

УДК 681.514

А.И. Ермолаев, А.С. Плехов, В.Ф. Стрелков, Д.Ю. Титов

**АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ВИБРОЗАЩИТНЫМИ
ГИДРООПОРАМИ С МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИМ ТРАНСФОРМАТОРОМ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Дано определение виброизолятора, рассмотрены типы виброизоляторов, их области применения, показаны преимущества управляемых виброизоляторов и адаптивного управления виброизолятором с магнитореологическим трансформатором.

Ключевые слова: виброзащита, адаптивная система управления виброизолятором, натурное испытание гидроопоры.

Введение

Виброизолятор – это средство ослабления вибрации, применяемое в тех случаях, когда между источником вибрации и защищаемым объектом (конструкцией) допустимо соединение в дискретном количестве мест.

Область применения виброизоляторов весьма обширна и включает в себя транспортные амортизаторы, промышленные виброизоляторы, которые позволяют улучшить качество обработки деталей на металлорежущих станках и снизить потери электроэнергии в электромеханических приводных и генерирующих установках, а также системы виброзащиты оптических приборов и строительных конструкций. Для высокоточного оборудования и оборудования специального назначения целесообразно использовать системы, обладающие несущей способностью с возможностью управления колебаниями системы за счет изменения жесткости исполнительного элемента и степени демпфирования колебаний. Изменять и жесткость, и коэффициент демпфирования возможно посредством применения управляемых магнито-реологических демпферов.

Вопросы теоретического исследования таких устройств затрагиваются в работах Гордеева Б.А., Гусарова В.И., Ерофеева В.И., Ковтунова А.В., Морозова П.Н., Мугина О.О., Мулюкина О.П., Синева А.В., а также в работах зарубежных ученых Nicholas K.Petek, Choi Seung-Bok, Cristiano Spelta, Fabio Previdi, Sergio M. Savaresi, Giuseppe Fraternali, Nicola Gaudio и др.

Анализ публикаций по проблеме проектирования и исследования активных систем виброзащиты промышленного назначения показывает, что широко используемыми являются системы с гидравлическим исполнительным элементом [1, 2].

К настоящему времени реже используются электротехнические системы активной виброзащиты на основе электромеханических преобразователей. Это объясняется тем, что в них электротехнические исполнительные устройства применяются лишь в качестве органа регулирования в несущих исполнительных элементах жесткости.

В статье рассматривается виброизолятор в виде гидравлического амортизатора - гидроопоры. Управляемые виброизоляторы позволяют, в отличие от конструктивно настроенных гидроамортизаторов, обеспечить широкий диапазон частот гашения, постоянство характеристик при изменении условий окружающей среды и нагрузки, которая может изменяться как по величине, так и продолжительности.

Особенно актуально использование управляемых гидроопор для виброзащиты электромеханических комплексов с изменяемой массой или моментом инерции приводимого механизма либо с регулируемой частотой вращения выходного вала. Это относится и к генерирующим электромеханическим комплексам с переменной нагрузкой или переменной частотой вращения. Например, к таким комплексам относятся ветроэнергетические установки или дизель-электрические станции [3, 4].

Авторы статьи предлагают адаптивную систему управления виброизолятором, позво-

ляющую автоматически настраивать его параметры на частоту, преобладающую в общем спектре вибровозмущения.

Математическая модель управляемого виброизолятора и конструктивная реализация

При описании динамического поведения сложные конструкции, подверженные вибровозмущениям, можно рассматривать как систему масс, соединенных с помощью пружин и демпфирующих элементов. Поскольку силы демпфирования для реальной конструкции нельзя оценить с такой же точностью, как упругие силы и силы инерции, то строгое математическое моделирование явлений демпфирования невозможно. Для объяснения диссипативных сил, присутствующих в любой конструкции, следует сделать предположение о виде демпфирования. Это вид должен способствовать использованию простых математических операций, применяемых к линейным уравнениям движения [5].

Гидравлические виброопоры (гидроопоры) объединяют в себе упругий резиновый элемент и гидравлический гаситель колебаний, как показано на рис. 1.

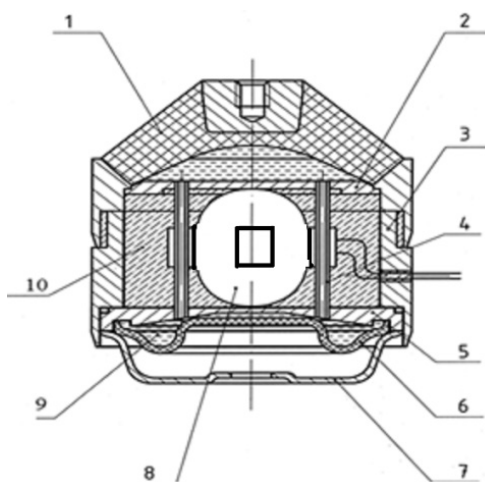


Рис. 1. Разрез виброзащитной управляемой гидроопоры:

1 – резиновая обечайка – упругий элемент; 2 и 5 – несущие перегородки; 3 – корпус; 4 – демпферный канал; 6 – мембрана; 7 – поддон для крепления; 8 – катушка возбуждающего электромагнита магнито-реологического трансформатора; 9 – магнито-реологическая жидкость; 10 – крепящие элементы конструкции

В конструкции нет трущихся частей с фрикционным сухим контактом. Изменение объемов полостей с жидкостью происходит за счет деформации эластичной обечайки гидроопоры. В качестве компонентов трения выступают конструктивное трение в резине и гидравлическое вязкое сопротивление жидкости.

Диссипация (рассеивание) энергии колебаний в гидравлических опорах происходит в жидкости, заполняющей внутренние полости конструкции. Перемещение жидкости из одной полости (камеры) в другую сопровождается трением слоев, при котором выделяется тепловая энергия и совершается работа. Тепловая энергия далее рассеивается в окружающую среду через металлические корпусные детали гидроопоры.

Совершенствование гидроопор для гашения вибрации и шума связано с использованием магнито-реологических трансформаторов [6, 7]. Эти устройства не являются демпферами или виброизоляторами, а позволяют посредством магнитного поля изменять вязкость магнито-реологической жидкости в демпферных каналах виброизоляторов. Адаптивные системы управления магнито-реологическими трансформаторами гидроопор дают возможность изменять передаточные функции виброизоляторов, благодаря чему частотный диапазон эффективного применения расширяется в 2-5 раз.

Система управления магнито-реологическим трансформатором гидроопоры (далее – гидроопорой) должна реализовать следующие функции:

- выделить основную превалирующую частоту ослабляемых вибровозмущений;
- оценить степень ослабления гидроопорой уровней вибровозмущений;
- сформировать сигнал управления вязкостью жидкости в демпферном канале магнито-реологического трансформатора.

Для выполнения этих функций система управления должна содержать: датчики вибро-возмущений, полосовые частотные фильтры, систему обработки сигналов с выходов указанных фильтров, силовой полупроводниковый преобразователь частоты с блоками управления силовыми ключами.

Адаптивная система управления виброзащитной гидроопорой

Рассмотрим особенности использования разработанных моделей. Как следует из изложенного, возможно управлять динамическими свойствами системы, используя различные подходы:

- изменять настройку системы за счет задания определенного тока управления демпфера;
- использовать канал управления током демпфера, реализуя замкнутую систему регулирования с помощью стабилизирующей обратной связи, например, по ускорению.

Первый случай соответствует управлению по разомкнутому циклу. Во втором случае в активной системе виброзащиты управление током в обмотке демпфера осуществляется в функции координат (перемещение, скорость, ускорение) виброзащищаемого объекта, то есть значение коэффициента гидравлического сопротивления, в отличие от предыдущей модели, изменяется в процессе управления.

Для решения задачи снижения вибрации электромеханического комплекса на резонансной частоте предлагается использовать систему автоматического управления МРТ гидроопоры, принцип действия которой поясняется на рис. 2.

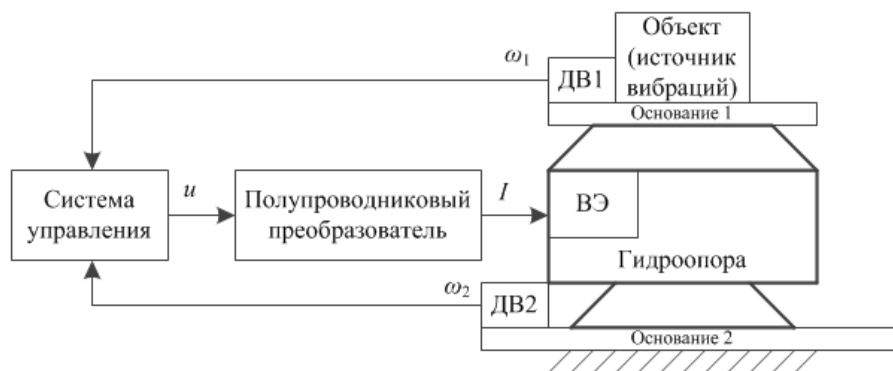


Рис. 2. Функциональная схема системы автоматического управления виброзащитной гидроопорой

На вход системы управления поступает информация о текущих колебаниях ω_1 с датчика вибраций (ДВ), установленного на гидроопоре - основании 1, на котором размещен источник вибрации. Датчик вибраций I может транслировать один из сигналов, которые пропорциональны перемещению, скорости или ускорению. Этот информационный сигнал обычно представляет собой сумму гармонических колебаний на частотах от 5 до 100 Гц.

Управляемую гидроопору можно представить как полосно-заграждающий фильтр. Частота настройки гидроопоры является частотой, которую подавляет полосно-заграждающий фильтр. Так как реальная гидроопора имеет резиновую обечайку, которая гасит высокочастотные гармоники, то гидроопору можно представить как последовательное соединение двух звеньев: полосно-заграждающего фильтра и передаточной функции резиновой обечайки.

Расчет передаточной функции гидроопоры W_d производился согласно выражению:

$$W_d = W_f \cdot W_a = \frac{r_0 s^2 + r_0 \omega_t^2}{s^2 + b \omega_t s + \omega_t^2} \cdot \frac{0,003s + 1}{0,005s + 1},$$

где W_f – передаточная функция полосно-заграждающего фильтра; W_a – передаточная функция обечайки; r_0 – коэффициент усиления; b – ширина заграждения; ω_i – частота настройки гидропоры.
 ЛАЧХ и ЛФЧХ гидропоры показаны на рис. 3.

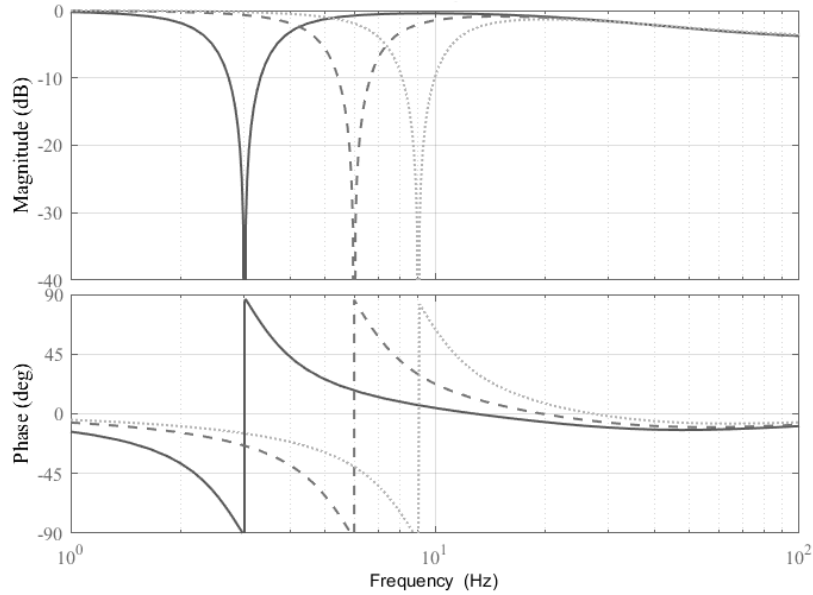


Рис. 3. ЛАЧХ и ЛФЧХ гидропоры, настроенной на 3, 6 и 9 Гц

Система обработки сигналов от вибродатчиков представлена на рис. 4. Она использует более простые алгоритмы, чем Фурье-анализ [10, 11].

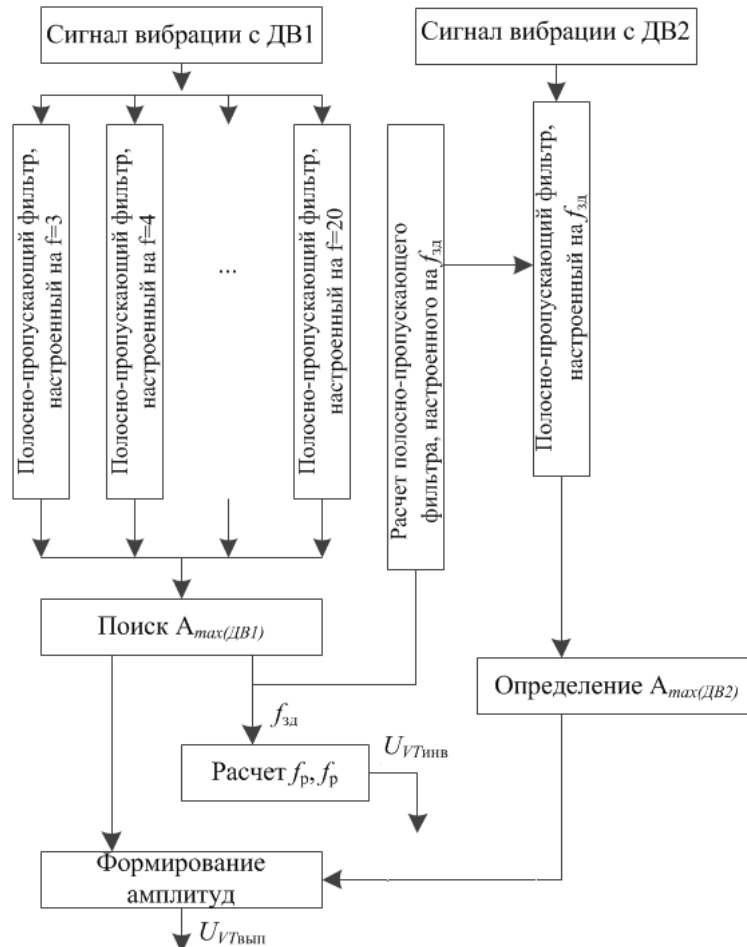


Рис. 4. Функциональная схема системы управления

Сигнал вибраций поступает на цифровые полосно-пропускающие фильтры в системе управления, настроенные с кратностью f от 3 до 20 относительно опорной частоты. Эти фильтры рассчитываются по соотношению

$$W_{pf} = \frac{r_0 \omega_t s}{s^2 + b \omega_t s + \omega_t^2},$$

где W_{pf} – передаточная функция полосно-пропускающего фильтра; r_0 – коэффициент усиления; b – ширина пропускания; $\omega_t = 0,2 \cdot \pi \cdot f$ – частота настройки.

На рис. 5 показаны ЛАЧХ полосно-пропускающих фильтров, настроенных на разные частоты (3, 6 и 9 Гц).

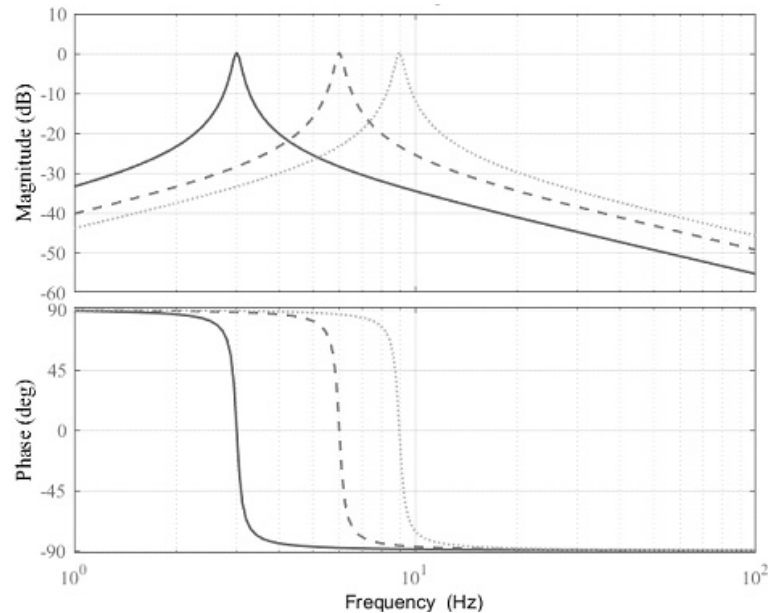


Рис. 5. ЛАЧХ полосно-пропускающих фильтров

Далее происходит сравнение выходных сигналов полосно-пропускающих фильтров для определения наибольшей амплитуды в заданном диапазоне частот. Система управления производит настройку гидропоры на частоту с наибольшей амплитудой и формирует сигнал u , управляющий ключами полупроводникового преобразователя. Под действием магнитного поля каналы, по которым протекает магнитная жидкость, «открываются» и «закрываются», т.е. преобразователь питает возбуждающий электромагнит (ВЭ) током намагничивания I , который влияет на вязкость магнитной жидкости.

Блок «Поиск A_{\max} » выполняет поиск наибольшей амплитуды A_{\max} и соответствующего этой амплитуде значения частоты $f_{зд}$. Значение $A_{\max(\text{ДВ1})}$ и $A_{\max(\text{ДВ2})}$ поступает на блок формирования амплитуды, где происходит расчет необходимого напряжения в звене постоянного тока преобразователя и формируется сигнал управления ключами выпрямителя $U_{VT\text{выпр}}$. Значение $f_{зд}$ поступает на блок расчета f_b, f_p , где происходит вычисление частот и длительностей сигналов возбуждения и размагничивания и формируется сигнал управления ключами инвертора $U_{VT\text{инв}}$.

Кроме датчика вибрации, установленного на гидропоре, используется второй датчик вибрации, установленный на основании 2. Сигнал вибрации с этого датчика необходим для оценки качества виброгашения. Сигнал с датчика вибрации ω_2 поступает на полосно-пропускающий фильтр. Частота пропускания этого фильтра равна частоте настройки гидропоры, и в системе управления анализируется амплитуда выходного сигнала. Это значение амплитуды может быть добавлено к максимальной амплитуде сигнала с частотой ω_2 , выделенной из спектра частот сигнала от первого датчика для более эффективного виброгашения. При этом частота настройки гидропоры не изменяется (рис. 6, а), а увеличивается напряжение возбуждения электромагнита (рис. 6, б).

В процессе управления МРТ гидропоры на обмотку возбуждающего электромагнита подается двухполярное напряжение возбуждения U_B , величина и частота f_B которого определяется системой управления.

Особенностью изменения управляющего напряжения возбуждения U_B при постоянных магнитных потоках в МРТ, заполненных магнитореологической жидкостью, является его изменение по линейному закону от значений частоты перестройки f_B (рис. 6).

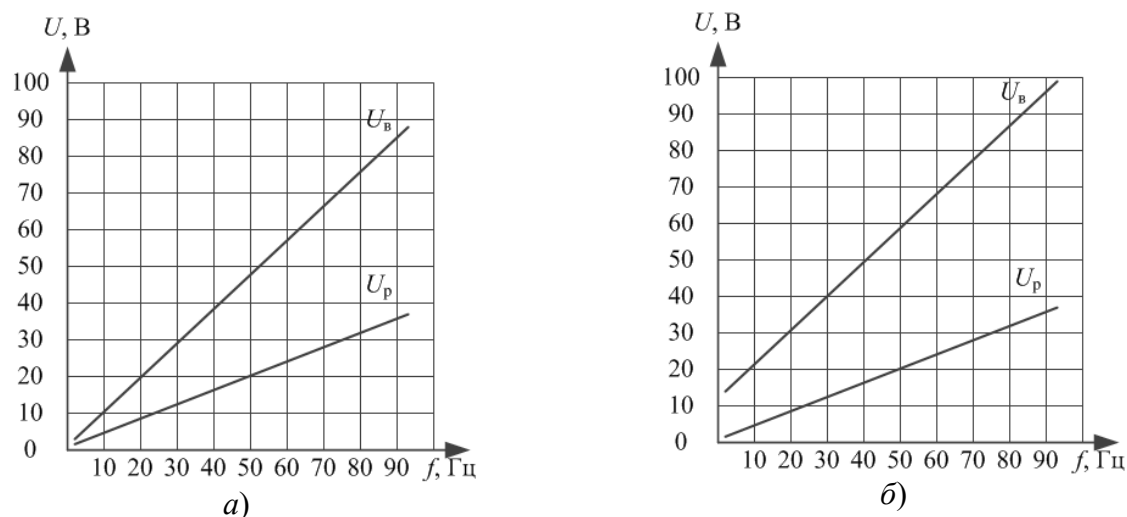


Рис. 6. Изменения напряжений возбуждения/размагничивания сердечников ВЭ и магнитной жидкости в зависимости от значений частоты перестройки f_B :
a – без использования ДВ2; *б* – при использовании ДВ2

3. Натурные испытания гидропоры с адаптивной системой управления магнитореологическим трансформатором

Центробежный вибростенд, предназначенный для испытаний на виброгашение, содержит механическую оснастку, позволяющую крепить различные типы гидропор с МРТ для измерения динамических АЧХ и ФЧХ в трех взаимно перпендикулярных направлениях по осям z , y , x . На центробежном вибростенде создается периодическая вибрация, имитирующая транспортную тряску. Фотография четырёх гидропор под нагрузкой в 108 кг на вибростоле вибростенда приведена на рис. 7.

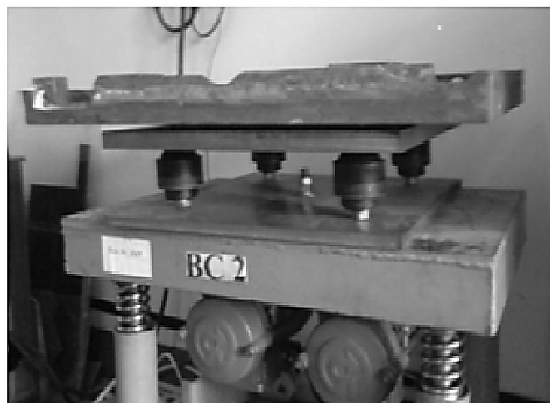


Рис. 7. Фотография четырёх гидропор под нагрузкой с массой в 108 кг на вибростенде

Источником колебаний вибростола являются два электромеханических вибратора, которые возбуждают дебалансами широкополосную низкочастотную вибрацию. Особенность низкочастотной вибрации состоит в том, что она слабо затухает в пространстве и, следовательно, в точку установки вибродатчика доходит вибрация от всех узлов вибростенда. В результате в

контрольной точке вибростола или в контрольной точке нагрузки виброизоляторов проявляется широкополосная низкочастотная случайная вибрация, которая характеризуется, как правило, большим количеством гармонических составляющих в области низких частот [12].

Сигналы вибрации, поступающие на ПЛИС, приведены на рис. 8, 10 и 12. Сигналы с основания – источника вибровозмущений – $vibro_1$ содержат основные гармоники на частотах соответственно 3, 6 и 9 Гц (рис. 8, *а*, рис. 10, *а* и рис. 12, *а*. На рис. 8, *б*, рис. 10, *б* и рис. 12, *б* представлены осциллограммы вибросигналов на защищаемом объекте – $vibro_2$.

Спектры измеренных сигналов виброускорений показаны на рис. 9, 11 и 13. Они иллюстрируют возможность использования адаптивной системы управления магнитоэрологическим трансформатором гидропоры, предложенной авторами.

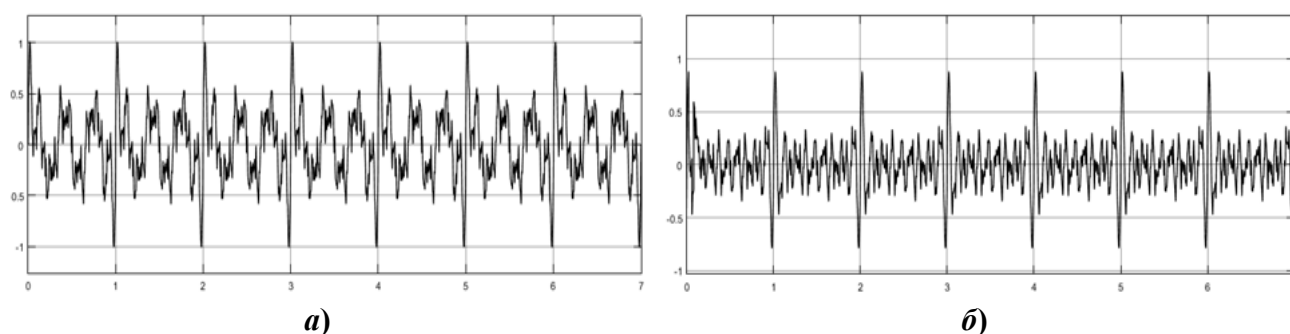


Рис. 8. Сигналы вибрации: *а* – $vibro_1$; *б* – $vibro_2$ с датчиков при основной частоте $f_1 = 3$ Гц

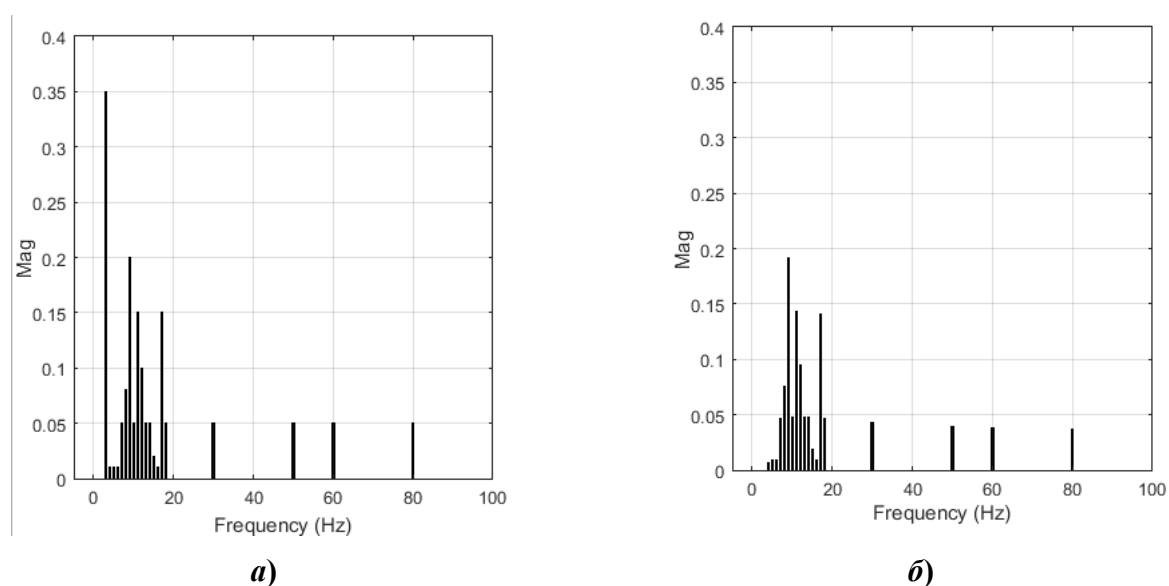


Рис. 9. Спектр сигналов вибрации: *а* – $vibro_1$; *б* – $vibro_2$

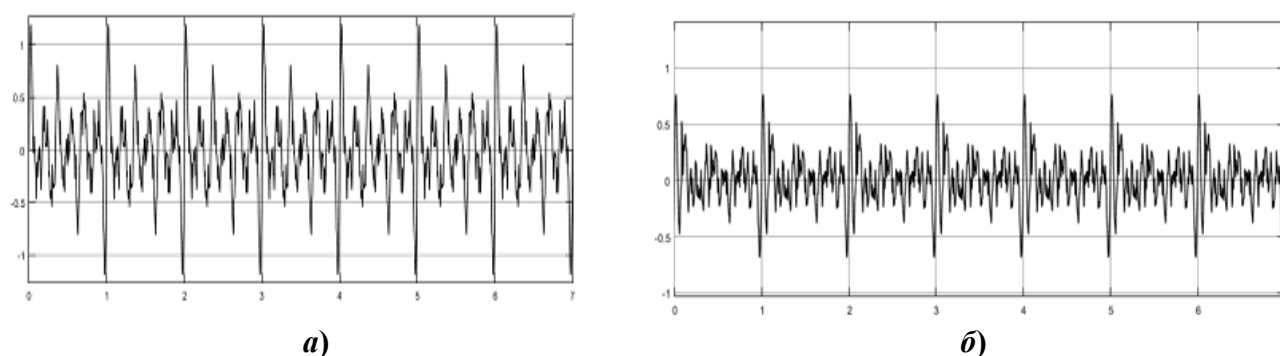


Рис. 10. Сигналы вибрации:
а – $vibro_1$; *б* – $vibro_2$ с датчиков при основной частоте $f_1 = 6$ Гц

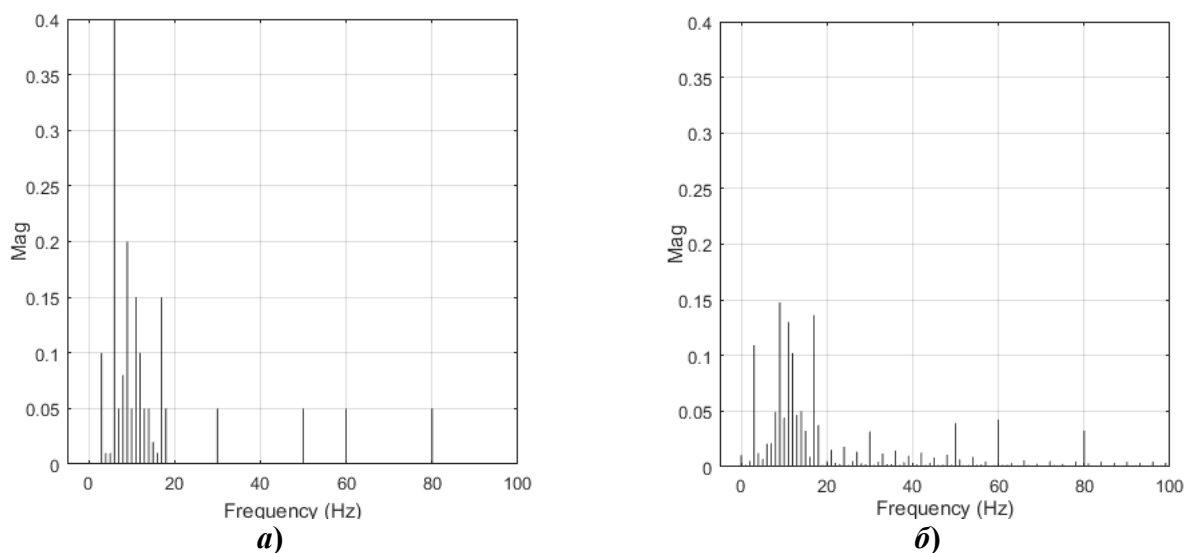


Рис. 11. Спектр сигналов вибрации: $a - vibro_1$; $b - vibro_2$

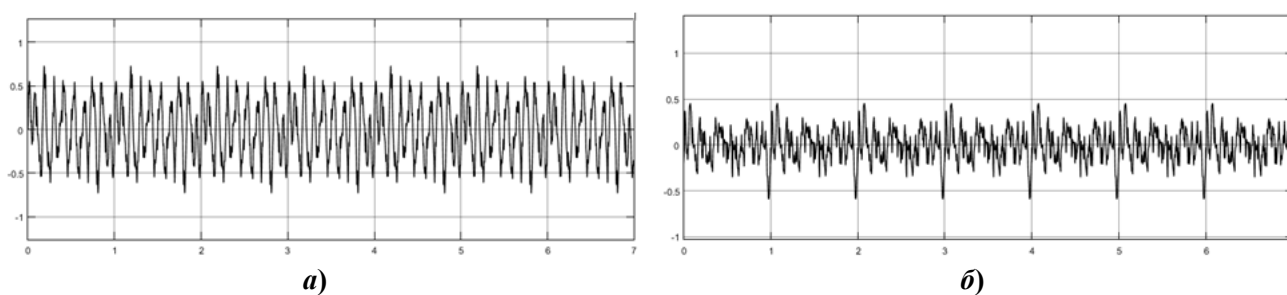


Рис. 12. Сигналы вибрации: $a - vibro_1$; $b - vibro_2$ с датчиков при основной частоте $f_1 = 9$ Гц

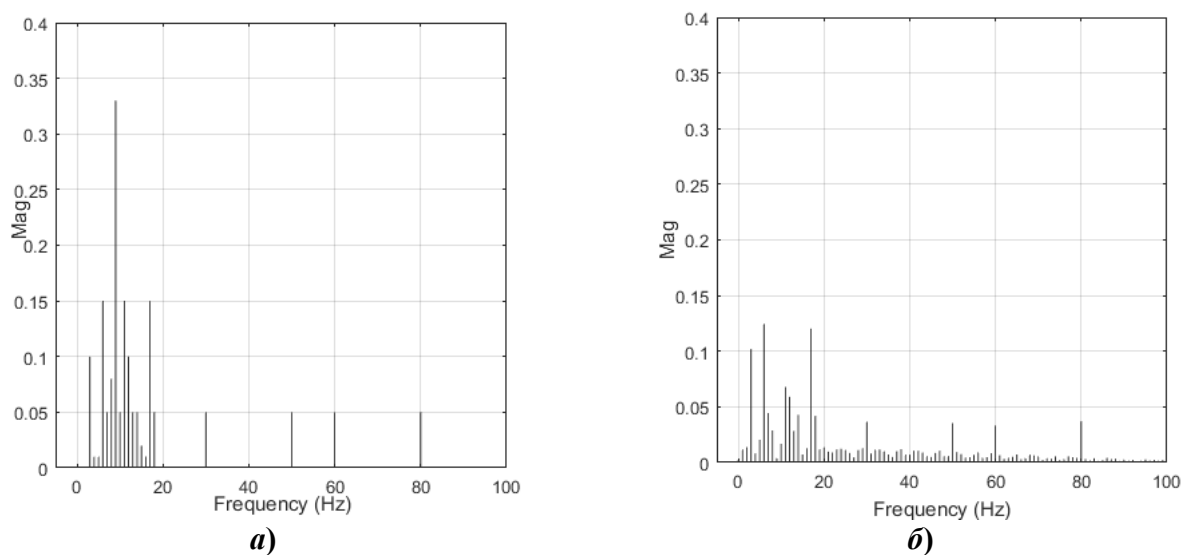


Рис. 13. Спектр сигналов вибрации: $a - vibro_1$; $b - vibro_2$

Заключение

Авторы считают, что дальнейшее решение проблемы виброзащиты машин и агрегатов связано с внедрением гидроопор с магнитореологическими трансформаторами и систем автоматического управления гидроопорами. Приведено описание элементов системы виброзащиты, разработана математическая модель гидравлической виброопоры с параметрическим

управлением, предложена структура и алгоритм работы адаптивной системы управления магнитореологического трансформатора виброзащитной гидропоры. Эта система управления позволяет автоматически производить перенастройку гидропоры на диапазон частот, соответствующий преобладающей частоте в спектре вибровозмущений.

Показаны порядок разработки конструкции и этапы использования метода модельно-ориентированного проектирования цифровой системы управления. Разработанная адаптивная система управления гидропорой с магнитореологическим трансформатором при экспериментальном исследовании показала работоспособность в актуальном диапазоне частот вибровозмущений.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект №15-19-10026).

Библиографический список

1. **Абакумов, А. М.** Электромеханические системы виброзащиты прецизионных объектов с использованием нейронных сетей / А.М. Абакумов, Г.Н. Мятлов, А.А. Винокуров // *Электротехника*. – 2008. – № 8. – С. 57–61.
2. **Израилович, М.Я.** Активное виброгашение вынужденных колебаний с использованием параметрического и силового воздействий / М.Я. Израилович, А.А. Гришаев. – М.: ЛИБРОКОМ, 2012. – 80 с.
3. **Feng, N.S.** Simulation of vibration signals from a rolling element bearing defect / N.S. Feng, E.J. Hahn, R.B. Randall. – Sydney: University of new south wales, 2004.
4. **Zhou, Q.** Semi-active control of three-dimensional vibrations of an inclined sag cable with magnetorheological dampers / Q. Zhou, S.R.K. Nielsen, W.L. Qu // *Journal of Sound and Vibration*. – 2006. – V. 296. – Is. 1-2. – P. 1–22.
5. **Guo, S.** Dynamic modeling of magnetorheological damper behaviors / S. Guo, S. Yang, C. Pan // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. – 2006. – V. 17. – Is. 3. – P. 3-14.
6. **Sahin, I.** Comparison of some existing parametric models for magnetorheological fluid dampers / I. Sahin, T. Engin, S. Cismeci // *Smart Materials and Structures*. – 2010. – V. 19. – Is. 3. – P. 1–11.
7. **Snyder, R.A.** Characterization and analysis of magnetorheological damper behavior under sinusoidal loading / R.A. Snyder, G.M. Kamath, N.M. Wereley // *AIAA Journal*. – 2010. – V. 39. – Is. 7. – P. 1240–1253.
8. **Giuclea, M.** Model parameter identification for vehicle vibration control with magnetorheological dampers using computational intelligence methods / M. Giuclea, T. Sireteanu, D. Stancioiu, C.W. Stammers // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. – 2004. – V. 218. – Is. 7. – P. 569–581.
9. **Гордеев, Б.А.** Физические основы и конструкция индукционного магнитореологического трансформатора гидропор / Б.А. Гордеев [и др.] // *Прикладная механика и технология машиностроения*. – 2011. – №2. – С. 52–68.
10. **Tinghsu, S.** Suppression control method for torque vibration of AC motor utilizing repetitive controller with Fourier transform / S. Tinghsu [et al.] // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2002. – V. 38. – Is. 5. – P. 1316–1325.
11. **Liao, W.H.** Harmonic analysis of a magnetorheological damper for vibration control / W.H. Liao, C.Y. Lai // *Smart Materials and Structures*. – 2002. – V. 11. – Is. 2. – P. 88–96.
12. **Охулков, С.Н.** Методы и устройства ослабления вибрации электромеханических комплексов: монография / С.Н. Охулков [и др.]; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород.: 2016. – 254 с.
13. **Гордеев, Б.А.** Оптимальное управление магнитореологическими трансформаторами гидропор в системах виброзащиты / Б.А. Гордеев [и др.] // *Прикладная механика и технология машиностроения*. – 2011. – №2. – С. 31–42.

*Дата поступления
в редакцию 05.07.2017*

A.I. Ermolaev, A.S. Plekhov, V.F. Strelkov, D.Y. Titov

**ADAPTIVE CONTROL SYSTEM OF SHOCK ABSORBER WITH
MAGNETOREOLOGICAL FLUID**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

The field of application of vibration isolators is very extensive and includes transport shock absorbers, industrial vibration isolators that improve the quality of machining of parts on metal cutting machines and reduce power losses in electromechanical drive and generating units, as well as vibration protection systems for optical instruments and building structures. The article proposes an adaptive vibration control system. Adaptive control system allows automatically change the parameters of the shock absorber, tuning it to the frequency prevailing in spectrum of vibration disturbance. The design of a controlled shock absorber and the functional control scheme are considered is considered. The control system is based on the use of band-pass filters. The experimental study was performed on a shake table. The stand contains a mechanical rig that allows mounting different types of shock absorbers for measuring dynamic amplitude-frequency characteristics along the z, y, x axes. Oscillograms of vibration and their spectra at various disturbance frequencies are presented.

Key words: vibration protection, adaptive control system, shock absorber test.