

Электротехника

УДК 681.518.3

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ АКТИВНОЙ ВИБРОЗАЩИТЫ С УПРАВЛЯЕМЫМ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИМ ДЕМПФЕРОМ ПРИ СЛУЧАЙНОМ ХАРАКТЕРЕ ВОЗМУЩЕНИЯ

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

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

E-mail: em@samgtu.ru

Рассматривается замкнутая система активной виброзащиты прецизионного оптико-механического комплекса, подверженная случайному кинематическому возмущающему воздействию. В качестве исполнительного элемента используется магнитоэологический демпфер. В работе использована методика синтеза оптимальных регуляторов, обеспечивающих устойчивость замкнутой системы и минимум принятого показателя качества. Показано, что упрощение структуры оптимального регулятора не вызывает значительного ухудшения показателя качества управления замкнутой системы. Исследуется влияние вариации параметров случайного возмущения на показатель качества управления в замкнутой системе.

Ключевые слова: случайные возмущения, магнитоэологический демпфер, система активной виброзащиты, показатель качества управления, оптимальное управление, квазиоптимальный регулятор.

В настоящее время актуальной является задача повышения качества виброзащиты за счет применения электромеханических исполнительных устройств. Анализ публикаций в исследуемой области [1, 2, 3, 4] показывает широкий интерес к использованию электромеханических исполнительных устройств в виде магнитоэологических демпферов колебаний.

В качестве виброзащищаемого объекта рассматривается прецизионный оптико-механический комплекс, предназначенный для аттестации длиннофокусных объективов космических аппаратов [5].

Структурная схема замкнутой САВ с МД представлена на рис. 1.

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».

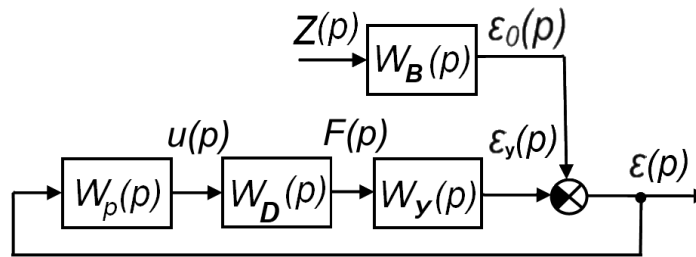


Рис. 1. Структурная схема замкнутой САВ с МД:

Z – кинематическое возмущающее воздействие со стороны фундамента;
 ε_0 – ускорение защищаемого объекта в разомкнутой системе виброзащиты;
 ε_y – ускорение защищаемого объекта по каналу управления;
 ε – ускорение защищаемого объекта в замкнутой системе виброзащиты;
 F – сила сопротивления МД; u – регулируемое напряжение на обмотке МД

Для структурной схемы САВ с МД, представленной на рис. 1, в [6] получено описание динамических свойств звеньев в форме передаточных функций для приращения переменных.

Для объекта виброзащиты по возмущению

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

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 СВ;
 β – гидравлическое сопротивление МД;
 β_0 – значение гидравлического сопротивления МД в точке линеаризации;
 $A(p), C(p)$ – полиномы знаменателя и числителя соответственно.

Для объекта виброзащиты по управлению

$$W_y(p) = \frac{\varepsilon_y(p)}{F(p)} = \frac{k_y p^2}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1} = \frac{B(p)}{A(p)}, \quad (2)$$

где k_y – коэффициент передачи;
 $B(p)$ – полиномы знаменателя и числителя соответственно.

Передаточная функция МД

$$W_D(p) = \frac{F(p)}{u(p)} = \frac{k_{ИЭ}}{T_{ИЭ1}^2 p^2 + T_{ИЭ2} p + 1}, \quad (3)$$

где $k_{ИЭ}$ – коэффициент передачи МД;
 $T_{ИЭ1}, T_{ИЭ2}$ – постоянные времени.

В работе [7] на основании экспериментальных исследований установлено, что кинематические воздействия со стороны фундамента можно рассматривать как случайный процесс со спектральной плотностью мощности (СПМ)

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

где D – среднеквадратичное отклонение амплитуды колебаний;
 α – коэффициент затухания;
 ω_0 – резонансная частота,
и найденными численными значениями параметров

$$D=16 \cdot 10^{-6} \text{ м}, \alpha=2 \text{ с}^{-1}, \omega_0=20 \text{ с}^{-1}.$$

Для оценки эффективности управления в замкнутой системе примем квадратичный критерий качества управления в виде

$$J = m^2 \langle x^2 \rangle + \langle u^2 \rangle, \quad (5)$$

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.

По методике синтеза оптимальных регуляторов [8], обеспечивающих устойчивость замкнутой системы и минимум принятого критерия качества управления (5), получена ПФ оптимального регулятора

$$W_p^o(p) = \frac{u(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 + \frac{a_4}{p} + \frac{a_5}{p^2}}{(1 + a_6 p)}, \quad (6)$$

где $a_0=5,3 \cdot 10^{-10}$; $a_1=4,2 \cdot 10^{-6}$; $a_2=8,9 \cdot 10^{-6}$; $a_3=3,4 \cdot 10^{-4}$; $a_4=2,6 \cdot 10^{-3}$; $a_5=5,4 \cdot 10^{-3}$;
 $a_6=0,19$.

Необходимо отметить, что регулятор (7) следует рассматривать как идеальный, поскольку с точки зрения технической реализации получение сигналов, пропорциональных первой и второй производной от регулируемой координаты $\varepsilon(p)$, затруднительно – это связано с необходимостью реализации операции идеального дифференцирования. В связи с этим представляется целесообразным оценить возможность использования упрощенного (квазиоптимального) регулятора, полученного из (6), приравниванием нулю весовых коэффициентов a_0 , a_1 , a_2 . Для обоснованного решения этого вопроса проведена оценка потерь качества управления при использовании квазирегуляторов.

Значение принятого среднеквадратичного критерия качества управления (5) для известной ПФ регулятора в замкнутой системе рассчитывается по выражению [7]

$$J = \int_0^{\infty} S_{\varphi}(\omega) \frac{m^2 + |W_P(j\omega)|^2}{|A(j\omega) + B(j\omega)W_P(j\omega)|^2} d\omega, \quad (7)$$

где $W_p(j\omega)$ – комплексная частотная ПФ регулятора.

На рис. 2 показаны рассчитанные по выражению (6) в прикладной программе MathCAD значения критерия оптимизации J в условиях вариации параметров

СПМ возмущающего воздействия для САВ с оптимальным (кривая 1) и квази-оптимальным регулятором (кривая 2). За номинальные значения параметров СПМ (4) α_n и ω_0 приняты приведенные выше значения.

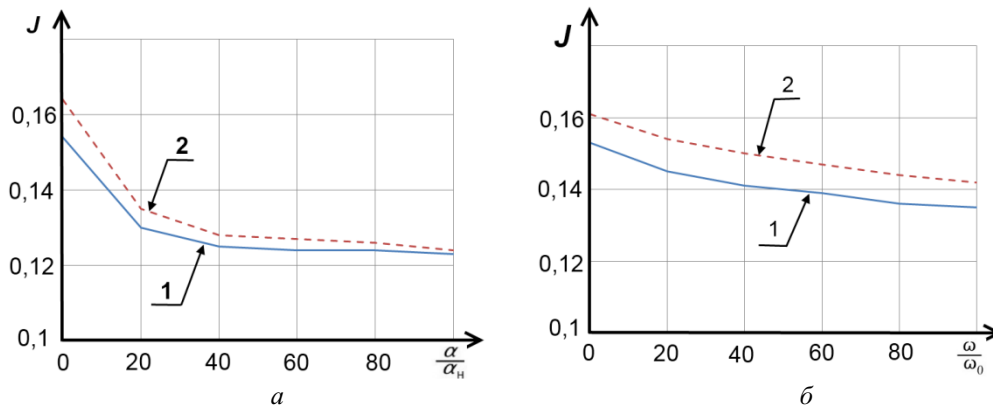


Рис. 2. Графики зависимости критерия качества управления J от вариации параметров α и ω СПМ возмущающего воздействия

Анализ графиков на рис. 2 а, б свидетельствует о следующем. Ухудшение критерия качества управления J при использовании квазиоптимального регулятора не превышает 6 % относительно оптимального. Таким образом, упрощение структуры регулятора не приводит к значительному ухудшению значений показателя качества управления J , что обосновывает возможность перехода к использованию квазирегулятора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Maryam Bitaraf, Osman E. Ozbulut, Stefan Hurlbaus, Luciana Barroso.* Application of semi-active control strategies for seismic protection of buildings with MR dampers // *Engineering Structures* № 32, 2010. – Pp. 3040–3047.
2. *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. *Prabakar R.S., Sujatha C., Narayanan S.* Optimal semi-active preview control response of a half car vehicle model with magnetorheological damper // *Journal of Sound and Vibration* № 326, 2009. – Pp. 400-420.
5. *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.
6. *Рандин Д.Г.* Исследование активной системы виброзащиты с управляемым демпфером // *Научно-технический вестник Поволжья.* – 2012. – № 4. – С. 177-185.
7. *Мятов Г.Н.* Алгоритмы управления и активная виброзащитная система прецизионного оптико-механического комплекса: Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07 / Самар. гос. техн. ун-т. Защищена 17.11.2000, утв. 14.03.2001. – Самара, 1998. – 158 с.
8. *Петров Ю.П.* Новые главы теории управления и компьютерных вычислений. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 192 с.: ил. ISBN 5-94157-452-5.
9. *Петров Ю.П.* Вариационные методы теории оптимального управления. Изд. 2-е, перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1977.

Статья поступила в редакцию 1 октября 2014 г.

RESEARCH OF ACTIVE VIBRATION PROTECTION SYSTEM WITH CONTROLLED MAGNETORHEOLOGICAL DAMPER AT RANDOM DISTURBANCE

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

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

The paper deals with the closed-loop active vibration protection system of precision optical-mechanical complex exposed to random cinematic disturbance. The magnetorheological damper is used as actuating element. Method of optimum regulator synthesis is used; it provides the sustainable operation of the closed-loop system and minimal approved quality index. The paper shows that simplification of the optimal regulator structure has no significant negative effect on control quality index of the closed-loop system. Effect of the random disturbance parameter variation on control quality index in the closed-loop system is studied.

Keywords: *random disturbance, magnetorheological damper, active vibration isolation system, criterion of control quality, optimal control, quasi-optimal regulator.*

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