

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ АКТИВНОЙ ВИБРОЗАЩИТЫ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ РЕГУЛЯТОРОВ

© 2015 А.М. Абакумов<sup>1</sup>, Д.Г. Рандин<sup>1</sup>, Д.Н. Азаров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Самарский государственный технический университет

<sup>2</sup> Волгоградская академия Министерства внутренних дел Российской Федерации

Статья поступила в редакцию 15.11.2015

В статье проведено сравнение эффективности системы активной виброзащиты при использовании различных типов регуляторов. На основании полученных ранее в других работах авторов аналитических зависимостей в виде передаточных функций звеньев системы автоматического управления виброзащитой синтезирован регулятор, обеспечивающий желаемый вид логарифмической амплитудно-частотной характеристики замкнутой системы. Эффективность замкнутой системы виброзащиты при действии возмущающего воздействия случайного характера оценивается по принятому квадратичному критерию качества. Проведено сравнение полученных расчетных значений принятого критерия качества при использовании оптимального и регулятор, обеспечивающий желаемый вид логарифмической амплитудно-частотной характеристики замкнутой системы.

*Ключевые слова:* система активной виброзащиты, частотные характеристики, оптимальный регулятор, критерий качества, управляемый магнитореологический демпфер.

В настоящее время получают широкое распространение системы активной виброзащиты с различными типами электромеханических исполнительных устройств, среди которых наиболее перспективны демпферы на основе магнитореологической жидкости [1, 2, 3].

Эффективность систем активной виброзащиты, существенно зависит от типа регулятора. Различные типы возмущающих воздействий требуют применения соответствующих типов регуляторов. В связи с этим, возникает вопрос об оценке эффективности регуляторов при действии различных типов возмущения.

Рассмотрена система активной виброзащиты (САВ) с магнитореологическим демпфером (МД) (рис. 1).

Для динамических звеньев структурной схемы на рис.1 в [4] получены аналитические выражения для передаточных функций (ПФ) элементов системы для приращений переменных:

– объекта виброзащиты по возмущению:

$$W_B(p) = \frac{\varepsilon_0(p)}{Z(p)} = \frac{p^2 [T_2 p + 1]}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}, \quad (1)$$

где  $T_1 = \sqrt{M/K}$ ;  $T_2 = (\beta_0 + \beta)/K$ ;  $T_1, T_2$  – постоянные времени;

$M$  – масса защищаемого объекта;  $K$  – жесткость упругого элемента;  $\beta$  – коэффициент гидравлического сопротивления МД;  $\beta_0$  – значение коэффициента гидравлического сопротивления МД в точке линеаризации.

– датчика ускорений:

$$W_D(p) = \frac{U_D(p)}{\varepsilon(p)} = k_D, \quad (2)$$

где  $k_D$  – коэффициент передачи.

– элементов системы виброзащиты, устанавливающих взаимосвязь между ускорением объекта  $\varepsilon_y$  и силой сопротивления демпфера  $F$ :

$$W_Y(p) = \frac{\varepsilon_y(p)}{F(p)} = \frac{k_Y p^2}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}, \quad (3)$$

где  $k_Y$  – коэффициент передачи.

– магнитореологического демпфера:

$$W_A(p) = \frac{F(p)}{U_P(p)} = \frac{k_A}{T_{A1}^2 p^2 + T_{A2} p + 1}, \quad (4)$$

где  $U$  – напряжение на обмотке электромагнита демпфера;

$k_A$  – коэффициент передачи демпфера;  $T_{A1}, T_{A2}$  – постоянные времени.

С учетом ПФ (1),(2),(3),(4) синтезирован регулятор САВ с МД с использованием логарифмических амплитудно-частотных характеристик (ЛАХ).

На рис. 2 представлены желаемая логарифмическая амплитудная частотная характеристика (ЛАХ)  $L_{ЗАМ}^{ЖЕЛ}(\omega)$  замкнутой САВ с МД.

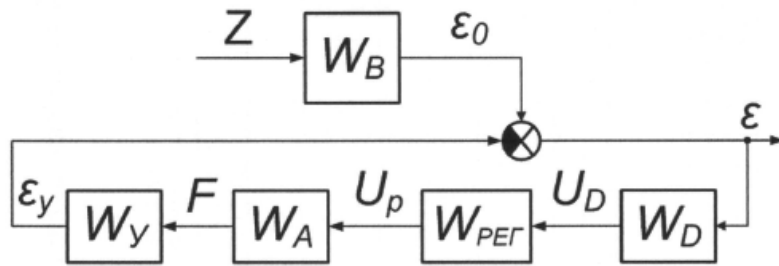
Вид желаемой ЛАХ  $L_{ЗАМ}^{ЖЕЛ}(\omega)$  сформирован с учетом необходимости снижения до некоторого требуемого значения  $A_0$  или в логарифмическом масштабе до  $L_0 = 20 \lg A_0$  виброускорений за-

Абакумов Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».

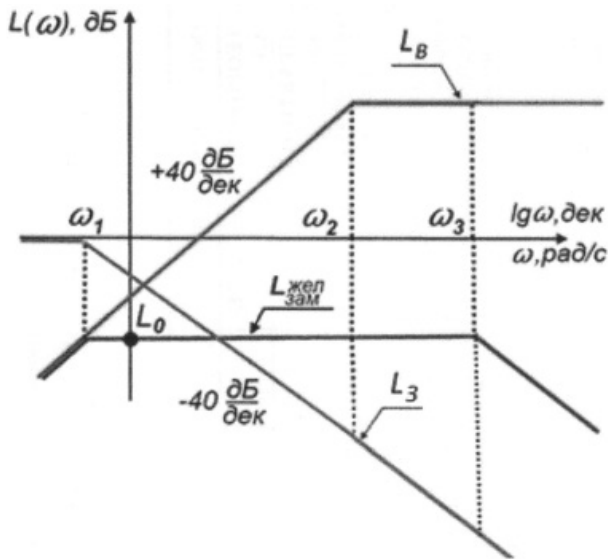
E-mail: abakimov-am@yandex.ru

Рандин Дмитрий Геннадьевич, ассистент кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование». E-mail: randin.dg@samgtu.ru

Азаров Дмитрий Николаевич, преподаватель кафедры «Физическая подготовка». E-mail: azarov29071984@mail.ru



**Рис. 1.** Структурная схема САВ с МД:  
Z – перемещение основания; ε – ускорение защищаемого объекта



**Рис. 2.** Частотные характеристики

защищаемого объекта в частотном диапазоне от  $\omega_1$  до  $\omega_2$  (или в логарифмическом масштабе от  $20 \lg \omega_1$  до  $20 \lg \omega_2$ ) [5].

Низкочастотный ( $\omega \leq \omega_1$ ) участок желаемой ЛАХ  $L_{ЗАМ}^{ЖЕЛ}(\omega)$  принят совпадающим с  $L_B(\omega)$  – это упрощает структуру регулятора. ЛАХ  $L_B(\omega)$  получена из ПФ (1) путем приравнивания к нулю постоянной времени  $T_2$  в числителе, определяющей свойства защищаемого объекта на резонансных частотах.

ЛАХ замкнутого контура  $L_3(\omega)$  определяется по выражению

$$L_3(\omega) = L_{ЗАМ}^{ЖЕЛ}(\omega) - L_B(\omega).$$

Передаточная функция замкнутого контура с учетом вида  $L_3(\omega)$  на рис.2 должна иметь вид

$$W_3(p) = \frac{\varepsilon_y(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{1}{T_5^2 p^2 + T_6 p + 1}, \quad (5)$$

где  $T_5 = 1/\omega_1$ ,  $T_6 = 2 \cdot \xi \cdot T_5$ ,  $\xi$  – коэффициент затухания.

ПФ динамических звеньев в цепи обратной связи

$$W_{РАЗ}(p) = \frac{\varepsilon_y(p)}{\varepsilon(p)} = W_y(p)W_A(p)W_{PEГ}(p)W_D(p) = \frac{B(p)}{A(p)}, \quad (6)$$

где  $A(p)$ ,  $B(p)$  – полиномы знаменателя и числителя соответственно.

Тогда ПФ замкнутого контура

$$W_3(p) = \frac{\varepsilon(p)}{\varepsilon_0(p)} = \frac{1}{1 + W_{РАЗ}(p)}. \quad (7)$$

С учетом (7) ПФ регулятора САВ с МД, обеспечивающего требуемую ЛАХ  $L_3(\omega)$  замкнутого контура, получена в виде

$$W_{PEГ}(p) = \frac{U_p(p)}{U_D(p)} = \frac{1 - W_3(p)}{W_y(p)W_A(p)W_D(p)W_3(p)}. \quad (8)$$

По указанной методике получена ПФ регулятора для САВ с МД и численными значениями параметров:  $m/C=0,01$ ,  $\omega_1=0.1$  рад/с,  $\omega_2=10$  рад/с,  $\beta_0=2800$

$$W_{PEГ}(p) = \frac{U_p(p)}{U_D(p)} = \frac{0,373p^4 + 21,4p^3 + 174,6p^2 + 1919,6p + 560,7}{p}. \quad (9)$$

В работе [6] синтезирован оптимальным регулятор САВ с МД

$$W_{PEГ}^{II}(p) = \frac{U_p(p)}{U_D(p)} = \frac{a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 + \frac{a_4}{p} + \frac{a_5}{p^2}}{(1 + a_6 p)}, \quad (10)$$

где  $a_0=5,3 \cdot 10^{-10}$ ;  $a_1=4,2 \cdot 10^{-6}$ ;  $a_2=8,9 \cdot 10^{-6}$ ;  $a_3=3,4 \cdot 10^{-4}$ ;  $a_4=2,6 \cdot 10^{-3}$ ;  $a_5=5,4 \cdot 10^{-3}$ ;  $a_6=0,19$ , для случайного возмущающего воздействия со спектральной плотностью мощности (СПМ)

$$S_\varphi(\omega) = \frac{2D\alpha}{\pi} \frac{\alpha^2 + \omega_0^2 + \omega^2}{(\alpha^2 + \omega_0^2 + \omega^2)^2 - 4\omega_0^2 \omega^2}, \quad (11)$$

где  $D$  – среднеквадратичное отклонение амплитуды колебаний;

$\alpha$  – коэффициент затухания;  $\omega_0$  – резонансная частота.

Численные значения СПМ (11) получены в [7] на основании экспериментальных исследований:  $D=16 \cdot 10^{-6}$  м,  $\alpha=2$  с $^{-1}$ ,  $\omega_0=20$  с $^{-1}$ .

Для оценки эффективности управления в замкнутой системе, при использовании регуляторов (9) и (10), принят квадратичный критерий качества управления в виде [8]

$$J = m^2 \langle x^2 \rangle + \langle u^2 \rangle =$$

$$= \int_0^{\infty} S_{\varphi}(\omega) \frac{m^2 + |W_{PEГ}(j\omega)|^2}{|A(j\omega) + B(j\omega)W_{PEГ}(j\omega)|^2} d\omega, \quad (12)$$

где  $m^2$  – неопределенный множитель Лагранжа;

$\langle x^2 \rangle$  – средний квадрат отклонения стабилизируемой координаты;

$\langle u^2 \rangle$  – средний квадрат регулируемого напряжения на обмотке МД;

$W_{PEГ}(j\omega)$  – комплексная частотная ПФ регулятора.

$A(j\omega), B(j\omega)$  – комплексные частотные функции числителя и знаменателя ПФ (6), соответственно

Результаты расчета численных значений принятого критерия качества управления (12) при использовании регулятора по выражению (9) (далее регулятор 1) и регулятора по выражению (10) (далее регулятор 2) представлены на рис. 3, где символу «●» соответствуют значения регулятора 1, а символу «■» – регулятора 2, полученные при вариации параметров  $\alpha$  и  $\omega_0$  СПМ в выражении (11).

Как следует из анализа графиков на рис. 3, регулятор 2 обеспечивает более низкие, в сравнении с регулятором 1, значения принятого критерия качества управления (12) – это объясняется тем, что структура регулятора 1 синтезирована без

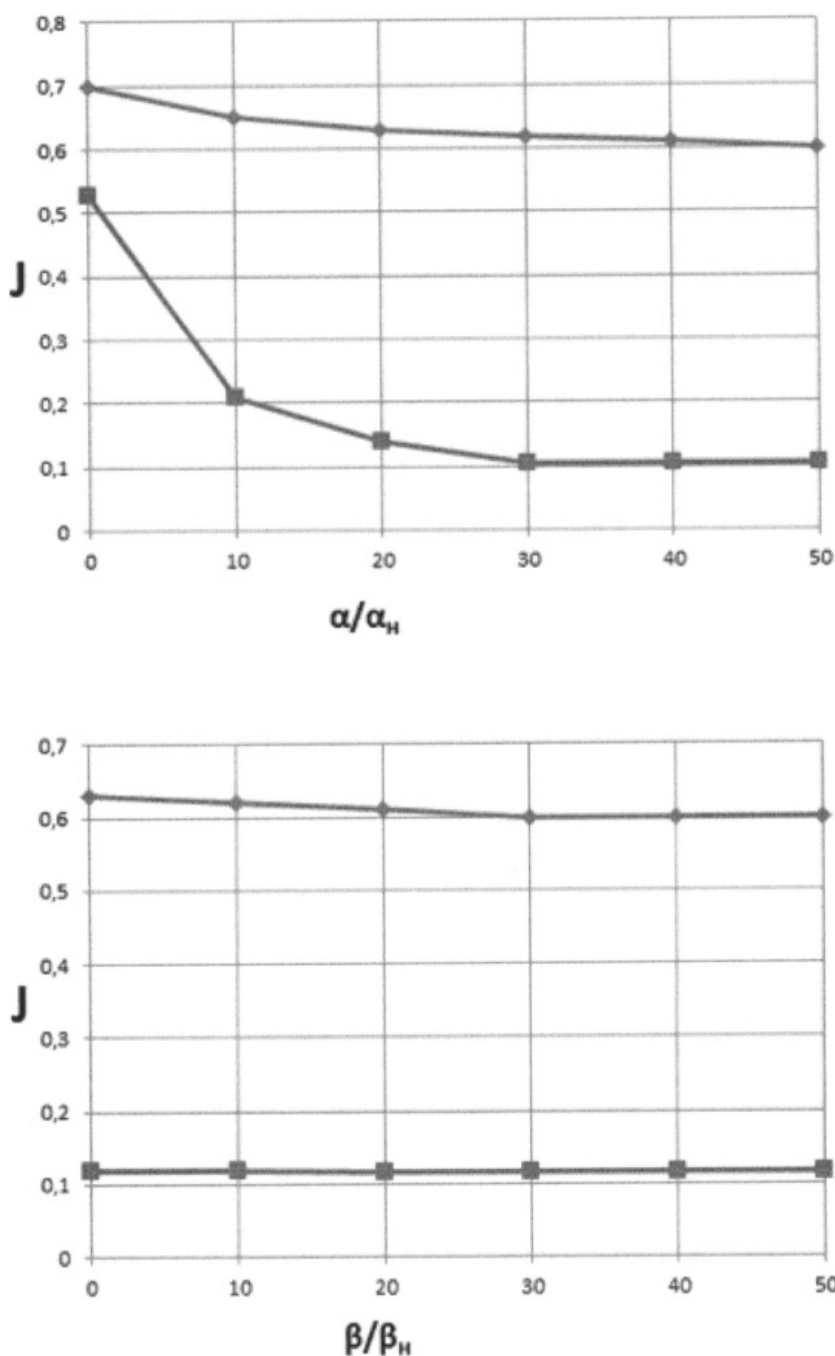


Рис. 3. Расчетные значения критерия качества управления

учета ограничений на мощность управления и множителя Лагранжа  $m^2$ . В связи с этим, регулятор 1 может быть использован в системах активной виброзащиты, где возможно воздействие как детерминированного, так и случайного характера. Регулятор 2 целесообразно использовать в системах активной виброзащиты, подверженных случайному возмущающему воздействию с заранее известными параметрами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Maryam Bitaraf, Osman E. Ozbulut, Stefan Hurlebaus, Luciana Barroso.* Application of semi-active control strategies for seismic protection of buildings with MR dampers // *Engineering Structures* № 32, 2010. Pp. 3040–3047.
1. *Wang Wei, Xia Pinqi.* Adaptive Control of Helicopter Ground Resonance with Magnetorheological Damper // *Chinese Journal of Aeronautics* № 20, 2007. Pp. 501-510.
3. *Cristiano Spelta, Fabio Previdi, Sergio M. Savaresi, Giuseppe Fraternali, Nicola Gaudiano.* Control of magnetorheological dampers for vibration reduction in a washing machine // *Mechatronics* № 19, 2009. Pp.410-421.
4. *Рандин Д.Г.* Исследование активной системы виброзащиты с управляемым демпфером // *Научно-технический вестник Поволжья.* 2012. №4. С.177-175.
5. Исследование динамических воздействий на блоки сложных изделий при морской транспортировке / *А.М. Абакумов, Г.Н. Мятлов, С.В. Широков, Д.Г. Рандин* // *Вестник МГТУ Станкин.* 2012. № 4 (23). С. 56-59.
6. Исследование системы активной виброзащиты с управляемым магнитореологическим демпфером при случайном характере возмущения / *А.М. Абакумов, Э.Г. Чеботков, Д.Г. Рандин* // *Вестник Самарского государственного технического университета.* Серия «Технические науки». 2014. №4(44).
7. *Abakumov A.M., Miatov G.N.* Control algorithms for active vibration isolation systems subject to random disturbance // *Journal of Sound and Vibration.* №289, 2006. Pp.889-907.
8. *Абдулаев Н.Д., Петров Ю.П.* Теория и методы проектирования оптимальных регуляторов. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-е, 1985. 240 с.

#### RESEARCH OF THE EFFECTIVENESS OF THE ACTIVE VIBRATION ISOLATION SYSTEM WITH DIFFERENT TYPES OF REGULATORS

© 2015 A.M.Abakumov<sup>1</sup>, D.G. Randin<sup>1</sup>, D.N. Azarov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Samara State Technical University

<sup>2</sup> Volgograd Academy of Ministry of Internal Affairs of Russia Federation

In article comparison of effectiveness of active vibration isolation system with various types of regulators is carried out. On the basis of received earlier in other articles of authors of analytical dependences in the form of transfer functions of links of system of automatic control of vibroprotection the regulator providing a desirable type of the logarithmic amplitude-frequency characteristic of the closed system is synthesized. On the basis of received earlier in other authors articles of analytical dependences in the form of transfer functions of object of vibration isolation system the regulator providing a desirable type of the logarithmic amplitude-frequency characteristic of the closed loop system is synthesized. Efficiency of the closed loop vibration isolation system at action of the random disturbance with variable parameters is estimated by the accepted square criterion of quality. Comparison of the received calculated data of the adopted criterion of quality with using optimal and the regulator providing a desirable form of the logarithmic amplitude-frequency characteristic of the closed loop system is carried out.

*Keywords:* active vibration isolation system, frequency response, optimal regulator, quality criterion, controlled magnetorheological damper.

*Alexander Abakumov, Doctor of Technics, Professor at the Electromechanics and automobile electric equipment Department. E-mail: abakumov-am@yandex.ru*

*Dmitry Randin, Assistant Lecturer at the Electromechanics and Automobile Electric Equipment Department. E-mail: randin.dg@samgtu.ru*

*Dmitry Azarov, Lecturer at the Physical Training Department. E-mail: azarov29071984@mail.ru.*

Сдано в набор 20.10.2015 г.

Подписано к печати 17.12.2015 г.

Формат бумаги 60x80<sup>1</sup>/<sub>8</sub>

Офсетная печать Усл. печ. л. 17,6

Усл. кр-отт. 6,3

Уч-изд.л. 13,8

Тираж 200 экз. Зак.