

Электротехника

УДК 681.518.3

АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВИБРОЗАЩИТЫ С УПРАВЛЯЕМЫМ ДЕМПФЕРОМ

А.М. Абакумов, Э.Г. Чеботков, Д.Г. Рандин

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассматривается система активной виброзащиты с исполнительным элементом в виде магнитореологического демпфера колебаний. Представлена расчетная схема одномассовой колебательной системы с одной степенью свободы. На основе полученных дифференциальных уравнений динамики колебательной системы разработана структурная схема для исследования ее динамических характеристик. На разработанной экспериментальной установке проведено исследование динамики колебательной системы при дискретном изменении управляющего воздействия на исполнительный механизм. Получены экспериментальные значения относительной амплитуды перемещения защищаемого объекта при различных частотах колебаний. Полученные экспериментальные данные аппроксимированы аналитическим выражением амплитудно-частотной характеристики, при помощи которого рассчитаны постоянные и переменные усилия, возникающие на штоке демпфера. По найденным расчетным значениям установлена зависимость между приращением силы сопротивления управляемого демпфера и приращением управляющего воздействия в виде тока на обмотке катушки демпфера.

Ключевые слова: *система активной виброзащиты, магнитореологический демпфер, структурная схема, динамические характеристики, колебания, экспериментальная установка.*

Возрастающие требования к качеству виброзащиты прецизионных металлообрабатывающих станков, измерительных комплексов, энергетических установок, транспортных средств и других объектов обуславливают все более широкое применение «активных» систем виброзащиты (АСВ) [1]. В качестве исполнительных элементов в таких системах используются звенья с управляемой жесткостью [2] или элементы с управляемым коэффициентом вязкого трения, в частности управляемые магнитореологические демпферы (МД) [3, 4].

Расчетная схема одномассовой системы виброзащиты с управляемым демпфером представлена на рис. 1. На рисунке обозначено: виброзащищаемый объект массой m , упругий элемент жесткостью C , неуправляемый и управляемый элементы вязкого трения (демпфер) с параметрами β_0 и β_u соответственно; Z –

Александр Михайлович Абакумов (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».

Эдуард Галактионович Чеботков (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».

Дмитрий Геннадьевич Рандин, ассистент кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».

перемещение виброзащищаемого объекта; Z_0 – кинематическое возмущение в виде перемещения основания.

Приращение усилия, создаваемого демпфером, для расчетной схемы представлено в виде

$$\Delta F = \beta_0 \Delta V + \beta_u \Delta \dot{V}.$$

Динамика рассматриваемой системы описывается дифференциальным уравнением

$$m \frac{d^2 Z}{dt^2} + (\beta_0 + \beta_u) \frac{d(Z - Z_0)}{dt} + C(Z - Z_0) = 0. \quad (1)$$

Передаточная функция (ПФ), соответствующая дифференциальному уравнению (1), где в качестве выходной переменной принято перемещение Z защищаемого объекта, а входной переменной – Z_0 , имеет вид

$$W_B(p) = \frac{Z(p)}{Z_0(p)} = \frac{\frac{\beta_0 + \beta_u}{C} p + 1}{\left[\frac{m}{C} p^2 + \frac{\beta_0 + \beta_u}{C} p + 1 \right]} = \frac{2\xi_1 T_1 p + 1}{T_1^2 p^2 + 2\xi_1 T_1 p + 1}, \quad (2)$$

где p – оператор Лапласа;

$$T_1 = \sqrt{\frac{m}{C}}, \quad 2\xi_1 T_1 = \frac{\beta_0 + \beta_u}{C}.$$

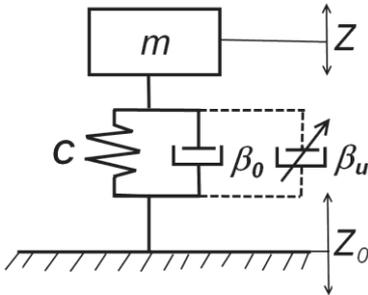


Рис. 1. Расчетная схема одномассовой системы виброзащиты

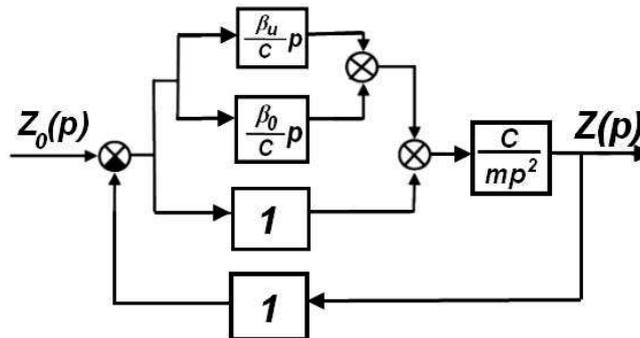


Рис. 2. Структурная схема системы

Разработанная с учетом ПФ (2) структурная схема (рис. 2) позволяет исследовать динамические характеристики разомкнутой по регулируемой переменной (перемещение) системы и оценить возможность снижения вибрационного поля за счет дискретного изменения регулирующего воздействия на МД. На рис. 3 представлена структура разработанной экспериментальной установки для исследования динамических характеристик исследуемой колебательной системы, где обозначено: ИУ – устройство для измерения перемещения защищаемого объекта (ЗО); МД – магнито-реологический демпфер, ток в обмотке электромагнита которого регулируется источником питания (ИП); ЭП – электропривод с двигателем постоянного тока, частота вращения которого задается с помощью задатчика (ЗД) [5]; редуктор (Р) служит для увеличения момента, передаваемого с электродвигателя на кривошип механизма.

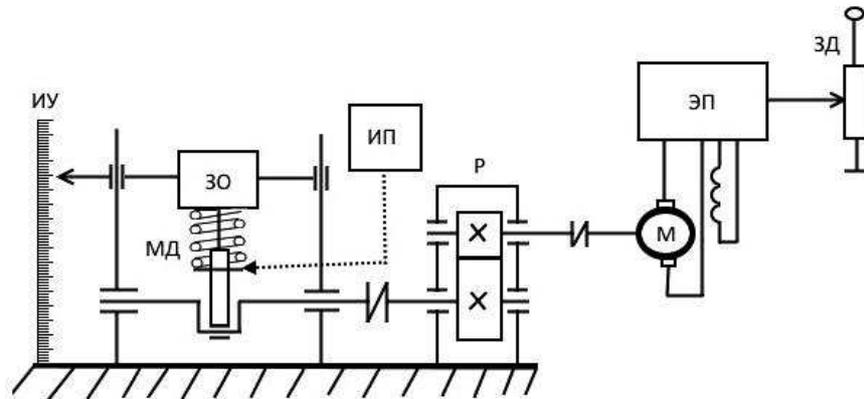


Рис. 3. Экспериментальная установка

В качестве исполнительного элемента в экспериментальной установке использован МД, конструкция которого описана в [6, 7]. Для уменьшения весогабаритных параметров колебательной системы нижняя опора пружины механически соединена с корпусом МД.

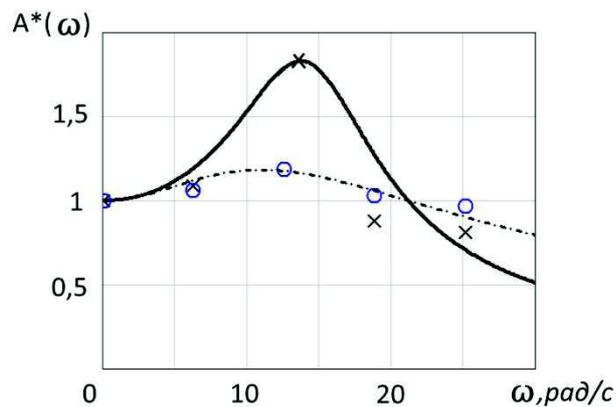


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики.
Экспериментальные значения: x – ток $I=0$; o – ток $I=2$ А

По результатам проведенных экспериментов на указанной выше установке получены (рис. 4) значения относительной амплитуды перемещений защищаемого объекта в колебательной системе, имеющей параметры $m = 80$ кг и $C = 18$ кН/м для различных значений тока I .

На рис. 4 экспериментальные значения относительной амплитуды перемещений защищаемого объекта аппроксимированы аналитическим выражением для амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), соответствующей ПФ (2):

$$A(\omega) = \sqrt{\frac{1 + (2\xi T\omega)^2}{(1 - T^2\omega^2)^2 + (2\xi T\omega)^2}}, \quad (3)$$

где ξ – коэффициент затухания.

С учетом того, что на резонансной частоте $\omega_C = 1/T$ соотношение (3) принимает вид

$$A(\omega_c) = \frac{\sqrt{1+4\xi^2}}{2\xi},$$

по экспериментальным значениям $A(\omega_c)$ при различных значениях тока I в обмотке МД рассчитаны значения $\xi(I)$.

С учетом соотношения

$$2\xi_1 T_1 = \frac{\beta_0 + \beta_u}{C} = F_0 + F_u, \quad (4)$$

где F_0 – постоянная сила вязкого сопротивления;
 F_u – переменная сила вязкого сопротивления, обусловленная током I ,
 найдены значения F_u и F_0 при изменении регулирующего воздействия на МД. Результаты расчетов представлены в таблице и отображены на графике (рис. 5, отмечены символом \times).

Результаты расчетов численных значений выражения (3)

I, A	0	1	2	3
ξ	0,35	0,5	0,8	1,7
$F_0, \text{мПас}$	45			
$F_u, \text{мПас}$	0	22	58	188

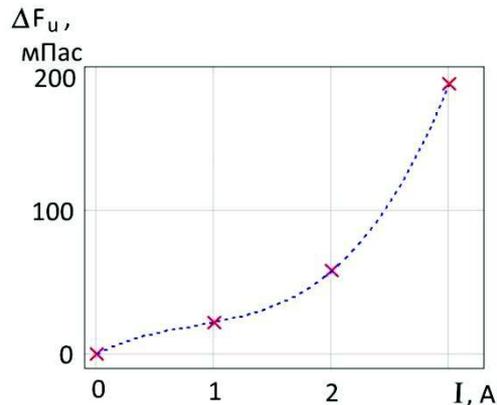


Рис. 5. График зависимости $\Delta F_u = f(I)$

В результате анализа полученных экспериментальных данных установлено, что полиномиальное уравнение регрессии

$$\Delta F_u(I) = 13,3I^3 - 33I^2 + 41,7I \quad (5)$$

обеспечивает минимальное значение средней ошибки аппроксимации (менее 1 %) при коэффициенте детерминации, равном 1. В случаях работы системы в режиме малых отклонений целесообразно использовать линейризованное выражение нелинейной зависимости (5)

$$\Delta F_u(I) = 39,9I^2 \cdot \Delta I_0 - 66I \cdot \Delta I_0 + 41,7 \cdot \Delta I_0, \quad (6)$$

где ΔI_0 – значение тока в точке линеаризации.

Полученные выражения (5) и (6) могут быть использованы для описания аналитически динамических свойств МД по каналу управления в виде передаточной функции звена.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Чегодаев Д.Е., Шатилов Ю.В.* Управляемая виброизоляция (конструктивные варианты и эффективность). – Самара: Самар. аэрокосм. ун-т, 1995. – 144 с.: ил.
2. *Abakumov A.M., Miatov G.N.* Control algorithms for active vibration isolation systems subject to random disturbance // *Journal of Sound and Vibration*. – № 289. – 2006. – P. 889-907.
3. *Prabakar R.S., Sujatha C., Narayanan S.* Response of a quarter car model with optimal magnetorheological damper parameters // *Journal of Sound and Vibration*. – Volume 332. – Issue 9. – 29 April 2013. – P. 2191-2206.
4. *Гордеев Б.А.* Системы виброзащиты с использованием инерционности и диссипации реологических сред / Гордеев Б.А., Ерофеев В.И., Синёв А.В., Мугин О.О. – М.: Физматлит, 2004. – 176 с. – ISBN 5-9221-0561-2.
5. *Мигунов А.Л., Кауров С.Ю.* Анализ и выбор перспективных постоянных магнитов для магнитных систем стартер-генераторных установок // *Вестник транспорта Поволжья*. – 2013. – № 1 (37). – С. 30-33.
6. *Рандин Д.Г.* Исследование динамических характеристик управляемого демпфера // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки*. – 2013. – № 2 (38). – С. 64-70.
7. *Абакумов А.М.* Исследование активной системы виброзащиты с управляемым магнитореологическим демпфером при случайном характере возмущения / Абакумов А.М., Рандин Д.Г., Чеботков Э.Г. // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки*. – 2014. – № 4. – С. 108-112.

Статья поступила в редакцию 10 сентября 2015 г.

THE ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF A CONTROLLED-DAMPER VIBRATION ISOLATION SYSTEM

A.M. Abakumov, E.G. Chebotkov, D.G. Randin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

The paper deals with a vibration isolation system with an actuator in the form of a magneto-rheological damper. A calculation scheme of a single-mass single-degree-of-freedom vibration system is presented. On the basis of the obtained differential equations of the vibration system dynamics, a structural scheme for the investigation into its dynamic performance is designed. On the developed experimental apparatus, the study of the vibration system dynamics under the conditions of the discrete change of the controlling action on the actuator is made. The experimental values of the relative amplitude of the protected object movement are received for the various vibration frequencies. The experimental data received are approximated by the analytical expression of the amplitude-frequency response. The constant and variable efforts appearing on the damper rod are calculated. On the basis of the calculated data is established the dependence between an increase in the controlled-damper resistance force and an increase in the damper-coil current.

Keywords: *vibration isolation system, magnetorheological damper, structure scheme, dynamic characteristic, vibration, experimental apparatus.*

*Alexander M. Abakumov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Eduard G. Chebotkov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Dmitry G. Randin, Assistant.*