

НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 532.13

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-70-77>

ЗАЩИТА ПРИВОДНЫХ СИСТЕМ ОТ ГИДРОУДАРА МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИМИ УСТРОЙСТВАМИ

Найгерт К.В.¹, Целищев В.А.²¹Ожно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия²Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

Аннотация. Защита приводных систем от резких перепадов давления является значимой задачей, так как она нацелена на сохранение целостности магистралей / аппаратуры и стабильности рабочих параметров. В магнитореологических приводных системах высокого давления нередко приходится применять регулирующую аппаратуру с механическими запорными элементами, поэтому защита магнитореологических приводных систем высокого давления от гидроудара крайне актуальна. В данной исследовательской работе приводится способ защиты приводных систем от гидроудара магнитореологическими устройствами и его конструктивная реализация. Описаны варианты задания управляющего сигнала для оригинального магнитореологического устройства, которые позволяют бороться со скачками давления двумя различными путями. Посредством образования неоднородного распределения электромагнитного поля и вязкостных свойств в объеме магнитореологической жидкости или за счет бегущего магнитного поля, которое возбуждает в объеме намагниченной жидкости продольные звуковые волны и способствует нейтрализации ударной волны. Первый вариант организации управляющего сигнала основан на диссипации механической энергии вязкой средой, а второй базируется на эффекте, наблюдаемом при наложении акустических волн, ударной и регулирующей с одинаковыми частотно-амплитудными характеристиками, но находящимися в противофазе. Обозначены соотношения вязкостных и скоростных параметров для реализации управления. Так как способ противофаз обладает хорошей динамикой и малыми значениями времени переходных процессов, разработана численная модель, применимая при расчете характеристик регулирующей акустической волны и требуемых параметров бегущего электромагнитного управляющего поля. Результаты численного эксперимента подтверждают эффективность предложенного способа и состоятельность описанной численной модели.

Ключевые слова: защита приводных систем, гидроудар, магнитореологические устройства, бегущие магнитные поля, диссипация механической энергии.

Введение

Эффект гидравлического удара достаточно распространен для систем, в которых в качестве кинематического звена выступает жидкость. Эксплуатация магнитореологических контуров высокого давления зачастую требует применения механической запорно-регулирующей аппаратуры, так как многие конструкции магнитореологических устройств не способны исключить непроизводительное истечение рабочей среды через рабочие зоны при высоких давлениях. Наиболее распространенное конструктивное исполнение регулирующих магнитореологических устройств в работах [1–8].

Как и прочим гидравлическим системам,

магнитореологическим системам также грозит явление гидроудара. С общепринятыми причинами возникновения и известными последствиями. Рекомендованные методы борьбы с развитием явлений гидроудара не всегда оправданы и могут быть неприменимы в прецизионных приводных системах. Например, снижение скорости перекрытия потока негативно сказывается на динамике приводных систем и недопустимо для предохранительных клапанов. Установка в систему амортизирующих устройств и компенсаторного оборудования типа мембранных гасителей, редукторов давления и гидроаккумуляторов существенно увеличивает размеры и массу магистралей, ограничивая варианты компоновки гидроаппаратов и уменьшая динамическую жесткость систем. Использование труб большого диаметра или рукавов высокого давления в при-

© Найгерт К.В., Целищев В.А., 2019

водных системах имеет больше недостатков, чем ожидаемых преимуществ. Очевидно и то, что резкие скачки давления также негативно влияют на динамику выходного звена и снижают точность его перемещения. Конструктивное исполнение распространенных способов защиты приводных систем от гидроудара приведены в [1–9].

Актуальность

Существующие способы защиты магистралей и гидрооборудования от гидравлического удара являются дорогостоящими, существенно снижают динамическую жесткость и увеличивают массогабаритные показатели систем. Поэтому при эксплуатации гидроаппаратов в составе магнитореологических систем для борьбы с непроизводительным изменением давления целесообразно и актуально создание и развитие альтернативных способов и устройств.

Цель исследовательской работы

Разработать способ защиты магнитореологических систем, имеющих в своем составе гидравлические аппараты, от резких скачков давления и реализовать способ в оригинальной конструкции устройства.

Способ гашения ударных волн в магистрали

Применение в магнитореологических системах гидравлических устройств и классической запорно-регулирующей аппаратуры требует реализации защиты трубопроводов от явлений гидравлического удара, что целесообразно в данном случае производить при помощи бегущих динамических или неоднородно распределенных электромагнитных полей. Бегущие динамические электромагнитные поля, создаваемые сборками дифференциальных электромагнитов, установленных каскадом, способны выступать в качестве средства защиты трубопроводов магнитореологических систем от явлений гидравлического удара. При этом включение всех фаз сборки индукторов дифференциального электромагнита и последовательное включение дифференциальных электромагнитов, входящих в каскад, в направлении распространения ударной волны позволяет демпфировать энергию объема движущейся жидкости. Скорость последовательного включения дифференциальных электромагнитов v_{em} относительно скорости распространения ударной волны v_{gh} устанавливается соотношением $\beta v_{em} = v_{gh}$ и корректируется посредством обратной связи.

Одновременное включение всех дифференциальных электромагнитов и индивидуальное управление вольт-амперными характеристиками каждого дифференциального электромагнита образует неоднородное распределение электромагнитного поля и вязкостных свойств в объеме магнитореологической жидкости, способное также препятствовать распространению ударных волн в жидкой среде. С целью осуществления более эффективного гашения ударной волны разница вязкости магнитореологической жидкости η в зонах регулирования рядом расположенных дифференциальных электромагнитов должна находиться в пределах от $0,5\eta$ до $0,95\eta$ для предыдущего дифференциального электромагнита и в пределах от $1,2\eta$ до 2η для последующего дифференциального электромагнита.

Коэффициент β определяется из соотношения скорости распространения акустической волны в эталонной ферромагнитной среде v_{ast} и скорости распространения акустической волны в образце магнитореологической жидкости v_{agh} , рассчитывается как $\beta = \frac{v_{agh}}{v_{ast}}$.

Очевидно, что бегущее магнитное поле возбуждает в объеме намагниченной жидкости продольные звуковые волны, частотные характеристики которых в два раза больше частоты управляющего поля. Поэтому помимо изменения вязкости магнитореологической жидкости в направлении распространения ударной волны возможен вариант гашения ударных волн за счет генерации акустических волн равной частоты, но находящихся в противофазе с ударными волнами. В случае фазного регулирования частота электромагнитного поля ω_{em} соотносится с частотой ударной волны ω_{gh} выражением $0,5\omega_{em} = \omega_{gh}$, а скорость последовательного включения дифференциальных электромагнитов v_{em} относительно скорости распространения ударной волны v_{gh} устанавливается соотношением $v_{em} = v_{gh}$ и корректируется посредством обратной связи.

Управление осуществляется контроллером по данным опроса серии вибродатчиков, установленных в системе последовательно на участке перед зоной регулирования, которые позволяют определять скорость распространения ударной волны в магнитореологической среде.

Возможна реализация сообщения магнито-реологической среде дополнительной энергии и организации в магистрали гидродинамического эффекта типа – жидкий поршень, который формируется посредством сообщения частицам магнетика кинетической энергии и генерации акустических волн. Данный гидродинамический эффект имеет прикладное значение и промышленное применение, а также позволяет бороться с падением давления при гидроударе. Более подробное описание способов приведено в [10].

Конструктивная реализация

Устройство создает электромагнитное поле сборками индукторов, образующих кольцевые управляющие дифференциальные электромагниты, установленные каскадами. Включение всех фаз сборки индукторов дифференциального электромагнита и последовательное включение дифференциальных электромагнитов, входящих в каскад, в направлении распространения ударной волны или во встречном направлении позволяет демпфировать энергию объема движущейся жидкости.

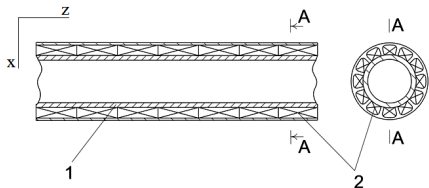


Рис. 1. Устройство защиты магнито-реологических систем высокого давления от гидроудара: 1 – корпус; 2 – каскад блоков электромагнитного управления потоком

Одновременное включение всех дифференциальных электромагнитов и индивидуальное управление вольт-амперными характеристиками каждого дифференциального электромагнита образует неоднородное распределение электромагнитного поля и вязкостных свойств в объеме магнито-реологической жидкости, способное также препятствовать распространению ударных волн в жидкой среде (рис. 1). Подробное описание конструкции приведено в работах [10–13].

Численная модель

Система акустических уравнений для магнито-реологической среды [14–15]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \text{div} \rho v &= 0, \\ \rho T \frac{d}{dt} \left(S + \mu_0 \rho^{-1} \int_0^H \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_{p,H} dH \right) &= \\ &= \tau_{i,k} \frac{\partial v_i}{\partial z_k} + \text{div} (\chi \nabla T), \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} &= -\nabla (p - M_0 H) + \eta_v \Delta v + \left(\eta_v + \frac{\eta_s}{3} \right) \nabla \text{div} v, \\ \text{div} B &= 0, \\ \text{rot} H &= 0. \end{aligned} \tag{1}$$

Для них справедливы следующие уравнения. Уравнение теплопроводности

$$T \delta \left(S + \mu_0 \rho^{-1} \int_0^H \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_{p,H} dH \right) = \frac{i \omega \chi}{\rho c^2} \delta T. \tag{2}$$

И уравнение сохранения энергии

$$\begin{aligned} i \omega \chi c^{-2} \rho^{-1} \delta T - T \delta \left[\mu_0 \rho^{-1} \int_0^H \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_{p,H} dH \right] &= \\ &= C_v \delta T - q T c^2 \rho^{-1} \gamma^{-1} \delta \rho. \end{aligned} \tag{3}$$

t – время; $\tau_{i,k}$ – тензор вязких напряжений; v – скорость; χ – магнитная восприимчивость; p – давление; η_s – сдвиговая вязкость; η_v – объемная вязкость; B – магнитная индукция; S – энтропия; C_v – удельная теплоемкость при постоянном объеме; γ – отношение удельных теплоемкостей.

В случае генерации бегущего управляющего поля скорость распространения ударной волны:

$$\begin{aligned} H^2 &= H^{*2} + 2H^* H_a ch k x \sin(kz - \omega t) + \\ &+ H_a^2 [sh^2 kx + \sin^2(kz - \omega t)], \\ v_z &= \frac{\left(\frac{A_H}{\rho} \right) \omega / k}{\left(\frac{\omega}{k} \right)^2 - c_f^2} \cos 2(kz - \omega t) - \\ &- \frac{4A_H}{\rho} \frac{H^*}{H_a} \frac{k}{\omega} ch k x \sin(kz - \omega t), \\ v_x &= \frac{4A_H}{\rho} \frac{H^*}{H_a} \frac{k}{\omega} ch k x \cos(kz - \omega t), \\ H_a &= \frac{B}{\mu_0 (1 + \chi) sh k l}, \\ A_H &= \mu_0 \chi H_a^2 / 4. \end{aligned} \tag{4}$$

С учетом

$$H^2 = H_a^2 [sh^2 kx + \sin^2(kz - \omega t)]. \quad (5)$$

Опишем следующую численную модель:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial v}{\partial t} &= -c_f^2 \nabla \rho' + \frac{1}{2} \mu_0 \chi \nabla H^2 + \\ &+ \nabla \eta \Delta v + \nabla \left(\eta_v + \frac{\eta_s}{3} \right) \nabla (\nabla v), \\ \frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho \operatorname{div} v &= 0, \\ v_z &= v_{za} \cos[2(kz - \omega t) + \varphi_{z\alpha}], \\ v_{za} &= \frac{\left(\frac{A_m}{\rho} \right) \cdot \omega / k}{\left[c_f^2 - \left(\omega / k \right)^2 \right]^2 + 4\omega^2 b_m^2}^{1/2}, \end{aligned}$$

$$tg \varphi_{z\alpha} = \frac{2b_m \omega}{c_f^2 - \left(\omega / k \right)^2},$$

$$A_m = \mu_0 \chi H_a^2 / 4,$$

$$b_m = \left[\eta_v + \left(\frac{4}{3} \right) \eta_s \right] / \rho,$$

$$\eta(H) = \left(\frac{\tau_{sh}}{\gamma_v} + \eta_r \right) + \frac{1}{4} \frac{\tau_n M(H)}{\left(1 + (\tau_n \tau_s HM(H)) / J \right)}, \quad (6)$$

$$k = \frac{\omega}{v_\phi}.$$

H^* – постоянная составляющая напряженности управляющего поля; k – волновой вектор; c_f – скорость звука в магнитореологической среде; l – высота объема магнитореологической среды в рабочей камере; $\varphi_{z\alpha}$ – разность фаз; η_r – реологическая вязкость, без проявления неньютоновских свойств, до помещения в механические поля; τ_{sh} – сдвиговое напряжение; J – суммарный момент инерции частиц; τ_n, τ_s – времена релаксации немагнитных и магнитных частиц; γ_v – градиент скорости; ω – угловая частота; v_ϕ – фазовая скорость волны.

При создании акустических волн, частоты которых совпадают с частотами гасимых волн, но находятся с ними в противофазе, рационально выразить отклонение, отвечающее результирующим колебаниям в виде [16–18]:

$$x_{tot} = X_{mgh} \sin(\omega t + \varphi_{0gh}) + X_{mem} \sin(\omega t + \varphi_{0em}). \quad (7)$$

Или

$$x_{tot} = X_{mtot} \sin(\omega t + \varphi_{0tot}). \quad (8)$$

X_{mgh} – амплитуда ударной волны; X_{mem} – амплитуда генерируемой волны; φ_{0gh} – начальная фаза колебаний ударной волны; φ_{0em} – начальная фаза колебаний генерируемой волны.

Амплитуда результирующих колебаний

$$X_{mtot} = \sqrt{X_{mgh}^2 + X_{mem}^2 + 2X_{mgh}X_{mem} \cos(\varphi_{0gh} - \varphi_{0em})}. \quad (9)$$

Начальная фаза результирующих колебаний

$$\varphi_{0tot} = \operatorname{arctg} \frac{X_{mgh} \sin(\varphi_{0gh}) + X_{mem} \sin(\varphi_{0em})}{X_{mgh} \cos(\varphi_{0gh}) + X_{mem} \cos(\varphi_{0em})}. \quad (10)$$

Численная модель расчета характеристик эффекта жидкого поршня:

$$B_z = \frac{B_0 sh kx}{shkl} \cos(kz - \omega t),$$

$$B_x = \frac{B_0 ch kx}{shkl} \sin(kz - \omega t),$$

$$H_z = \frac{B_z}{\mu_0 (1 + \chi)},$$

$$H_x = \frac{B_x}{\mu_0 (1 + \chi)}, \quad (11)$$

$$M_z = \frac{\chi B_z}{\mu_0 (1 + \chi)},$$

$$M_x = \frac{\chi B_x}{\mu_0 (1 + \chi)},$$

$$\rho' = \frac{\partial p}{\partial \rho} \rho' = c_f^2 \rho',$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -c_f^2 \nabla \rho' + \frac{1}{2} \mu_0 \chi \nabla H^2,$$

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho \operatorname{div} v = 0,$$

$$v_z = \frac{\left(\frac{A_r}{\rho} \right) \cdot \omega / k}{\left(\omega / k \right)^2 - c_f^2} \cos 2(kz - \omega t),$$

$$v_x = 0,$$

$$A_h = \mu_0 \chi H_a^2 / 4,$$

$$H_a = \frac{B_0}{\mu_0 (1 + \chi) shkl}.$$

ρ' – отклонения от начальных значений.

Численный эксперимент

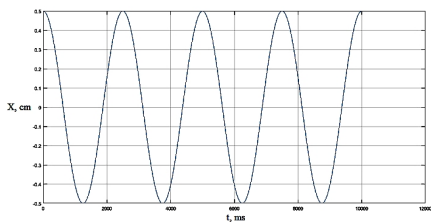


Рис. 2. Динамика изменения амплитуды ударной волны

Ударные волны представляют собой акустические волны, возникающие вследствие изменения давления и плотности в среде по направлению их распространения. В целом распространение акустических волн в среде является чередованием участков декомпрессии и компрессии среды, в которой они распространяются.

Рассмотрим самый простой вид акустических волн – периодические синусоидальные колебания.

Смоделируем распространение ударной волны в канале без учета эффекта затухания в вязкой среде (рис. 2).

В случае наложения аналогичной ударной волны в противофазе к акустической волне, распространяющейся в среде, происходит ее полное поглощение, результаты моделирования данного эффекта представлены на рис. 3.

Теперь рассмотрим вариант скоростных характеристик ударной волны, распространяющейся в среде без учета эффекта вязкого затухания, приведенных на рис. 4.

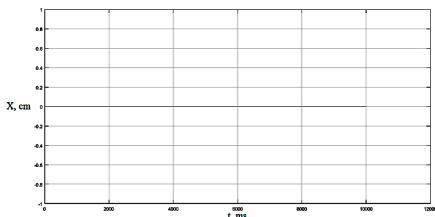


Рис. 3. Значение амплитуды ударной волны при регулировании по принципу противофазы

Принимая во внимание то, что генерирование акустических волн в противофазе происходит при помощи бегущего управляющего поля, зададим требуемые частотно-фазовые характеристики напряженности управляющего поля (рис. 5). Скоростная характеристика акустической регулирующей волны, генерируе-

мой бегущим управляющим магнитным полем изображена на рис. 6.

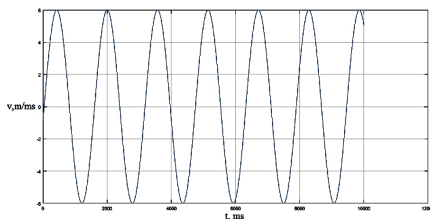


Рис. 4. Динамика изменения скорости ударной волны

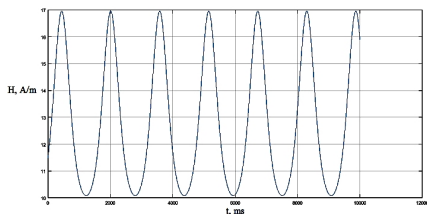


Рис. 5. Динамика изменения напряженности управляющего поля

При анализе рис. 5–6 очевидна зависимость скоростных характеристик регулирующей акустической волны не только от частотно-фазовых характеристик, но и от значений напряженности магнитного поля. Так как акустические волны возникают вследствие изменения давления и плотности в среде по направлению их распространения, очевидно, что резкое повышение значений напряженности магнитного поля способно приводить к росту вязкости, увеличению электромагнитной составляющей полного давления в магнитореологической среде, торможению потока. Резкое падение значений напряженности, наоборот, снижает вязкость и уменьшает электромагнитную составляющую давления. Данное чередование участков компрессии и декомпрессии среды генерируется посредством бегущего электромагнитного поля и создает наблюдаемый акустический эффект.

Результирующий график при наложении акустических волн, ударной и регулирующей, продемонстрирован на рис. 7.

Полученные результаты численного эксперимента подтверждают эффективность предложенного способа защиты магнитореологических систем от явлений гидравлического удара.

Разработанный метод численного моделирования позволяет рассчитывать рабочие характе-

ристики магнитореологического устройства защиты трубопроводов от гидроудара.

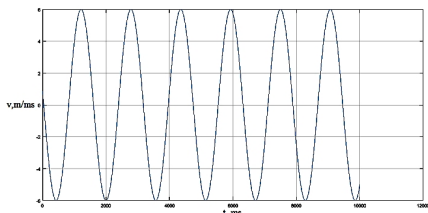


Рис. 6. Динамика изменения скорости регулирующей волны

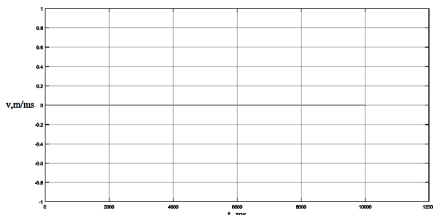


Рис. 7. Значение скорости ударной волны при регулировании по принципу противофазы

Новизна

Разработана конструкция магнитореологического устройства защиты трубопровода от гидроудара, отличающаяся от ранее известных тем, что рабочий процесс устройства заключается в создании бегущего управляющего поля или неоднородного распределения электромагнитного поля, то есть и неоднородного распределения вязкостных свойств в объеме за счет каскада блоков управления, выполненных из сборок дифференциальных электромагнитов.

Разработан метод численного моделирования оригинального магнитореологического устройства защиты трубопровода от гидроудара, позволяющий определять его основные рабочие параметры.

Заключение

Разработанный способ защиты магнитореологических систем, включающих в себя гидравлическую аппаратуру, от явлений гидравлического удара эффективен.

Создана конструкция устройства, позволяющая осуществлять гашение ударных волн, препятствовать их распространению в магнитореологической среде и сохранять целостность магистрали.

Численный эксперимент подтверждает эффективность способа и работоспособность конструктивных решений.

Предлагаемое устройство применимо для реализации эффекта жидкого поршня.

Список литературы

1. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф., Гордон А.В. Проектирование электрических аппаратов авиационного электрооборудования. М.: Оборонгиз, 1960. 515 с.
2. Пат. 2145394 РФ. Магнитожидкостное устройство для гашения колебаний / В.Н. Бурченков и др. Опубл. 10.02.2000, Бюл. № 4.
3. Пат. 2449188 РФ. Регулируемый магнитореологический пневматический амортизатор / А.Б. Корчагин и др., опубл. 27.04.2012, Бюл. № 12.
4. Пат. 2232316 РФ. Магнитореологический амортизатор / Е.П. Гусев и др. Опубл. 27.10.2003, Бюл. № 30.
5. Пат. 2106551 РФ. Магнитореологический виброгаситель / Ю.Б. Кудряков и др. Опубл. 10.03.1998.
6. Пат. 2354867 РФ. Динамический гаситель / И.А. Яманин и др. Опубл. 10.05.2009, Бюл. № 13.
7. Пат. 2561610 РФ. Магнитореологический амортизатор / Б.А. Гордеев и др. Опубл. 27.08.2015, Бюл. № 24.
8. Беляев А.В., Смородин Б.П. Конвекция магнитной жидкости под действием переменного магнитного поля // Прикладная механика и техническая физика. 2009. Т. 50. №4. С. 18–27.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
10. Найгерт К.В., Тутьин В.Т., Целищев В.А. Способ управления расходными характеристиками магнитореологической жидкости за счет создания гидродинамических и неньютоновских эффектов во внешних динамических электромагнитных полях: пат. заявка РФ. № 2018130914, 27.08.2018.
11. Итоги науки. Выпуск 35. Гл. 3. Физические основы проектирования магнитореологических систем нового поколения / К.В. Найгерт, В.А. Целищев и др. // Избранные труды Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий. Москва: РАН, 2018. 90 с.
12. Hardware Implementation of Automatic Control System for New Generation Magnetorheological Supports / K.V. Naigert, V.A. Tselishev // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 2219–2228. 2019.
13. New Generation Magnetorheological, Magnetodynamic, and Ferrofluid Control Devices with Nonstationary Electromagnetic Fields / K.V. Naigert, V.A. Tselishev // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 1375–1384. 2019.
14. Полунин В.М. Акустические свойства нанодисперсных магнитных жидкостей. М.: Физматлит, 2012. 383 с.

15. Такетоми С., Тикадзуми С. Магнитные жидкости. М.: Мир, 1993. 272 с.
16. Инман Дэниел Дж. Инженерная вибрация. Прентис Холл. 2001.
17. Томпсон У.Т. Теория вибраций. Нельсон Торнс Лтд. 1996.
18. Тонгуе Б. Принципы вибрации. Издательство Оксфордского университета. 2001.

Поступила 24.02.19
Принята в печать 29.03.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-70-77>

PROTECTION OF DRIVE SYSTEMS FROM HYDRAULIC IMPACTS WITH THE HELP OF MAGNETORHEOLOGICAL DEVICES

Katarina V. Naigert – Cand.Sci. (Eng.), Doctoral Student
Department of Automobile Transport, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: kathy_naigert@mail.ru

Vladimir A. Tselishchev – Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of Department
Department of Applied Hydromechanics, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia.
Email: pgl.ugatu@mail.ru

Abstract. Protecting drive systems from pressure spikes or drops is an important task as it aims to preserve the integrity of hydraulic lines/equipment and the stability of operating parameters. As control equipment with mechanical valves is often used in high pressure magnetorheological drive systems, their protection from hydraulic impact is extremely relevant. This research paper describes a technique for protecting drive systems from hydraulic impacts with the help of magnetorheological devices and their design. The authors describe a number of ways to set the control signal for the original magnetorheological device, which can help prevent pressure spikes in two different ways. It can either be realized through the use of unevenly distributed electromagnetic field and viscosity in the volume of magnetorheological fluid or with the help of a travelling magnetic field which excites longitudinal acoustic waves in the volume of magnetized fluid thus neutralizing the shock wave. The first option is based on dissipation of mechanical energy with the viscous fluid, while the second option is based on the effect observed when overlapping the shock wave and the control wave which have the same frequency and amplitude but are in phase opposition. Viscosity to velocity ratios are specified which are necessary for control. Since the antiphase method is characterized with good dynamics and small transient time values, a numerical model was developed which can be used to calculate the characteristics of the control acoustic wave, as well as the required parameters of the travelling electromagnetic control field. The results of a numerical experiment confirmed the effectiveness of the proposed method and the consistency of the numerical model described.

Keywords: Protection of drive systems, hydraulic impact, magnetorheological devices, travelling magnetic fields, dissipation of mechanical energy.

References

1. Balagurov V.A., Galteev F.F., Gordon A.V. *Proyektirovaniye elektricheskikh apparatov aviatsionnogo elektrooboro-*
- rudovaniya* [Design of electrical devices for aviation industry]. Moscow: Oborongiz, 1960, 515 p. (in Russ.)
2. Burchenkov V.N. et al. *Magnitozhidkostnoye ustroystvo dlya gasheniya kolebaniy* [Ferrofluid device for oscillation damping]. Patent RF, no. 2145394, 2000.
3. Korchagin A.B. et al. *Reguliruyemyy magnitoreologicheskyy pnevmaticheskyy amortizator* [Adjustable magnetorheological pneumatic damper]. Patent RF, no. 2449188, 2012.
4. Gusev E.P. et al. *Magnitoreologicheskyy amortizator* [Magnetorheological shock absorber]. Patent RF, no. 2232316, 2003.
5. Kudryakov Yu.B. et al. *Magnitoreologicheskyy vibrogasitel* [Magnetorheological vibration damper]. Patent RF, no. 2106551, 1998.
6. Yamanin I.A. et al. *Dinamicheskyy gasitel* [Dynamic damper]. Patent RF, no. 2354867, 2009.
7. Gordeev B.A. et al. *Magnitoreologicheskyy amortizator* [Magnetorheological damper]. Patent RF, no. 2561610, 2015.
8. Belyaev A.V., Smorodin B.L. Convection of magnetic fluid caused by alternating magnetic field. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika* [Applied mechanics and applied physics], vol. 50, no. 4, 2009, pp. 18–27. (in Russ.)
9. Landau L.D., Lifshits E.M., *Gidrodinamika* [Hydrodynamics]. Moscow: Nauka, 1986. (in Russ.)
10. Naigert K.V., Tutynin V.T., Tselishchev V.A. *Sposob upravleniya rashodnymi kharakteristikami magnitoreologicheskoy zhidkosti za schet sozdaniya gidrodinamicheskikh i nenyutonovskikh effektov vo vneshnikh dinamicheskikh elektrimagnitnykh pol'yakh* [A method to control the flow of magnetorheological fluid through the creation of hydrodynamic and non-Newtonian effects in external dynamic electromagnetic fields]. Patent application RF, no. 2018130914, 2018.
11. Naigert K.V., Tselishchev V.A. Monograph. Scientific outcomes. Issue 35. Chapter 3. Physical principles in the design of new generation magnetorheological systems. *Izbrannyye trudy Vserossiyskoy konferentsii po problemam nauki i tekhnologii* [Selected Works of the All-Russian Conference on Problems of Science and Technology. Moscow: Russian Academy of Sciences, 2018, 90 p. (in Russ.)
12. Naigert K.V., Tselishchev V.A. Hardware Implementation of Automatic Control System for New Generation Magnetorheological Supports. Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. Lec-

- ture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 2219–2228, 2019.
13. Naigert K.V., Tselishchev V.A. New Generation Magnetorheological, Magnetodynamic, and Ferrofluid Control Devices with Nonstationary Electromagnetic Fields. Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer, Cham, pp. 1375–1384, 2019.
 14. Polunin V.M. *Akusticheskiye svoystva nanodispersnykh magnitnykh zhidkostey* [Acoustics of nanodispersed magnetic fluids]. Moscow: Fizmatlit, 2012, 383 p. (in Russ.)
 15. Taketomi S., Tikadzumi S. *Magnitnyye zhidkosti* [Magnetic fluids]. Moscow: Mir, 1993, 272 p. (in Russ.)
 16. Daniel J. Inman Engineering Vibration. Prentice Hall. 2001.
 17. W.T. Thompson Theory of Vibrations. Nelson Thornes Ltd. 1996.
 18. B. Tongue Principles of Vibration. Oxford University Press. 2001.

Received 24/02/19

Accepted 29/03/19

Образец для цитирования

Найгерт К.В., Целищев В.А. Защита приводных систем от гидроудара магнито-реологическими устройствами // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т. 17. №3. С. 70–77. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-70-77>

For citation

Naigert K.V., Tselishchev V.A. Protection of Drive Systems from Hydraulic Impacts with the Help of Magnetorheological Devices. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 3, pp. 70–77. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-70-77>
