис. 2). Замедление скорости перемещения латунного штока-поршня после снятия воздействия магнитного поля в ортогональном магнитном поле возбуждающего электромагнита не зафиксировано.

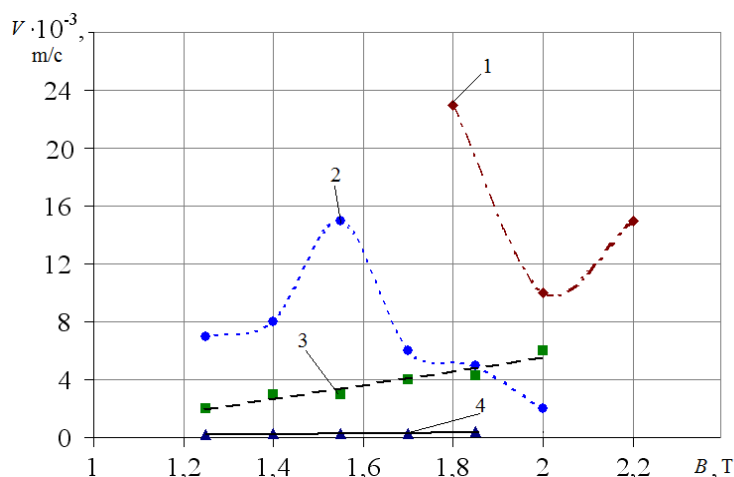


Рис. 2. Скорость релаксации МРЖ от начальной индукции ортогонального магнитного поля: скорости релаксации МРЖ в поперечном (1, 2, 3) и продольном (4) магнитных полях в зависимости от начальной индукции магнитного поля и материала штоков-поршней; 1 – сталь; 2 – феррит; 3, 4 – латунь

В работе [1] установлено замедление скорости перемещения ферритового и стального штоков-поршней после снятия воздействия магнитного поля в ортогональном магнитном поле возбуждающего электромагнита до и после прохождения ими своих экстремумов. Этот результат объясняется магнитореологическим эффектом и релаксацией МРЖ после снятия магнитного поля и остаточной намагниченностью сердечника магнитопровода возбуждающего электромагнита [4, 5].

Увеличение скорости для стального штока-поршня обусловлено ростом температуры магнитной жидкости (свыше 40°C) в цилиндрическом зазоре [1, 2].

При ударных нагрузках скорость движения штоков-поршней резко меняется [6], и, если она становится одного порядка со скоростью распространения зондирующего сигнала, то спектральный состав отраженного сигнала насыщается высокочастотными гармониками, отсутствующими в реальном процессе [1, 7, 8].

Метод обработки отраженного сигнала должен учитывать абсолютную ошибку в измерении смещения границы $l(t)$, равную

$$\Delta = [l(t)R(t) - l(t)] / l(t) = R(t) - 1. \quad (2)$$

Из (2), задаваясь относительной ошибкой измерения

$$\delta = \Delta l(t) / l(t),$$

где $\Delta l(t)$ - погрешность измерения.

Получаем следующее условие применимости квазистатического представления:

$$\Delta = R(t) - 1 \leq \delta,$$

и для второго приближения

$$|l(t)| \leq c\delta.$$

Так, для $\delta = 10^{-2}$ получаем, что скорость движения вибрирующей границы не должна превышать порядка 3 м/с при измерениях в воздухе.

Выводы

Результаты работы показали, что ошибка измерения фазы, а следовательно, и виброперемещения, обусловлена соотношением скоростей зондирующего сигнала и исследуемых деформаций объекта - магнитореологического демпфера. В тех случаях, когда при ударных воздействиях скорость штока-поршня превышает 3 м/с, выделение фазы отраженного сигнала как информативного параметра связано с возрастающими погрешностями.

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

Библиографический список

1. Гордеев, Б.А. К вопросу создания цилиндрического магнитореологического трансформатора в ортогональных магнитных полях / Б.А. Гордеев [и др.] // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2014. – №2. – С. 15–21.
2. Гордеев, Б.А. Влияние температуры рабочей жидкости на динамические характеристики гидропор / Б.А. Гордеев [и др.] // Вестник машиностроения. – 2012. – № 12. – С. 56–62.
3. Системы виброзащиты с использованием инерционности и диссипации реологических сред / Б.А. Гордеев [и др.]. – М.: Физматлит, 2004. – 175 с.
4. Шульман, З.П. Магнитореологический эффект / З.П. Шульман, В.И. Кордонский. – Минск: Наука и техника, 1982. – 184 с.
5. Гордеев, Б.А. Течение и релаксация магнитореологической жидкости в дроссельных каналах гидропор / Б.А. Гордеев [и др.] // Вестник машиностроения. – 2015. – №7. – С. 59–63.
6. Гордеев, Б.А. Применение магнитореологических жидкостей в машиностроении / Б.А. Гордеев [и др.] // Приволжский научный журнал. – 2014. – № 4. – С. 29–42.
7. Гордеев Б.А., Измерения параметров вибрации конструкций акустическими методами / Б.А. Гордеев, И.Г. Куклина, А.Н. Осмехин // Приволжский научный журнал. – 2009. – №2(10). – С. 13–20.
8. Пат. № 2472109 на изобретение «Ультразвуковой фазовый вибропреобразователь» по заявке №2011130282/28(044754) от 18 июля 2012 г. / Гордеев Б.А., Куклина И.Г., Голубева К.В., Гордеев А.Б. Опубликовано 10.01.2013. Бюл. №1.

*Дата поступления
в редакцию 15.10.2015*

B. A. Gordeev^{1,2}, S. N. Okhulkov^{1,2}, A. S. Plekhov²

EVALUATION OF POGRESHNOSTEI AT CALIBRATION METHODS MAGNETORHEOLOGICAL WAVE TRANSFORMER

Institute of problems of mechanical engineering Russian Academy of Sciences" (KIAM RAS)¹,
Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alexeev²

The object of study: a shock damper with magnetorheological transformation.

Objective: to assess errors in the measurement of deformation in magnetorheological transformers, in which a throttle channels made cylindrical gap between two coaxial cylinders. Under the action of shock loads from the displacement measurement methods related to the wave number of features that are discussed in this article

Results: measurement error phase, and, consequently, the vibration displacement caused by the ratio of the speeds of the probing signal and the investigated strain of an object - magnetorheological damper.

Application field: system damping shock loads power electro-mechanical installations and mechanical equipment.

Key words: deformation and micromovings in magnetorheological transformers; ultrasonic phase meter; reflected and radiated acoustic signals; the interface; the measurement error phase; accuracy and evaluation of measurement errors; relaxation of magnetorheological fluid.