

УДК 621.752.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОЙ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В ФЕРРИТОВЫХ ЭЛЕМЕНТАХ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ВИБРООПОР

© 2008 г.

А.Б. Гордеев

Нижегородский филиал Института машиноведения РАН

vibrogordeev@mail.ru

Поступила в редакцию 11.03.2008

Рассматриваются вопросы моделирования магнитореологических трансформаторов гидроопор с учетом потребляемой энергии. Создание активных систем гашения вибрации и ударов предполагает заполнение гидроопор рабочей жидкостью, изменяющей свои характеристики под действием внешних и внутренних электромагнитных полей. В конструкцию гидроопоры в этом случае вводят дополнительные узлы – магнитореологические трансформаторы. Использование в магнитореологических трансформаторах гидроопор дорогостоящих магнитотвердых ферритовых и магнитоstrictionных элементов не всегда оказывается экономически оправданным. На основе анализа предложенной модели делается вывод, что управление потоком магнитореологической жидкости наиболее эффективно в областях наибольшей неоднородности магнитного поля.

Ключевые слова: гидроопора, магнитореологический трансформатор, магнитный поток, магнитореологическая жидкость, магнитотвердые и магнитомягкие материалы.

Ужесточающиеся требования к допустимым уровням шума и вибрации побуждают разработчиков методов и средств виброзащиты искать неординарные пути решения этой проблемы. С другой стороны, поиски альтернативных источников энергии и дальнейшего ее использования в задачах прецизионного машиностроения и приборостроения выявили ряд новых источников шума и вибрации на транспорте, строительстве, а также в жилых помещениях.

Использование упругометаллических пассивных виброгасителей не всегда дает требуемый результат. Поэтому в мировой практике интенсивно развиваются способы виброгашения, основанные на иных физических принципах. В частности с применением в виброзащите газогидравлических демпферов (гидроопор) [1, 2]. Требования промышленности к характеристикам виброзащитных систем с каждым годом ужесточаются, что побуждает разработчиков искать новые технические решения. В частности разрабатывать активные системы виброгашения, включающие в себя элементы адаптивной настройки и электромеханического преобразования с рекуперацией поглощенной энергии внешнего источника вибрации и шума [3, 4]. Поэтому основой нового поколения гидроопор является рабочая среда (гидравлический трансформатор) с изменяющимися реологическими характеристиками. Наиболее перспективными в этом отношении являются управляемые транс-

форматоры с электрореологическими и магнитореологическими заполнителями, движением которых в дроссельных каналах можно управлять с помощью внутренних и внешних электромагнитных полей. Электрореологические и магнитореологические жидкости (ЭРЖ и МРЖ соответственно) обладают свойством мгновенного, обратимого и управляемого перехода от жидкого состояния до квазитвердого путем приложения внешнего электрического (магнитного) поля [5–7]. Изменяющиеся под действием внешних управляющих электромагнитных полей реологические характеристики рабочих жидкостей не являются единственным их преимуществом перед обычными заполнителями. В процессе дросселирования за счет действия помпедоторных сил можно ускорять движение рабочей среды или замедлять. Достоинствами ЭРЖ и МРЖ являются: несжимаемость, малая плотность и быстрота реакции на внешнее воздействие (менее 1 мс). ЭРЖ обеспечивают высокую силу реакции на внешнее воздействие при относительно небольших размерах (вес и геометрические параметры). Продолжительный период функционирования при широком температурном диапазоне (от –40 °С до 100 °С) делает возможным использование ЭРЖ и МРЖ в экстремальных режимах работы. К тому же данные жидкости не абразивны, не токсичны и не загрязняют окружающую среду, удовлетворяя медицинским и экологическим нормам.

Управление реологическими свойствами ЭРЖ и МРЖ позволяет использовать их для широкого круга задач в различных областях деятельности.

Заполнение внутренних камер гидропоры магнитореологическими составами предполагает изменение ее конструкции путем введения новых управляющих элементов – магнитореологических трансформаторов.

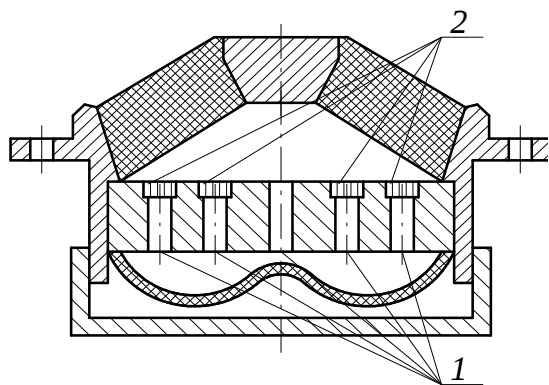


Рис. 1. Гидропора с управляемыми дроссельными каналами

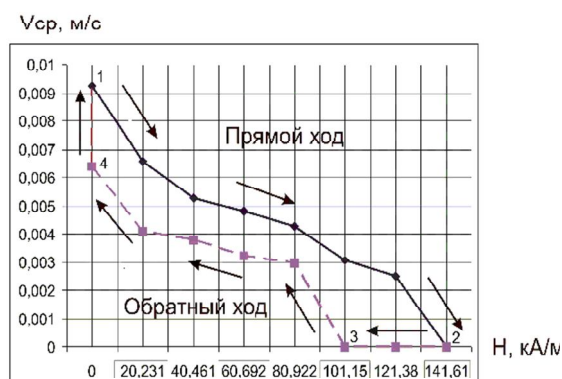


Рис. 2. Динамика протекания МРЖ в дроссельном канале в зависимости от напряженности внешнего магнитного поля

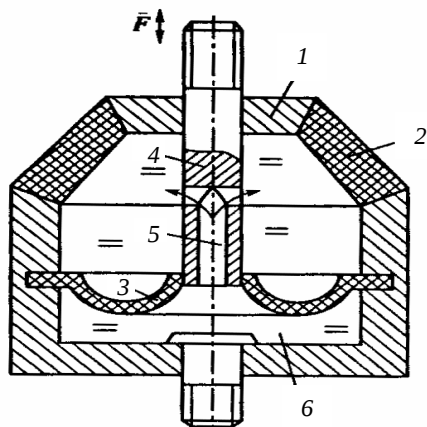


Рис. 3. Гидропора с инерционным магнитореологическим трансформатором

Гидропора с магнитореологической жидкостью (рис. 1) содержит например, пять параллельных инерционных трубок 1, причем четыре из них содержат магнитореологические жидкостные клапаны 2, которые могут управлять потоками жидкости через эти трубки. Включением – выключением клапанов с помощью комбинаций «открыто – закрыто» выбирается шестнадцать различных частот настройки в диапазоне 18–43 Гц. Это достигается приложением внешнего магнитного поля, под действием которого резко увеличивается вязкость в отдельной трубке, и течение через эту трубку прекращается. Если же давление жидкости преодолевает напряжение магнитного поля, клапаны открываются. С другой стороны, под действием внешнего электромагнитного поля изменяется вязкость жидкости.

При этом возникает сложная техническая задача, управляющее магнитное поле должно изменяться синфазно с изменением частоты внешнего вибросигнала, меняя при этом полярность. Перед разработчиками стоят две противоречивые проблемы: с одной стороны, необходимо усилить напряженность управляющего магнитного поля, с другой стороны, менять его полярность с частотой до 500 Гц. Но при напряженности магнитного поля порядка 140 кА/м в дорогостоящих ферритовых сердечниках, входящих в состав магнитореологических трансформаторов, остаточная магнитная индукция в них может достигать 30% от первоначальной, что вызывает появление гистерезиса (рис. 2). Это недопустимо в рабочих условиях эксплуатации гидропоры. Поэтому в зависимости от назначения гидропоры в качестве сердечников в магнитореологических трансформаторах можно использовать не только ферритовые элементы, и элементы из магнитомягких материалов, которые значительно дешевле, а также магнитоотрицательные материалы. На рис. 3 представлена эквивалентная схема гидропоры с инерционным магнитореологическим трансформатором. Принцип действия ее заключается в следующем.

При воздействии на нагрузочный элемент 1, и, следовательно, на шток 4 внешней периодической силы F с частотой ω_0 , происходит деформация резинометаллического корпуса 2 и смещение мембраны 3 с той же частотой ω_0 . Так как мембрана выполнена сплошной и объемы камеры, разделенной мембраной, сообщаются только посредством канала 5, выполненного в штоке из магнитоотрицательного материала, то под действием внешней силы магни-

тореологическая жидкость через этот канал начинает попеременно поступать из нижней камеры в верхнюю и наоборот, в зависимости от направления силы. Индукция B возникающего магнитного поля возрастает при увеличении внешней силы F . Распределение вектора магнитной индукции B по сечению гидравлического трансформатора 5 представлено в виде [9]:

$$B = \frac{a^2 \Delta P}{L} \mu_a \left(\frac{\gamma}{\nu \rho} \right)^{\frac{1}{2}} B_0,$$

где a – радиус дроссельного канала трансформатора, ΔP – разность давлений на входе и выходе дроссельного канала, L – длина канала, μ_a – магнитная проницаемость реологического заполнителя, γ – проводимость реологического заполнителя, ν – кинематическая вязкость заполнителя, ρ – плотность заполнителя, B_0 – магнитная индукция материала штока.

Плотность тока J , возникающего от движения жидкости по каналу определяется по формуле $J = \gamma [VB]$, где V – скорость движения жидкости в канале. От величины этого тока зависит величина пондемоторных сил, действующих на протекающую жидкость.

Однако и магнитомягкие материалы обладают некоторой остаточной магнитной индукцией, которую надо погасить перед сменой полярности магнитного поля. Для этого применяются электромагнитные поля с относительно высокой частотой (относительно вибросигналов) порядка 5 кГц. Более высокие частоты для магнитомягких материалов применять нецелесообразно, поскольку возникает скин-эффект, который препятствует проникновению магнитного поля внутрь материала.

Сложной задачей при управлении потоком МРЖ является создание магнитных полей с минимальной остаточной магнитной индукцией. Здесь возможны три варианта. Магнитный поток создается соленоидом с ферритовыми стержнями, обладающими высокой магнитной проницаемостью с узкой петлей гистерезиса почти без остаточной магнитной индукции. Такие ферриты относятся к магнитомягким материалам и имеют высокую стоимость. Второй вариант – применение магнитотвердых материалов для создания управляющего магнитного потока. Однако здесь требуется устранять остаточную магнитную индукцию. Причем время переходных процессов при размагничивании магнитотвердого материала сердечника не должно превышать длительность периода высшей гармоники входного вибросигнала. Кроме

того магнитотвердые материалы при размагничивании требуют высоких, по сравнению с первым вариантом, энергетических затрат. Третий вариант – применение для управления магнитным полем в гидроопорах магнитомягких материалов с минимальной остаточной индукцией, но ее также требуется устранить. В зависимости от назначения гидроопоры имеет смысл применять или первый, или третий варианты. Например при защите от ударных нагрузок прецизионных высокоточных измерительных преобразователей целесообразно использовать первый вариант с ферритами CuFe_2O_4 с кубической структурой. Ферриты этого типа имеют намагниченность насыщения порядка 135 кА/м и удельное сопротивление $\rho_0 = 10^4$ Ом·м. Основным недостатком – высокая стоимость (на порядок выше обычной электротехнической стали). Если основное назначение гидроопоры – защита от шума и вибрации, то оптимальным вариантом является третий вариант, с применением в качестве сердечника управляющего трансформатора холоднокатанных сталей типа 27КХ, 49К2ФА или электротехнических сталей марки 1521. Применение этих материалов повышает стоимость гидроопоры не более 5%.

Процесс размагничивания указанных материалов заключается в следующем.

Электромагнитная волна проникает из диэлектрика в проводящую среду и распространяется в последней. Поскольку среда простирается теоретически в бесконечность и падающая волна в толще проводящей среды не встречает границы, которая «возмутила» бы ее распространение, то отраженной волны в данном случае не возникает.

При наличии только одной падающей волны

$$\dot{H}_{\text{пад}} = \dot{C}_2 e^{pz} \quad \text{и} \quad \dot{E}_{\text{пад}} = Z_c \dot{C}_2 e^{-pz}.$$

Постоянную интегрирования $\dot{C}_2$ найдем из граничных условий. Если обозначить напряженность магнитного поля на поверхности проводящей среды через $\dot{H}_a = H_a e^{j\psi_a}$, то при $z = 0$

$$\dot{C}_2 = \dot{H}_a.$$

Поэтому

$$\dot{H} = H_a e^{-kz} e^{-jkz} e^{j\psi_a}. \quad (1)$$

В свою очередь

$$\dot{E} = H_a e^{-kz} \sqrt{\frac{\omega \mu_a}{\gamma}} e^{-jkz} e^{j\psi_a} e^{j45^\circ}. \quad (2)$$

Можно записать выражения для мгновенных значений H и E . С этой целью надо правые час-

ти (1) и (2) умножить на $e^{j\omega t}$ и взять мнимые части от получившихся произведений.

Получим

$$H = H_a e^{-kz} \sin(\omega t - kz + \psi_a) \quad (3)$$

и

$$E = H_a \sqrt{\frac{\omega \mu_a}{\gamma}} e^{-kz} \times \sin(\omega t - kz + \psi_a + 45^\circ) \quad (4)$$

Проанализируем полученные выражения. Амплитуда H равна $H_a e^{-kz}$. Амплитуда E равна $H_a \sqrt{\frac{\omega \mu_a}{\gamma}} e^{-kz}$. По мере увеличения z мно-

житель e^{-kz} уменьшается по показательному закону. Следовательно, по мере проникновения электромагнитной волны в проводящую среду амплитуды E и H уменьшаются по показательному закону. На рис. 4 изображены огибающие амплитуд H , построенные по уравнению $H_a e^{-kz}$.

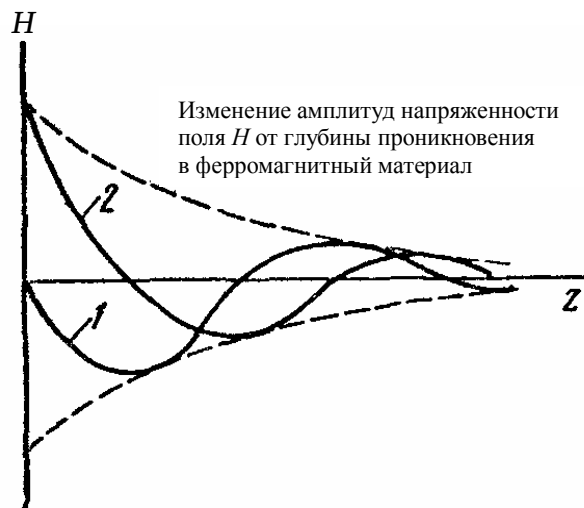


Рис. 4

Мгновенное значение H и E определяется аргументом синуса. Аргумент синуса в выражении (4), например, зависит от z и от ωt .

Если принять $\omega t = \text{const}$ и поинтересоваться графиком мгновенных значений H в функции от z , то будет получена кривая 1 (рис. 4) при $\omega t + \psi_a = 0$ и кривая 2 при $\omega t + \psi_a = 90^\circ$.

Для того чтобы охарактеризовать, насколько быстро уменьшается амплитуда падающей волны по мере проникновения волны в проводя-

щую среду, вводят понятие глубины проникновения.

Под глубиной проникновения Δ понимают расстояние вдоль направления распространения волны (вдоль оси z), на котором амплитуда падающей волны E (или H) уменьшается в $e = 2.7183$ раза [8]. Уравнением для определения глубины проникновения является выражение

$$e^{-k\Delta} = e^{-1}.$$

Отсюда следует, что $k\Delta = 1$ или

$$\Delta = 1/k. \quad (5)$$

Глубина проникновения зависит от свойств проводящей среды (γ и μ) и от частоты ω . Так, если электромагнитная волна имеет частоту $f = 5000$ Гц и проникает в проводящую среду, у которой $\gamma = 10^7$ Ом $^{-1}$ м $^{-1}$ и $\mu = 10^3$, то

$$\begin{aligned} k &= \sqrt{\frac{\omega \gamma \mu_a}{2}} = \\ &= \sqrt{\frac{2\pi \cdot 5000 \cdot 10^3 \cdot 1.256 \cdot 10^{-6} \cdot 10^7}{2}} = \\ &= 14100 [1/\text{м}]. \end{aligned}$$

Глубина проникновения, $\Delta = 1/k \approx 7 \cdot 10^{-5}$ м, т.е. на расстоянии в $70 \cdot 10^{-6}$ м = 70 мкм амплитуды H и E снизились в 2.7183 раза.

Исходя из изложенного можно сделать следующие выводы.

Дроссельные каналы в гидроопорах с магнито-реологическими жидкостями целесообразно выполнять в виде тонкостенных трубок из магнитомягкого материала для облегчения последующего их размагничивания.

Так как эффективное управление потоком заряженных частиц и частиц с нескомпенсированными магнитными моментами осуществляется в поперечных магнитных полях, где сила Лоренца наибольшая, то протяженность дроссельного канала не влияет на скорость потока жидкости. Но на входах и выходах дроссельных каналов, где наибольшая неоднородность магнитного поля, которая может меняться от различных факторов, скорость потока магнито-реологической среды может изменяться в несколько раз. Этот эффект позволяет разрабатывать новые конструкции гидропор с настройкой на различные частоты входного вибросигнала.

Работа выполняется при поддержке РФФИ (грант № 08-08-97057-Р_Поволжье).

Список литературы

1. Гордеев Б.А., Образцов Д.И. Виброизолирующая подвеска силового агрегата автомобиля // Автомобильная промышленность. 1990. № 6. С. 17.
2. Гордеев Б.А., Тумаков С.Ф., Бугайский В.В. Экспериментальные исследования характеристик гидропор на вибростендах // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2006. № 5. С. 84–87.
3. Гордеев Б.А., Ерофеев В.И., Синев А.В. Применение инерционных электрореологических трансформаторов в системах виброизоляции // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2003. № 6. С. 22–27.
4. Гордеев Б.А., Морозов М.П., Синев А.В. Влияние магнитных полей на распределение скоростей потока жидкости в канале квадратного сечения магнитореологического трансформатора // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2006. № 1. С. 89–93.
5. Згаевский В.Э., Яновский Ю.Г., Карнет Ю.Н. Описание реологических свойств электрореологических жидкостей на основе многочастичной, упорядоченной, трехмерной модели // Механика композиционных материалов и конструкций. 2002. Т. 8. № 4. С. 577–584.
6. Згаевский В.Э., Яновский Ю.Г. Описание реологических свойств электрореологических жидкостей на основе кристаллической модели композита // Механика композиционных материалов и конструкций. 2001.
7. United States Patent № 6029783. Feb. 29, 2000. Variable resistance device using electroactive fluid // Alvin R. Wirthin. Int. Cl. F16F 15/03.
8. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1967. 775 с.
9. А.с. № 17799843 (СССР) Виброизолирующее устройство / Гордеев Б.А., Образцов Д.И., Юдин В.А., Поташев О.А. кл. F 16 F 6/00. 07.12.92. Бюл. № 45.

**MODELING OF FERRITE ELEMENT REMANENCE
OF HYDROMOUNT MAGNETORHEOLOGICAL DAMPERS****A.B. Gordeev**

The modeling of hydromount magnetorheological (MR) dampers is considered taking into account their energy consumption. The design and development of hydromounts with hydraulic fluids which change their characteristics depending on external electromagnetic fields raise some questions. Without answering such questions, the development of active systems of vibration and shock damping will require substantial financial expenditures. The use of costly hard ferrite and magnetostrictive materials in hydromount MR dampers is not always economically sound. On the basis of the model suggested it is concluded that the MR liquid flow control can best be done in the regions with the highest magnetic field nonuniformity.