
ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 537.622

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОЙ ПРУЖИНЫ НА СИЛОВУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО МАГНИТОЖИДКОСТНОГО ДЕМПФЕРА

С.А. НЕСТЕРОВ, Н.А. МОРОЗОВ, Ю.Б. КАЗАКОВ
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация,
E-mail: elmash@em.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Эффект магнитной пружины проявляется в электромеханических устройствах с ограниченными размерами полюсов. Изменение магнитной проводимости системы при относительном перемещении полюсов вызывает появление сил магнитного тяжения. Проявление этих сил в электромеханических магнитоожидкостных демпферах имеет свои особенности и к настоящему моменту не изучено. В связи с этим актуально исследование действия магнитной пружины на силовую характеристику демпфера, целесообразна оценка влияния свойств магнитореологической суспензии на силу магнитной пружины, характер ее изменения, сочетания действия сил магнитной природы и вязкостного сопротивления движению поршня. Для этого необходимо проанализировать эффект магнитной пружины в статике, при медленном движении поршня, при динамических колебаниях поршня.

Материалы и методы. Исследования проведены с использованием теории натурального эксперимента и методов обработки экспериментальных результатов.

Результаты. Получены и проанализированы зависимости силы сопротивления электромеханического магнитоожидкостного демпфера для разных частот колебаний и магнитных индукций. Исследовано влияние сил магнитной пружины на силовую характеристику демпфера. Проведена оценка влияния на силу сопротивления демпфера магнитной и гидродинамической составляющих.

Выводы. Использование демпфера с чередующимися элементами с высокой и низкой магнитными проводимостями позволяет изменять силовую характеристику электромеханических магнитоожидкостных демпферов. Доля контролируемого магнитным полем усилия достигает 75 % суммарного усилия. Использование эффекта магнитной пружины позволяет повысить эффективность демпфирования при малых амплитудах и частотах колебаний. Повышение магнитных свойств магнитореологической суспензии усиливает эффект магнитной пружины при немагнитном поршне и ослабляет при магнитном. При увеличении магнитной индукции эффект магнитной пружины возрастает. Изменяя начальное положение поршня, можно получить несимметричную силовую характеристику, например, без применения клапанов и золотников увеличить силу отбоя и уменьшить силу сжатия. Отказ от подвижных частей увеличивает надежность демпфера.

Ключевые слова: магнитная жидкость, магнитоожидкостный демпфер, магнитореологическая суспензия, полюсы, предел текучести, магнитные силы

MAGNETIC SPRING EFFECT ON THE FORCE CHARACTERISTICS OF THE ELECTROMECHANICAL MAGNETIC LIQUID DAMPER

S.A. NESTEROV, N.A. MOROZOV, Yu.B. KAZAKOV
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: elmash@em.ispu.ru

Abstract

Background. The effect of a magnetic spring is observed in electromechanical devices with limited pole sizes. Simultaneous changing of the system magnetic conductivity after a relative displacement of the poles causes magnetic tension forces. These forces in electromechanical magnetic fluid dampers have their own specific characteristics which have not been studied before. All this requires studying the effect of a magnetic spring on the damper power characteristics, estimating the effect of the properties of a magnetorheological suspension on the magnetic spring strength, nature of its change and combination of the action of magnetic forces and viscosity resistance to the piston movement. To do that, it is important to analyze the effect of a magnetic spring in statics, at a slow movement of the piston and its dynamic oscillations.

Materials and Methods. The studies were based on the theory of natural experiment and methods of processing experimental results.

Results. We have obtained and analyzed dependences of the resistance force of the electromechanical magnetic fluid damper for different vibration frequencies and magnetic inductions. The effect of magnetic spring forces on the damper power characteristic has been investigated. It has been found how the damper resistance force is affected by the magnetic and hydrodynamic components.

Conclusions. The use of a damper with alternating elements with high and low magnetic conductivities makes it possible to change the strength characteristic of electromechanical magnetic fluid dampers. The proportion of the force controlled by the magnetic field reaches 75 % of the total effort. The use of the magnetic spring effect allows increasing the damping efficiency at small amplitudes and vibration frequencies. Increasing the magnetic properties of a magnetorheological suspension enhances the effect of a magnetic spring if the piston is non-magnetic, and weakens it if it is a magnetic one. When the magnetic induction rises, the effect of the magnetic spring increases. By changing the initial piston position, it is possible to obtain an asymmetrical power characteristic, for example, without using valves and spools, to increase the rebound force and to reduce the compressive force. If there are no moving parts, the damper reliability increases.

Key words: magnetic fluid, magnetorheological damper, magnetorheological suspension, poles, yield stress, magnetic forces

DOI: 10.17588/2072-2672.2019.3.032-040

Введение. Эффект появления сил магнитной пружины (МП) [1–4] возникает при смещении элементов устройства, если при этом изменяется магнитная проводимость всей системы. Например, силы МП возникают при сближении постоянных магнитов одноименной полярности или при боковом смещении магнитопроводящих деталей, вызывающих уменьшение их общей проводимости магнитному потоку. В магнитожидкостных устройствах эффект МП возникает при перемещении немагнитного элемента в зазоре с магнитореологической суспензией (МРС). В электромеханических магнитожидкостных демпферах (ЭМЖД) силы МП возникают при движении поршня с чередующимися элементами с высокой и низкой магнитными проводимостями, что приводит к изменению магнитной проводимости системы.

Исследование особенностей проявления МП в ЭМЖД, действия МП на силовую характеристику является актуальным. В связи с этим целесообразна оценка влияния свойств МРС на силу МП, характер ее изменения, сочетания действия сил магнитной природы и вязкостного сопротивления движению поршня. Для этого необходимо проанализировать эффект МП в статике, при медленном движении поршня, при динамических колебаниях поршня.

Теоретическое обоснование. При движении поршня освобожденное пространство между полюсами заполняется МРС. Без учета краевых потоков полная проводимость при магнитном поршне с бесконечной магнитной проницаемостью определяется выражением

$$G_M = \mu_0 \mu \frac{bL}{2\delta} - \mu_0 \mu \frac{xL}{2\delta(a+2\delta)}, \quad (1)$$

а при немагнитном поршне – выражением

$$G_H = \mu_0 \mu \frac{bL}{\mu a + 2\delta} - \mu_0 \mu \frac{xL}{a + 2\delta} - \mu_0 \mu \frac{xL}{\mu a + 2\delta}, \quad (2)$$

где b – ширина полюса; a – толщина поршня; x – смещение поршня; δ – зазор между полюсом и поршнем; μ – относительная магнитная проницаемость МРС; L – размер по третьей координате (поперек движения поршня).

Силы, действующие на поршень при его смещении, пропорциональны производной от полной магнитной проводимости между полюсами. Производные по смещению поршня x определяются выражениями:

$$\frac{dG_M}{dx} = -\mu_0 \mu \frac{L}{2\delta} \frac{1}{(1+2\delta/a)}; \quad (3)$$

$$\frac{dG_H}{dx} = \mu_0 \mu \frac{L}{a} \frac{\mu - 1}{(1+2\delta/a)(\mu + 2\delta/a)}. \quad (4)$$

Согласно (3), (4), при магнитном материале поршня сила обратно пропорциональна зазорам между поршнем и полюсами, действует на него против движения и стремится вернуть его в исходное положение. При немагнитном материале поршня сила обратно пропорциональна толщине немагнитного элемента и способствует выталкиванию его из зазора между полюсами. Отношение сил МП при магнитном F_M и немагнитном F_H поршнях имеет вид

$$\frac{F_M}{F_H} = \frac{a(\mu + 2\delta/a)}{2\delta(\mu - 1)}. \quad (5)$$

Очевидно, что сила магнитной пружины зависит от размеров поршня, магнитных свойств поршня и замещаемой среды, зазоров.

Материалы и методы. Исследованная физическая модель ЭМЖД представлена на рис. 1.

Модель состоит из двух прямоугольных немагнитных стенок, на каждой из которых размещены два стальных полюса, разделенных немагнитной вставкой. Немагнитный поршень выполнен сплошным, высотой 30 мм и толщиной 10 мм. Поршень с ферромагнитными элементами состоит из двух ферромагнитных призм $10 \times 10 \times 30$ мм, разделенных немагнитной вставкой $10 \times 10 \times 30$ мм. Полная высота поршня 30 мм. Зазоры между поршнем и поверхностями корпуса 2 мм с каждой стороны.

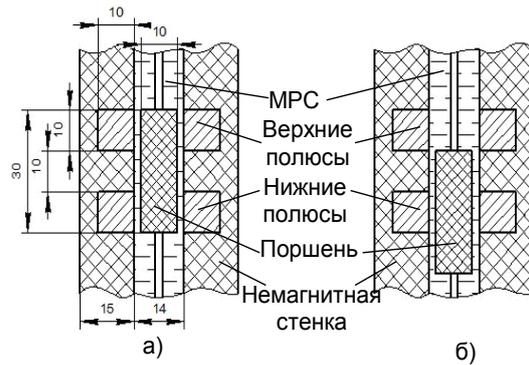


Рис. 1. ЭМЖД с эффектом магнитной пружины при исходных положениях поршня: а – положение 1; б – положение 2

Анализ эффекта МП проводился экспериментальными методами. Автоматизированная экспериментальная установка для испытаний ЭМЖД показана на рис. 2.

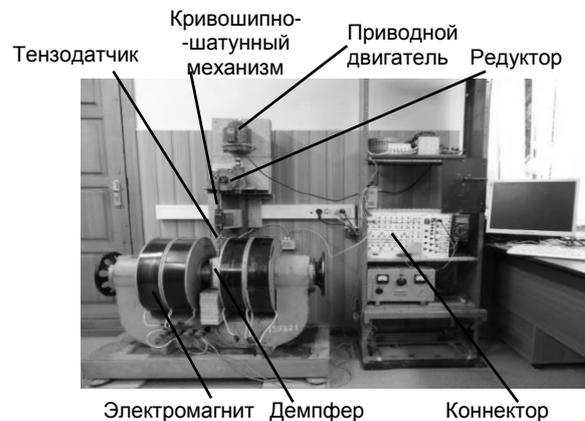


Рис. 2. Стенд для испытания ЭМЖД

Двигатель с регулируемой частотой вращения через редуктор приводит в движение кривошипно-шатунный механизм, вызывающий гармонические колебания поршня. Исследование эффекта МП проводилось в статическом и динамическом режимах. Внешнее магнитное поле, в которое помещалась модель, обеспечивалось торцами полюсов электромагнита. Усилие, действующее на поршень, измерялось резисторным тензодатчиком YZC-516С. Сигнал тензодатчика передавался на вход компьютера через плату ввода-вывода сигналов PCI 6023Е. Положительный сигнал тензодатчика соответствует его растяжению, отрицательный сигнал – сжатию. Магнитная индукция измерялась щупом тесламетром WT10А между корпусом ЭМЖД и полюсом электромагнита. Индукция внутри ЭМЖД определялась на основе ранее сня-

той зависимости магнитной индукции внутри демпфера от индукции снаружи.

Исследование усилий МРС проводилось с использованием МРС на основе ПЭС-4. В жидкую основу было добавлено в равных частях карбонильное железо средней дисперсности 2,1 мкм и магнетит размера 10 нм. Общая объемная доля магнитной фазы составила 0,2. Кривая намагничивания и реологические зависимости МРС приведены на рис. 3. Кривая намагничивания МРС получена баллистическим методом [5, 6]. Относительная магнитная проницаемость уменьшается с 2,1 на начальном участке кривой намагничивания до 1,4 при магнитной индукции 0,5 Тл. Реологические характеристики МРС (рис. 3,б) получены на ротационном вискозиметре [7].

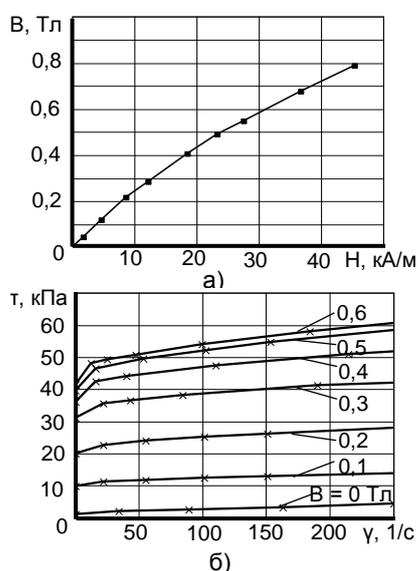


Рис. 3. Характеристики МРС: а – характеристика намагничивания; б – магнито-реологические характеристики

Первоначально снималась статическая силовая характеристика модели без МРС, что позволило учесть силы трения и перекосов подвижного поршня при отсутствии магнитного поля и при его наличии. При магнитном поле усилие трения несколько возрастает за счет возникновения одностороннего тяжения, что проявляется у поршня с магнитопроводящими полюсами. Далее снималась силовая характеристика модели, заполненной МРС, при отсутствии и наличии поперечного магнитного поля от 0,00 до 0,40 Тл. МРС заполняла весь объем мо-

дели: рабочую область и буферные пространства сверху и снизу.

В статическом режиме поршень сдвигался на 2 мм каждые 5 мин. По окончании гидродинамических переходных процессов фиксировалось значение силы. Перемещение осуществлялось из нижнего положения вверх на 40 мм. Затем поршень также перемещался вниз. Перемещение поршня в статике двукратно превышало перемещение поршня при исследованиях в динамических режимах, чтобы охватить весь диапазон возможных положений поршня.

Из усилий, действующих на поршень при наличии МРС и магнитного поля, вычиталась сила сопротивления в модели без магнитного поля. В результате получены силовые характеристики, обусловленные эффектом МП и пределом текучести МРС. Разность модулей сил, необходимых для перемещения полюса вверх и вниз, равна удвоенной силе МП со знаком минус, если за положительное значение сил принять направление вверх. Сумма модулей сил перемещения полюса вверх и вниз равна удвоенному значению сил, возникающих из-за структурирования МРС в магнитном поле. Эта сила всегда направлена против сдвига поршня в любую сторону.

Динамические исследования для каждого исполнения поршня проводились при частотах колебания 0,2–0,4–0,6–0,8–1,0 Гц и магнитной индукции 0–0,05–0,10–0,15–0,20–0,30–0,40 Тл. Испытания проводились с амплитудой 10 мм от двух исходных положений (рис. 1) при комнатной температуре. Переходные процессы не учитывались.

Анализ результатов. На рис. 4 показаны: зависимости изменения сил, действующих на поршень ЭМЖД при отсутствии МРС, ее наличии и изменении магнитного поля; положения поршня; направление движения (стрелками). Силы механического сопротивления во всех снятых кривых проявляются одинаково.

Присутствие в зазоре МРС увеличивает силу сопротивления перемещению поршня в отсутствии магнитного поля на 8,6 Н. В магнитном поле силы сопротивления движения поршня увеличиваются с ростом магнитной индукции (рис. 5) и напряжения сдвига МРС [8]. Характер изменения сил сопротивления остается такой же, как

при отсутствии поля (на рис. 5–12 значения магнитной индукции соответствуют рис. 4). Только при достижении значений магнитной индукции 0,3 Тл и более начинает заметно проявляться эффект МП. Это выражается в росте силы сопротивления перемещению поршня при его движении вверх, что вызвано уменьшением краевой магнитной проводимости нижнего полюса ($h = -15$ мм), а затем и верхнего.

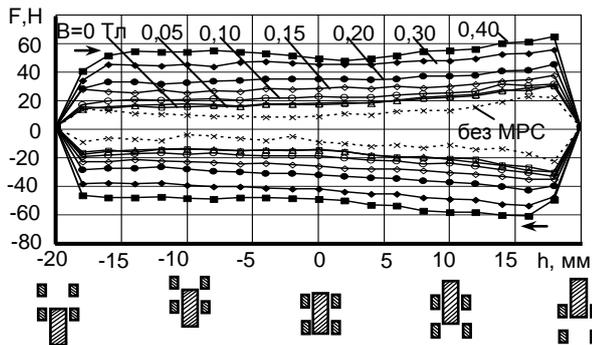


Рис. 4. Зависимости статической силы сопротивления демпфера с MPC от положения немагнитного поршня

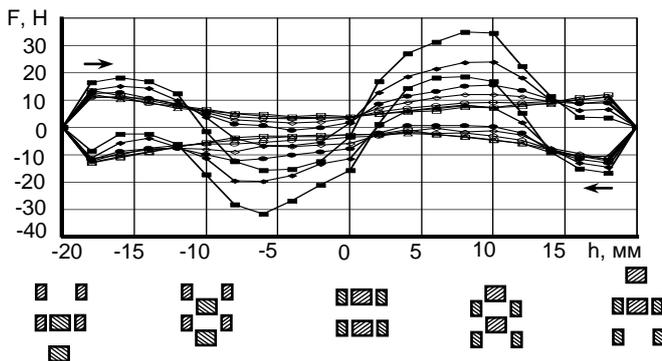


Рис. 5. Зависимость статической силы сопротивления демпфера с ферромагнитным поршнем без MPC от положения поршня

После прохождения торцом поршня половины высоты полюса ($h = -5$ мм) сила сопротивления от МП ослабевает и снижается до нуля при $h = 0$ мм при среднем положении поршня. При дальнейшем перемещении поршня вверх сила МП меняет свой знак и стремится вытолкнуть поршень вверх, что проявляется в уменьшении силы, движущей поршень вверх ($h = 5$ мм). Однако сила МП заметно меньше вязкостных сил и при выходе поршня из зазора нижнего полюса практически исчезает.

При нахождении поршня в среднем положении сопротивление перемещению поршня возникает только из-за предела те-

кучности MPC. Анализ зависимостей статической силы сопротивления демпфера с ферромагнитным поршнем и MPC от положения поршня (рис. 6) показывает, что вязкостные силы MPC в магнитном поле заметно больше сил от эффекта МП при немагнитном поршне. Это заметно по малому изменению сил сопротивления при разных положениях поршня относительно полюсов системы. Только при магнитных индукциях более 0,3 Тл проявляется зависимость сил от положения поршня и полюсов.

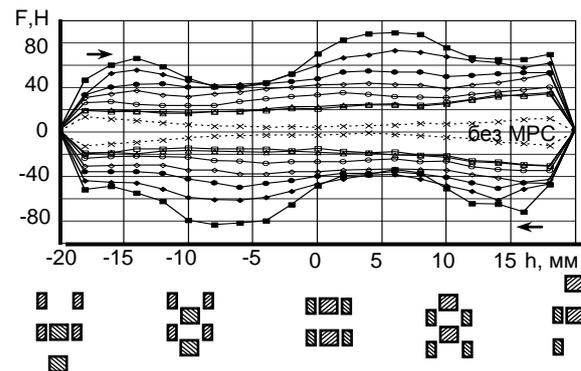


Рис. 6. Зависимости статической силы сопротивления демпфера с ферромагнитным поршнем и MPC от положения поршня

Движение поршня вниз сопровождается теми же эффектами, что и движение вверх, только силы МП направлены вверх и сначала способствуют уменьшению модуля силы, перемещающей поршень вниз. Однако они быстро спадают до нуля и после среднего положения поршня практически не проявляются. Эффект МП сильнее выражен при использовании поршня с ферромагнитными элементами. На рис. 6 показаны: действующие на поршень усилия при его смещении на 40 мм вверх и затем возвращении в исходное положение (MPC в демпфере отсутствует); основные положения поршня (направление движения отмечено стрелками).

Анализ кривых (рис. 6) показывает, что при смещении поршня вверх его ферромагнитная часть выходит из зазора между полюсами и возникает возвращающая сила, направленная вниз. При дальнейшем движении поршня с полюсами корпуса начинают взаимодействовать обе его ферромагнитные части, растут силы, направленные вверх. Следует удерживать поршень в нужном положении, что проявляется в отрицательных

значениях тензодатчика. Когда поршень займет симметричное положение относительно полюсов, сила МП падает до нуля. При дальнейшем движении вверх сначала возникает сила, направленная вниз, которая к завершению перемещения снижается до нуля. Перемещение поршня вниз дает аналогичные результаты. Заполнение демпфера МРС ведет к сглаживанию эффекта МП.

Предел текучести МРС в магнитном поле возрастает, и при положении поршня в области от -10 до 0 мм сигнал тензодатчика остается положительным. Однако характер изменения силы МП остается тем же: сначала она направлена вниз и увеличивает движущую силу; затем меняет направление, что проявляется в уменьшении результирующей силы; после нулевого положения происходит сильное увеличение направленной вниз силы и постепенное ее снижение до нуля. Вязкостные силы уменьшаются по мере сокращения длины зазора при выходе поршня из рабочей зоны.

Можно провести разделение сил МП и сил структурирования МРС для разных значений магнитной индукции внешнего магнитного поля. Для поршня с ферромагнитными элементами такие зависимости показаны на рис. 7, 8.

Анализ кривых (рис. 7, 8) показывает, что силы, связанные с пределом текучести МРС в магнитном поле, больше сил от эффекта МП. Особенно это заметно при небольших магнитных полях, в которых слабо проявляется эффект МП. Предел текучести МРС максимален при симметричном положении поршня относительно полюсов корпуса, когда силы МП фактически равны нулю.

При исследовании ЭМЖД в динамике гармонические колебания поршня совершались относительно двух начальных положений (см. рис. 1). В «положении 1» (рис. 1,а) верхний и нижний края поршня совпадают с краями полюсов корпуса. В «положении 2» (рис. 1,б) верхний край поршня совпадает с нижним краем верхнего полюса корпуса. Гармонические колебания поршня происходили вверх и вниз относительно этих положений с амплитудой 10 мм.

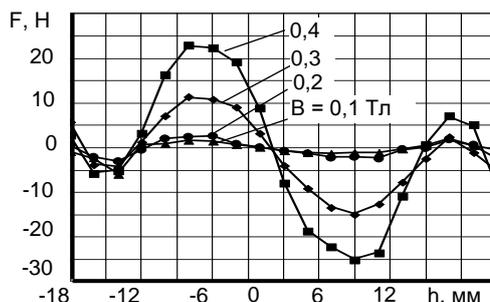


Рис. 7. Силы магнитной пружины при магнитном поршне

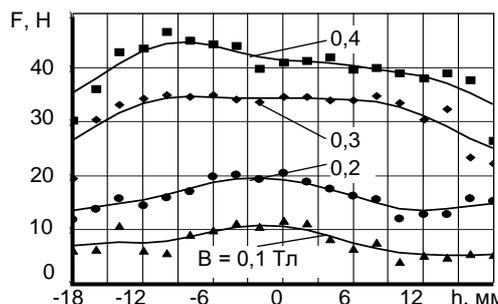


Рис. 8. Силы, возникающие из-за структурирования МРС

При движении немагнитного поршня в большей степени проявляется рост гидродинамического сопротивления по мере увеличения скорости сдвига МРС в зазоре (рис. 9). При высоких значениях магнитной индукции ($0,3$ Тл и более) гидродинамическое сопротивление играет основную роль в формировании силовой характеристики демпфера с немагнитным поршнем. Эффект МП сказывается на смещении максимальной силы в область внедрения поршня в зазор между полюсами (рис. 9, кривая 2).

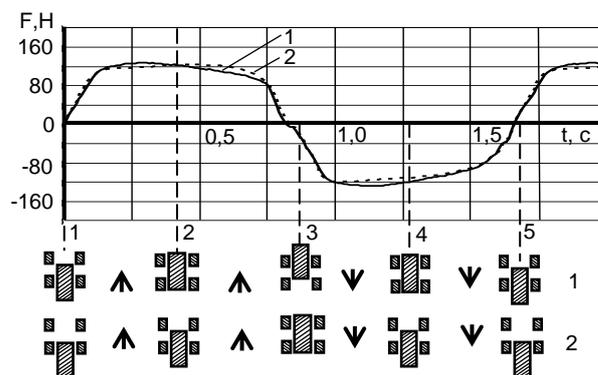


Рис. 9. Силы сопротивления демпфера при колебательном движении $B = 0,4$ Тл для немагнитного поршня: 1 – «положение 1»; 2 – «положение 2»

При гармоническом колебании поршня с ферромагнитными элементами изменение силы зависит от положения (рис. 10). Из «положения 1» поршень начинает дви-

жение вверх в момент максимальной силы МП, которую создают оба ферромагнитных элемента. Скорость движения мала, магнитная сила МП направлена против гидродинамической силы, результирующая сила сопротивления снижается. Далее магнитная сила уменьшается, а гидродинамическая сила растет по мере увеличения скорости поршня. После прохождения поршнем среднего положения скорость движения уменьшается, магнитная сила меняет направление, что проявляется в снижении результирующей силы. При приближении к верхнему положению уменьшается скорость, магнитная сила при выходе ферромагнитных элементов поршня из зазора падает. Движение поршня вниз проходит аналогично.

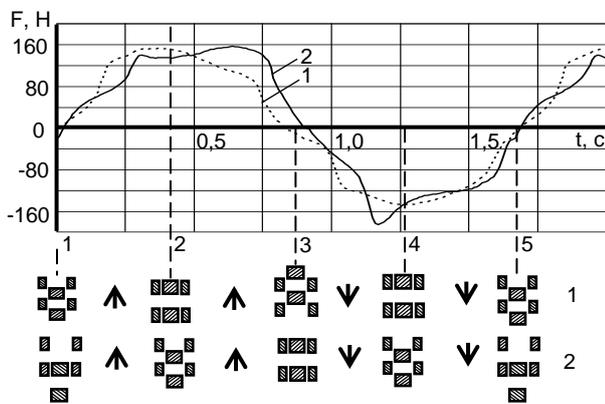


Рис. 10. Силы сопротивления демпфера при колебательном движении $V = 0,4$ Тл для ферромагнитного поршня: 1 – «положение 1»; 2 – «положение 2»

Во втором случае движение поршня вверх начинается из «положения 2», в котором магнитную силу создает только один ферромагнитный элемент, сила направлена против движения. Сила сопротивления увеличивается. С возрастанием скорости растет доля гидродинамической силы. При прохождении среднего положения возникает максимальная магнитная сила, направленная вверх. Изменение направления действия магнитной силы проявляется в уменьшении результирующей силы. После вхождения ферромагнитных частей поршня в зазор между полюсами магнитная сила падает до нуля, результирующая сила сопротивления снижается с уменьшением скорости движения.

Движение поршня вниз характеризуется резким ростом магнитной силы в момент выхода ферромагнитных частей

поршня из зазоров между полюсами, что проявляется в пикообразном росте силы сопротивления из-за магнитной силы. Затем магнитная сила становится сонаправленной с движущей, что проявляется в снижении результирующей силы почти на 20 Н, по сравнению с силой при движении поршня вверх. Достижение крайнего нижнего положения характеризуется резким уменьшением силы по мере снижения скорости движения.

Изменения силы сопротивления демпфера от магнитной индукции и частоты колебаний получены по осциллограммам (рис. 11).

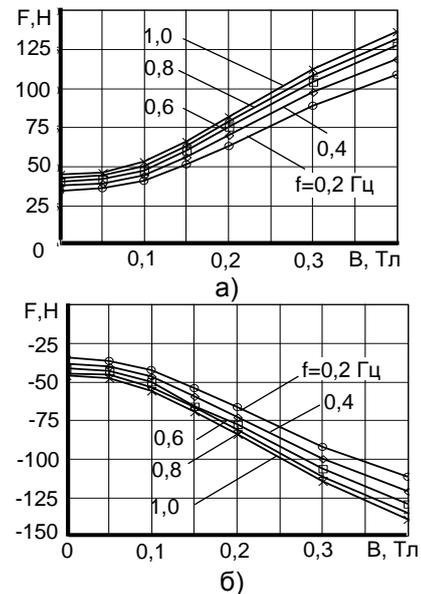


Рис. 11. Частотные зависимости силы сопротивления демпфера от магнитной индукции (немагнитный поршень): а – движение поршня вверх; б – движение поршня вниз

Сила зависит от магнитной индукции и слабо зависит от частоты колебаний. При увеличении индукции зависимость силы от частоты колебаний, а значит, от скорости движения поршня, усиливается. При малых индукциях активация МРС мала. Только при индукциях более 0,1 Тл возможно воздействие на МРС магнитным полем. При внешнем поле с индукцией 0,4 Тл контролируемое магнитным полем усилие составляет 68 %. Минимальная неконтролируемая сила сопротивления движению поршня составляет 32 %.

В области больших магнитных полей становится более заметным влияние скорости перетекания МРС, определяемое частотой колебания, расширяется диапазон изменения значений сил. Поршень с фер-

ромагнитными элементами увеличивает усилия, противодействующие движению, по сравнению с немагнитным поршнем, на 20 % при движении вверх и на 38 % при движении вниз из исходного «положения 2» (рис. 12). Возрастает и доля контролируемого магнитным полем усилия от 71 % (движение вверх) до 75 % (движение вниз). При малых скоростях движения поршня соотношение сил МП и магнитовязкостных сил зависит от исходного положения колебательного процесса [9, 10].

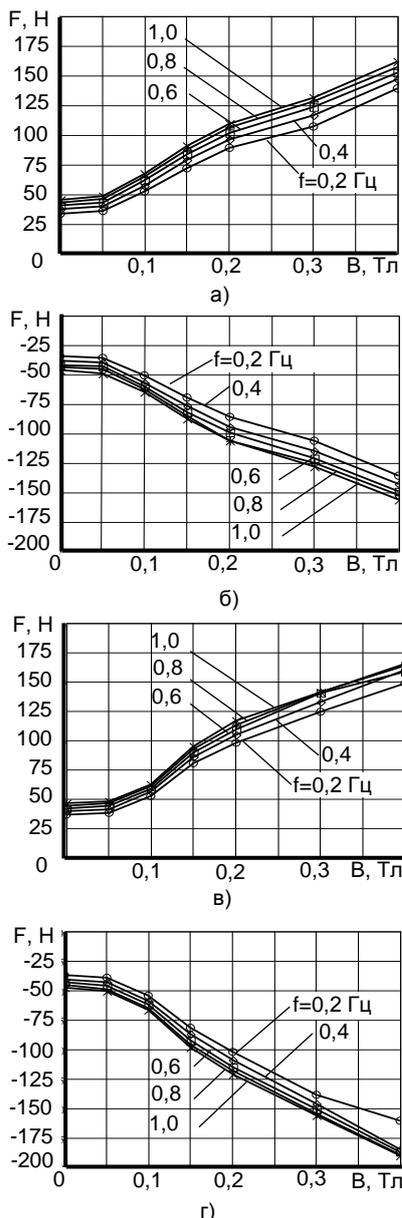


Рис. 12. Зависимости максимальной силы сопротивления демпфера от величины магнитной индукции (поршень с ферромагнитными элементами): а – движение поршня вверх («положение 1»); б – движение поршня вниз («положение 1»); в – движение поршня вверх («положение 2»); г – движение поршня вниз («положение 2»)

Выводы. Использование демпфера с чередующимися элементами с высокой и низкой магнитными проводимостями позволяет изменять силовую характеристику ЭМЖД. Увеличение магнитного поля до 0,4 Тл вызывает рост силы демпфера до 4 раз. Доля контролируемого магнитным полем усилия достигает 75 % от суммарного усилия.

Для немагнитного поршня эффект МП слабый, по сравнению с магнитным поршнем. Но немагнитный поршень обеспечивает самоцентрирование поршня и уменьшает силы трения, что важно при небольшой энергии колебаний. Использование эффекта МП позволяет повысить эффективность демпфирования при малых амплитудах и частотах колебаний.

Соотношение сил МП в ЭМЖД при МРС с изменением магнитной проницаемости от 2,1 до 1,4 при насыщении изменяется от 5,68 до 11,25. Повышение магнитных свойств МРС усиливает эффект МП при немагнитном поршне и ослабляет при магнитном. При увеличении магнитной индукции эффект МП возрастает. Увеличение числа пар полюсов кратно увеличивает силы МП.

При малых скоростях поршня вязкостные силы малы, основной вклад дают усилия МП и усилия структурированной в магнитном поле МРС, особенно при индукции более 0,5 Тл.

Изменяя начальное положение поршня, можно получить несимметричную силовую характеристику, например, без применения клапанов и золотников увеличить силу отбоя и уменьшить силу сжатия. Отказ от подвижных частей увеличивает надежность демпфера.

Список литературы

1. Nilsson K., Danielsson O., Leijon M. Electromagnetic forces in the air gap of a permanent magnet linear generator at no load // J. Appl. Phys. – 2006. – Issue 99. – 034505.
2. Calculation and experimental study of the retracting force for magnetic springs of two types / V.Yu. Tsivilitsin, Yu.V. Milman, V.A. Goncharuk, I.B. Bondar // Ukr. J. Phys. – 2014. – V. 59, no. 10. – P. 1020–1025.
3. Snamina J., Habel P. Magnetic spring as the element of vibration reduction system // Mechanics And Control. – 2010. – V. 29, no. 1. – P. 40–44.
4. A Novel Hybrid Suspension Electromagnet for Middle-low Speed Maglev Train / H. Weitao,

S. Jinji, L. Xiankai et. al. // Journal of Magnetism. – 2017. – V. 22(3). – P. 463–471.

5. **Чечерников В.И.** Магнитные измерения. – М.: МГУ им. Ломоносова, 1969. – 387 с.

6. **Колпаков А.И., Шабанова И.А., Танцюра А.О.** Изучение намагниченности магнитной жидкости // Современные материалы, техника и технологии. – 2015. – № 3. – С. 118–122.

7. **Бибик Е.Е.** Реология дисперсных систем. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 172 с.

8. **Шульман З.П., Кордонский В.И.** Магнитореологический эффект. – Мн.: Наука и техника, 1982. – 184 с.

9. **Казаков Ю.Б., Морозов Н.А., Нестеров С.А.** Эффект магнитной пружины в магнитоидных устройствах // XVIII Междунар. Плесская науч. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям: сб. науч. тр. (г. Плес, сентябрь 2018 г.) / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2018. – С. 418–426.

10. **Нестеров С.А., Морозов Н.А., Арефьев И.М.** Экспериментальное исследование электромеханического магнитоидного демпфера // XVIII Междунар. Плесская науч. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям: сб. науч. тр. (г. Плес, сентябрь 2018 г.) / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2018. – С. 447–454.

References

1. Nilsson, K., Danielsson, O., Leijon, M. Electromagnetic forces in the air gap of a permanent magnet linear generator at no load. *J. Appl. Phys*, 2006, issue 99, 034505.

2. Tsvilitsin, V.Yu., Milman, Yu.V., Goncharuk, V.A., Bondar, I.B. Calculation and experimental study of the retracting force for magnetic springs of two types. *Ukr. J. Phys*, 2014, vol. 59, no. 10, pp.1020–1025.

3. Snamina, J., Habel, P. Magnetic spring as the element of vibration reduction system. *Mechanics And Control*, 2010, vol. 29, no. 1, pp. 40–44.

4. Weitao, H., Jinji, S., Xiankai, L., Haixia, G., Jinsha, W. A Novel Hybrid Suspension Electromagnet for Middle-low Speed Maglev Train, *Journal of Magnetism*, 2017, vol. 22(3), pp. 463–471.

5. Chechernikov, V.I. *Magnitnye izmereniya* [Magnetic measurements]. Moscow: MGU, 1969. 387 p.

6. Kolpakov, A.I., Shabanova, I.A., Tantsyura, A.O. Izuchenie namagnichennosti magnitnoy zhidkosti [Studying of the magnetization of magnetic fluid]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*, 2015, no. 3, pp. 118–122.

7. Bibik, E.E. *Reologiya dispersnykh system* [Rheology of dispersed systems]. Leningrad: Izdatel'stvo Leningradskogo universiteta, 1981. 172 p.

8. Shul'man, Z.P., Kordonskiy, V.I. *Magnitnoreologicheskiy effekt* [Magnetorheological effect]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1982. 184 p.

9. Kazakov, Yu.B., Morozov, N.A., Nesterov, S.A. Effekt magnitnoy pruzhiny v magnitozhidkostnykh ustroystvakh [Effect of a magnetic spring in magnetorheological devices]. *Sbornik nauchnykh trudov XVIII Mezhdunarodnoy Plessskoy nauchnoy konferentsii po nanodispersnym magnitnym zhidkostyam* [Collection of scientific works of the XVIII International Plyos Scientific Conference on Nanodispersed Magnetic fluids (Plyos, September of 2018)]. Ivanovo, 2018, pp. 418–426.

10. Nesterov, S.A., Morozov, N.A., Aref'ev, I.M. Eksperimental'noe issledovanie elektromekhanicheskogo magnitozhidkostnogo dempfera [Experimental study of the electromechanical magnetic fluid damper]. *Sbornik nauchnykh trudov XVIII Mezhdunarodnoy Plessskoy nauchnoy konferentsii po nanodispersnym magnitnym zhidkostyam* [Collection of Scientific Works of the XVIII International Plyos Scientific Conference on Nanodispersed Magnetic Fluids]. Ivanovo, 2018, pp. 447–454.

Казаков Юрий Борисович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электромеханики, e-mail: elmash@em.ispu.ru

Kazakov Yuri Borisovich,

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor, Head of the Electromechanics Department, e-mail: elmash@em.ispu.ru

Морозов Николай Александрович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики, телефон (4932) 26-97-06.

Morozov Nikolai Aleksandrovich,

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Electromechanics Department, telephone (4932) 26-97-06.

Нестеров Сергей Александрович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры электромеханики, телефон (4932) 26-97-15.

Nesterov Sergei Aleksandrovich,

Candidate of Engineering Sciences (PhD), Senior Lecturer of the Electromechanics Department, telephone (4932) 26-97-15.