

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УПРАВЛЯЕМОГО ДЕМПФЕРА

Д.Г. Рандин

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

E-mail: *em@samgtu.ru*

Приведены результаты исследования динамических характеристик управляемого магнитореологического демпфера. Определены параметры зависимости гидравлического сопротивления управляемого магнитореологического демпфера от угловой частоты колебаний его подвижной части и тока в обмотке электромагнита. Установлено, что динамические характеристики управляемого магнитореологического демпфера близки к характеристикам аperiodического звена.

Ключевые слова: *управляемый демпфер, коэффициент гидравлического сопротивления, логарифмическая амплитудная частотная характеристика, передаточная функция.*

В настоящее время широкое внедрение получают системы виброзащиты с управляемыми электромеханическими исполнительными элементами [1]. Простота конструкции и сниженные массогабаритные показатели способствуют применению магнитореологических управляемых демпферов в «активных» системах виброзащиты. На рис. 1 представлена конструкция управляемого магнитореологического демпфера (УД), разработанная Delphi Corporation [2].

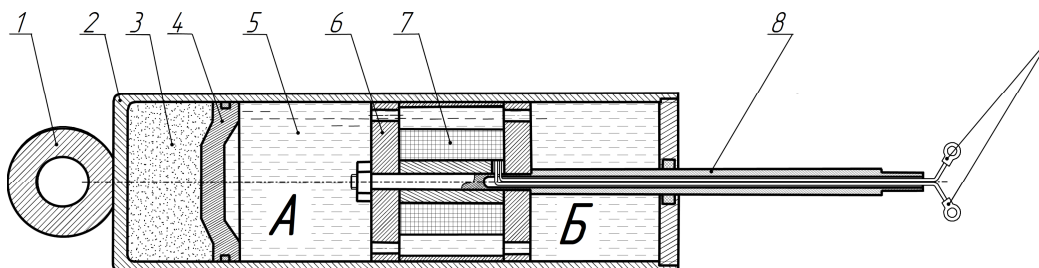


Рис. 1. Магнитореологический демпфер

УД работает следующим образом. Приложенное к штоку 8 усилие на режиме «сжатие» заставляет перемещаться поршень 6 с обмоткой 7 вдоль корпуса демпфера 2 по направлению к нижнему креплению демпфера 1, что сопровождается перетеканием магнитореологической жидкости 5 (МРЖ) через дроссельные каналы поршня демпфера 6 из полости А в полость Б. Кавитация МРЖ, возникающая при резких перемещениях поршня демпфера, устраняется поджатием МРЖ через поршень 4 газом (азот) 3, закачанным под давлением 15-20 кс/см². Контакты 9 служат для подвода напряжения к обмотке электромагнита 7, влияющего на степень вязкости МРЖ, что изменяет силу сопротивления, развиваемую магнитореологическим демпфером.

Представляет интерес исследование динамических характеристик УД с целью

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

аналитического описания его демпфирующих свойств.

Проведено исследование характеристик демпфера на автоматизированном комплексе диагностики амортизаторов подвесок автотранспортных средств Centurion, разработанном в ООО НПП «Система Технологий» [3].

Кинематическая схема комплекса представлена на рис. 2.

Основные паспортные данные диагностического комплекса Centurion представлены в табл. 1.

Характеристики демпфера сняты для шести фиксированных значений частоты вращения ω кривошипно-шатунного механизма (КШМ). Линейная скорость точки B вдоль оси y определяется по выражению [4]

$$v = R\omega(\sin \omega t + \frac{1}{2}\lambda \sin 2\omega t). \quad (1)$$

Циклическая частота f_D связана с частотой ω известным соотношением

$$f_D = \frac{\omega}{2\pi}. \quad (2)$$

В табл. 2 представлены полученные экспериментально, путем обработки данных с датчика усилий (поз. 2, рис. 2), максимальные по модулю значения силы сопротивления F на штоке демпфера за период колебаний заданной линейной скорости v , снятые при различных значениях тока I в обмотке электромагнита, а также максимальные по модулю значения линейной скорости v точки B демпфера за период колебаний.

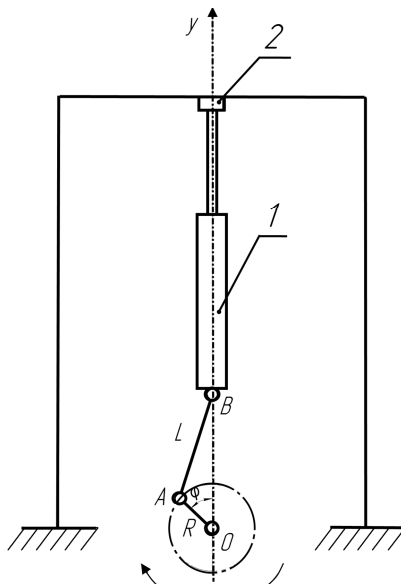


Рис. 2. Кинематическая схема диагностического комплекса Centurion:
 AB – шатун длиной L ; AO – кривошип радиусом R ; ω – частота вращения кривошипа; $\lambda = R/L$ – постоянная кривошипно-шатунного механизма; 1 – магнито-реологический демпфер; 2 – датчик усилий

Таблица 1

Основные паспортные данные диагностического комплекса Centurion

Длина шатуна, м	0,19
Радиус кривошипа, м	0,05
Ход демпфера при диагностике, м	0,1
Минимальная скорость движения демпфера, м/с	0,01
Максимальная скорость движения демпфера, м/с	0,8
Максимальное контролируемое усилие демпфера, кг	500
Погрешность измерений, %	Не более 2

Таблица 2

Значения силы сопротивления F на штоке демпфера и максимальные по модулю значения линейной скорости v точки B

F , кН при $I = 0$ А	F , кН при $I = 2,5$ А	F , кН при $I = 5$ А	ω , рад/с	v , м/с	f_D , Гц
192	575	643	0,26	0,013	0,041
493	1213	1421	0,98	0,05	0,156
596	1587	1965	2,06	0,103	0,328
763	1780	2370	4,74	0,24	0,754
821	1836	2430	6,22	0,31	0,99
856	1851	2456	7,72	0,39	1,23

На рис. 3 показаны графики зависимостей максимальной силы F сопротивления на штоке демпфера от соответствующей максимальной линейной скорости v его подвижной части, полученные для режима «сжатие» при различных значениях тока I^* , протекающего по обмотке электромагнита.

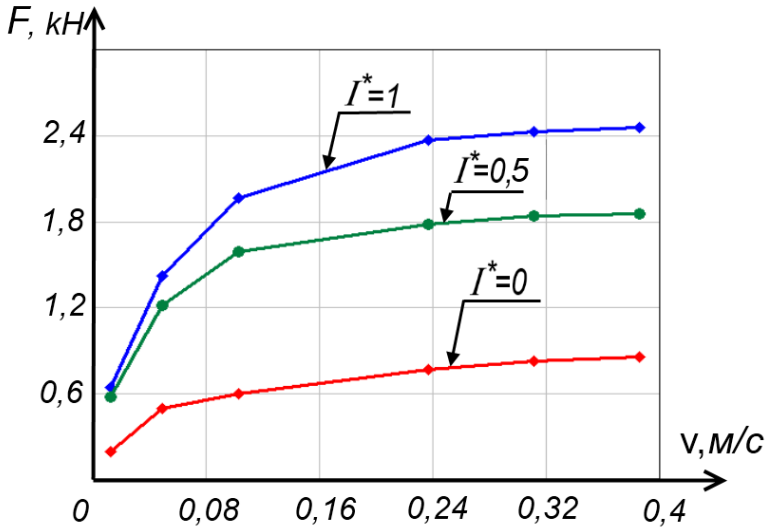


Рис. 3. Графики зависимости силы F сопротивления на штоке демпфера от линейной скорости v его подвижной части

Величина тока $I^* = \frac{I_T}{I_{\max}}$ на рис. 3 представлена в системе относительных единиц и определяется как отношение текущего значения тока I_T к значению тока I_{\max} , равного 5 А.

Нелинейный вид характеристик на рис. 3 обусловлен наличием сухого трения, а также особенностями конструкции УД: при малых линейных скоростях v и токе $I^* = 0$ МРЖ под малым напором перетекает через дроссельные каналы поршня из полости А демпфера в полость Б. Сила сопротивления F в этом случае растет примерно пропорционально значению v . При дальнейшем увеличении v возрастает напор МРЖ, а также растет давление МРЖ на поршень газового «подпора» (поз. 4, см. рис. 1), что заставляет его при превышении определенного значения давления перемещаться и сжимать закаченный газ – это ограничивает рост давления со стороны поршня на МРЖ и рост силы F сопротивления демпфера, изолируя таким образом защищаемый объект от вибровозмущений с большой f_d .

На рис. 4 крестиками показаны экспериментальные значения коэффициента гидравлического сопротивления β

$$\beta = \frac{F}{v}, \quad (3)$$

при $I^* = 0$ на ходе «сжатия» для различных значений частоты ω .

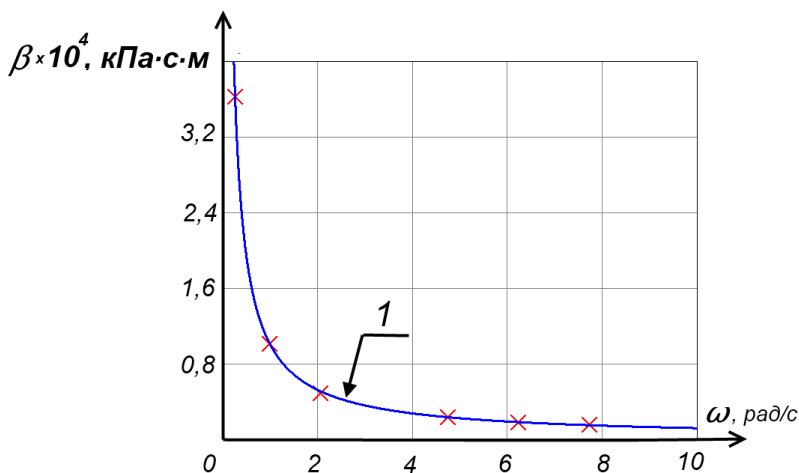


Рис. 4. График зависимости β от частоты ω :
1 – аппроксимирующая функция; x – экспериментальные значения

Экспериментальные значения β при соответствующих ω могут быть аппроксимированы степенной функции вида

$$\beta_A = B \cdot \omega^C, \quad (4)$$

где B , C – неизвестные коэффициенты, численное значение которых найдено с помощью метода наименьших квадратов (МНК) [5], доставляющего минимум суммы квадратов отклонений рассчитанных значений искомой величины от ее экспериментальных данных. Согласно МНК неизвестные коэффициенты для аппроксимирующей функции вида (4) найдены из выражений

$$\left\{ \begin{array}{l} C = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n \ln \beta_i \ln \omega_i - \sum_{i=1}^n \ln \beta_i \cdot \sum_{i=1}^n \ln \omega_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n (\ln \omega_i)^2 - (\sum_{i=1}^n \ln \omega_i)^2} ; \\ B = \exp\left(\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \ln \beta_i - B \cdot \sum_{i=1}^n \ln \omega_i\right)\right), \end{array} \right. \quad (5)$$

где n – количество экспериментальных данных.

Подстановкой экспериментальных значений β при соответствующих ω в (5) получены численные значения для неизвестных коэффициентов аппроксимации

$$B = 9939,4, C = -0,94.$$

Достоверность выбора аппроксимирующей модели оценивалась по величине средней ошибки аппроксимации Δ

$$\Delta = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left| \frac{\beta_i - \beta_{Ai}}{\beta_{Ai}} \right| \cdot 100\%, \quad (6)$$

где β_i – i -е экспериментальное значение β ; β_{Ai} – i -е значение β по аппроксимирующей функции (4).

Величина средней ошибки аппроксимации Δ , рассчитанная по (6), не превысила 2 %, что свидетельствует о правильности выбора аппроксимирующей функции.

Аналогично рассчитаны параметры аппроксимирующих функций при других значениях тока I^* , графики которых показаны на рис. 5.

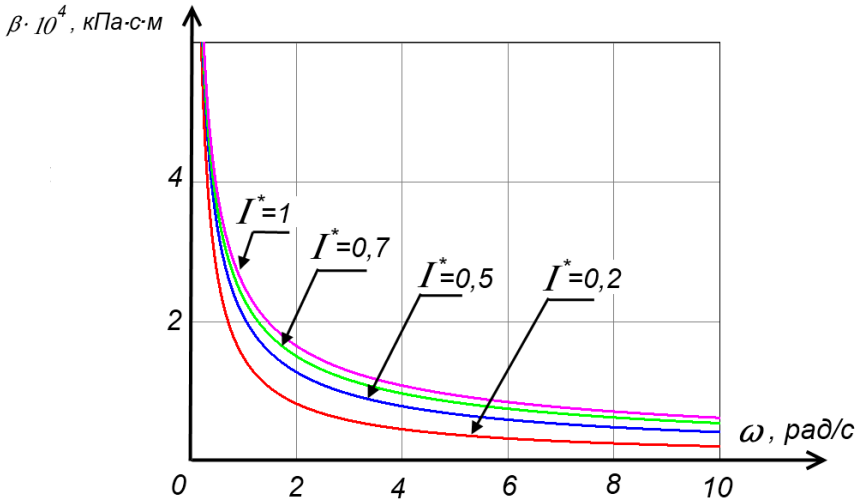


Рис. 5. Графики функций, аппроксимирующих зависимость β от ω при различных I^*

В соответствии с выражением (1) входное воздействие на объект имеет две гармонических составляющих. При этом, как показывает анализ, в силу малой относительной величины λ амплитуда гармоники удвоенной частоты существенно меньше амплитуды основной гармоники. В связи с этим входное воздействие можно приближенно рассматривать как гармоническое и использовать полученные результаты для построения частотной характеристики.

С учетом принятых допущений вид эквивалентной логарифмической амплитудной частотной характеристики (ЛАЧХ) УД найден аналитически из аппроксимирующей функции (4)

$$L(\omega) = 20 \lg B + 20 \cdot C \cdot \lg \omega. \quad (7)$$

На рис. 6 показаны точками экспериментальные значения, а также аналитическая ЛАЧХ (кривая 1), построенная по выражению (7).

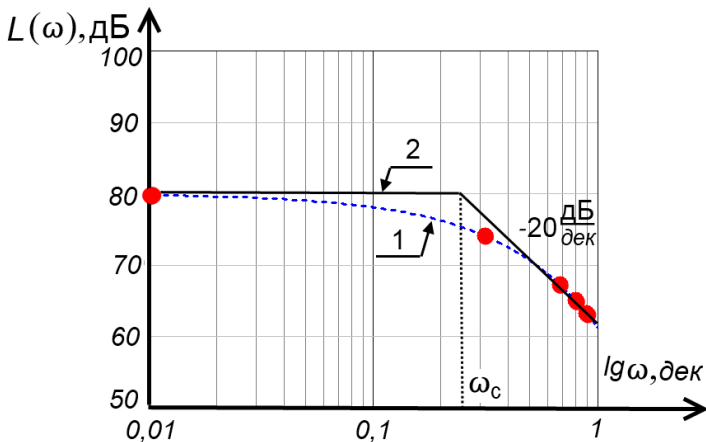


Рис. 6. ЛАЧХ УД при $I^*=0$:

1 – эквивалентная ЛАЧХ УД; 2 – асимптотическая ЛАЧХ УД; ω_c – частота сопряжения

Полученные результаты показывают, что ЛАЧХ рассматриваемого объекта для выходной переменной β и входной v близка к ЛАЧХ аperiodического звена с передаточной функцией

$$W_{\text{УД}}(p) = \frac{\beta(p)}{v(p)} = \frac{k_B}{T_{\text{УД}}p + 1}, \quad (8)$$

где k_B – коэффициент передачи УД; $T_{\text{УД}}$ – постоянная времени УД.

Определенное по (7) значение k_B составляет 9939 кПа·с².

Значение постоянной времени $T_{\text{УД}}$

$$T_{\text{УД}} = \frac{1}{\omega_C} = 4 \text{ с.}$$

На рис. 6 дополнительно показана асимптотическая ЛАЧХ (кривая 2) аperiodического звена с найденными значениями параметров.

На основании полученных данных определены параметры зависимости приращения гидравлического сопротивления $\Delta\beta$ от приращения тока ΔI^* в обмотке электромагнита.

На рис. 7 представлен график с отмеченными крестиками экспериментальными значениями $\Delta\beta$ при соответствующих ΔI^* , а также аппроксимирующая эти данные характеристика (пунктирная кривая), построенная по выражению

$$\Delta\beta = k\Delta I^* + b, \quad (9)$$

где k и b – искомые параметры аппроксимации.

Численное значение неизвестных параметров k , и b найдено с помощью МНК путем совместного решения системы уравнений

$$\begin{cases} k \sum_{i=1}^n (\Delta I_i^*)^2 + b \sum_{i=1}^n \Delta I_i^* = \sum_{i=1}^n \Delta\beta_i \Delta I_i^* ; \\ k \sum_{i=1}^n \Delta I_i^* + n \cdot b = \sum_{i=1}^n \Delta\beta_i . \end{cases} \quad (10)$$

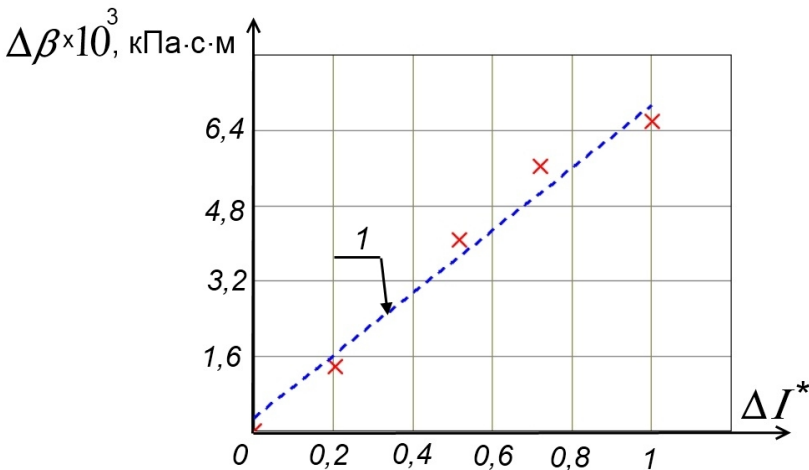


Рис. 7. График зависимости $\Delta\beta$ от ΔI^* :

1 – аппроксимирующая функция; x – экспериментальные значения

Подстановкой значений $\Delta\beta$ и Δl^* в (10) получены численные значения для неизвестных коэффициентов аппроксимирующей функции (9)

$$k = 6639, b = 289.$$

Величина средней ошибки аппроксимации Δ , рассчитанная по (6), не превышает 9,1 %, что является приемлемым по точности результатом.

Полученные результаты могут быть использованы при исследовании систем активной виброзащиты с управляемым демпфером [6] и в частности при синтезе корректирующего устройства в замкнутом контуре автоматического регулирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гордеев Б.А. Системы виброзащиты с использованием инерционности и диссипации реологических сред / Б.А. Гордеев, В.И. Ерофеев, А.В. Синёв, О.О. Мугин. – М.: Физматлит, 2004. – 176 с. – ISBN 5-9221-0561-2.
2. Audi TT MagneRide RUS. Режим доступа: www.avtoresurs.net/UserFiles/file/Audi_TT_MagneRide_RUS.doc, свободный.
3. НПП «Система Технологий». Режим доступа: <http://autosystem.ru/index.php?id=63>, свободный.
4. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин: Учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука; Гл. ред. физ.-мат. лит. – 1988. – 640 с. – ISBN 5-02-013810-X.
5. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1958. – Ил.
6. Рандин Д.Г. Исследование активной системы виброзащиты с управляемым демпфером // Научно-технический вестник Поволжья. – № 4, 2012. – Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2012. – С. 177-185.

Статья поступила в редакцию 12 декабря 2012 г.

RESEARCH OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF CONTROLLED DAMPER

D.G. Randin

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

In this paper the investigation results of dynamic characteristics of controlled magnetorheological damper are given. Dependence parameters of the flow friction characteristic of controlled magnetorheological damper on the angular frequency oscillation of its movable part and the current in the coil of an electromagnet are determined. Dynamic characteristics of controlled magnetorheological damper were found to be close to those of an aperiodic link.

Keywords: *controlled damper, flow friction characteristic, Bode magnitude diagram, transfer function.*