

УДК 532.13

О БЫСТРОДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ БЛОКОВ УПРАВЛЕНИЯ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

К. В. НАЙГЕРТ¹, В. А. ЦЕЛИЩЕВ²

¹ kathy_naigert@mail.ru, ² pgl.ugatu@mail.ru

¹ ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)» (ЮУрГУ НИУ)

² ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 05.09.2018

Аннотация. Большинство исследований магнитореологических систем посвящены совершенствованию геометрии проточной части магнитореологических аппаратов или разработки рабочих сред с новыми физико-химическими свойствами, при этом развитию конструкций электромагнитных блоков управления магнитореологических устройств уделяется незаслуженно мало внимания. Очевидно, что именно управляющие электромагнитные поля, генерируемые блоками управления, во многом определяют специфику рабочих процессов в магнитореологических устройствах. Поэтому инновационные решения в конструкциях электромагнитных блоков управления могут вывести характеристики магнитореологических систем на качественно новый уровень и создать линейку устройств нового поколения.

Ключевые слова: магнитореологические системы; электромагнитные блоки управления; диссипативно-жесткостные характеристики; реологические эффекты; динамические эффекты.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие и появление новых методик управления характеристиками магнитореологической рабочей среды нуждаются в совершенствовании конструкций элементов магнитореологических устройств. В качестве основных ответственных элементов в магнитореологических системах можно выделить электромагнитные блоки управления, создающие электромагнитные поля с требуемыми динамическими характеристиками. Так как именно помещение объема магнитореологической среды во внешнее электромагнитное поле с заданными электродинамическими характеристиками позволяет генерировать различные гидродинамические и реологические эффекты в потоке рабочей жидкости.

Как известно, характеристики электромагнитных полей зависят от параметров сети и конструктивных особенностей электромагнитов. Поэтому поиск новых конструктивных решений при проектировании электромагнитных блоков способствует совершенствованию методик управления потоками магнитореологических сред и повышению эффективности магнитореологических систем.

Очевидно, что варьирование вольт-амперных, амплитудно-частотных, частотно-фазовых характеристик электрического сигнала, а также реализация блоков электромагнитного управления в виде сборки дифференциальных индукторов и установка сборок каскадами открывают возможности создания блоков электромагнитного управления с оптимальными характеристиками

и оригинальными структурами динамических управляющих электромагнитных полей.

АКТУАЛЬНОСТЬ

Блоки электромагнитного управления являются важным конструктивным элементом, в значительной степени влияющим на технические характеристики магнитореологического устройства, поэтому разработка комплекса мер в направлении совершенствования конструкций и оптимизации параметров индукторов дифференциальных электромагнитных блоков управления актуальна.

КОНСТРУКТИВНОЕ РЕШЕНИЕ

Магнитореологические системы нового поколения имеют различное исполнение управляющих электромагнитных блоков в зависимости от функциональных особенностей магнитореологического аппарата.

В магнитореологических системах комбинированного типа применимы дифференциальные индукторы, так как они позволяют создавать управляющие электромагнитные поля со сложными профилями распределения магнитной индукции и напряженности. Очевидно, что геометрия и расположение дифференциальных индукторов в подобных магнитореологических устройствах напрямую зависят от требуемых динамических характеристик электромагнитного поля. Рассмотрим варианты компоновки дифференциальных электромагнитных блоков для различных магнитореологических устройств (рис. 1–4).

Магнитореологическое дросселирующее устройство комбинированного типа (рис. 1), осуществляет регулирование расходных характеристик потока за счет генерации гидродинамических и реологических эффектов в магнитореологической среде посредством создания динамических вращающихся электромагнитных полей, реализация которых возможна путем выполнения электромагнитного блока управления из дифференциальных индукторов и рационализации схем их последовательного включения [1]. Гидродинамические и реологические эффекты

в объеме движущейся магнитореологической среды приводят к требуемому перепаду давления.

Аналогична компоновка дифференциальных индукторов электромагнитов, входящих в каскадный блок управления магнитодинамического насоса (рис. 2) [2]. При этом существует необходимость создания спирального вращающегося поля. Это осуществимо путем применения алгоритма управления индукторов, предусматривающего последовательное включение дифференциальных индукторов, каждого электромагнита со смещением на один индуктор в каждой последующей индукторной сборке, генерируя спиральное бегущее электромагнитное поле, увлекающее за собой частицы магнетика и создающее зоны пониженного и повышенного давления в рабочей полости магнитодинамического устройства.

Демпфирующие магнитореологические системы с дифференциальными индукторами допускают разнообразие в исполнении блоков управления, а реализация неоднородных распределенных диссипативно-жесткостных свойств магнитореологических опор нового поколения достаточно проста [3]. Сборки блоков управления возможно изготавливать как каскадом электромагнитов с дифференциальными индукторами, так и в виде каскада кольцевых индукторов (рис. 3–4).

Дифференциальные электромагниты позволяют оптимизировать и унифицировать производственный процесс блоков управления для различных модификаций магнитореологических опор и собирать блоки управления с требуемыми характеристиками и желаемым направлением действия напряженности и магнитной индукции электромагнитного поля.

Разработанная линейка магнитореологических устройств нового поколения обладает существенными различиями в конструкциях индукторов электромагнитных блоков, что требует развития методов расчета управляющих электромагнитных блоков.

Также имеет значение не только конструкция дифференциальных электромагнитных блоков, но и алгоритмы их включения. Для произвольной компоновки диффе-

ренциального электромагнита проведено компьютерное моделирование, результаты которого изображены на (рис. 5–6) [4]. Результаты моделирования работы дифференциального электромагнита при двух различных алгоритмах включения индукторов

иллюстрируют различия в профиле распространения магнитной индукции и изменения ее численных значений, данное явление необходимо учитывать в процессе проектирования и расчета дифференциальных электромагнитных блоков.

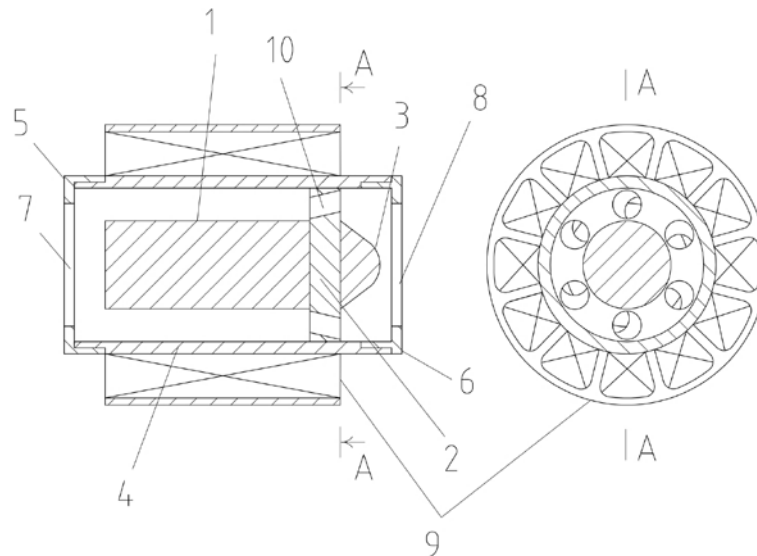


Рис. 1. Магнито реологическое дросселирующее устройство комбинированного типа: 1 – внутренний элемент; 2 – струевыпрямитель; 3 – обтекатель; 4 – корпус; 5, 6 – крышки; 7, 8 – отверстия под патрубки; 9 – блок электромагнитного управления потоком; 10 – отверстие струевыпрямителя

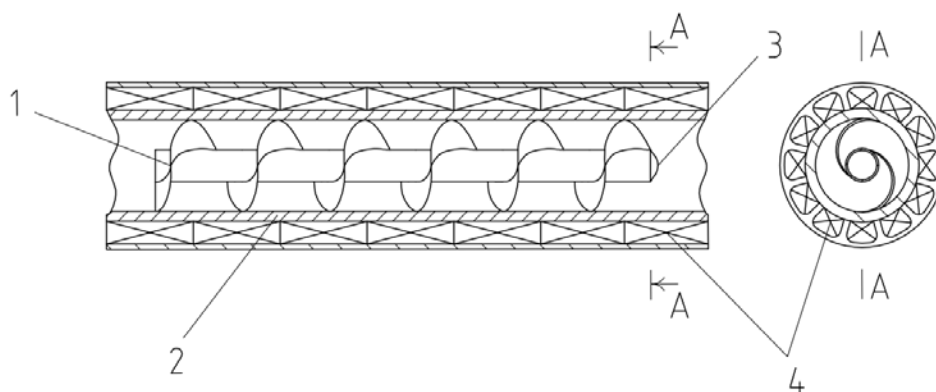


Рис. 2. Магнито динамический насос: 1 – шнек; 2 – корпус; 3 – обтекатель; 4 – каскад блоков электромагнитного управления потоком

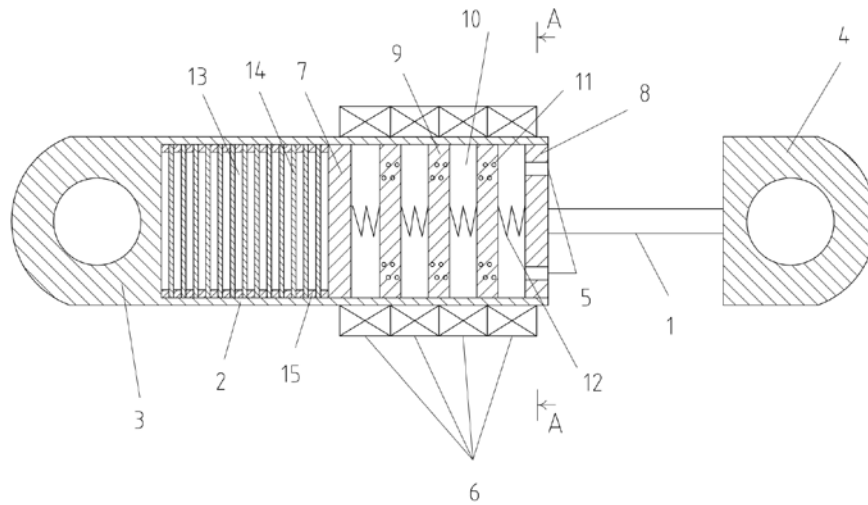


Рис. 3. Магнитодинамический демпфер: 1 – шток; 2 – корпус; 3, 4 – узлы для посадки на объект демпфирования; 5 – отверстия для включения сливной и напорной линий; 6 – серия управляющих электромагнитов; 7 – подвижная межполостная перегородка; 8 – плунжер; 9 – цилиндрическая перегородка из немагнитного материала; 10 – субполость; 11 – спиральный канал; 12 – пружина; 13 – дилатантная жидкость; 14 – упругий жесткий диск; 15 – кольцо из упругого полимерного материала

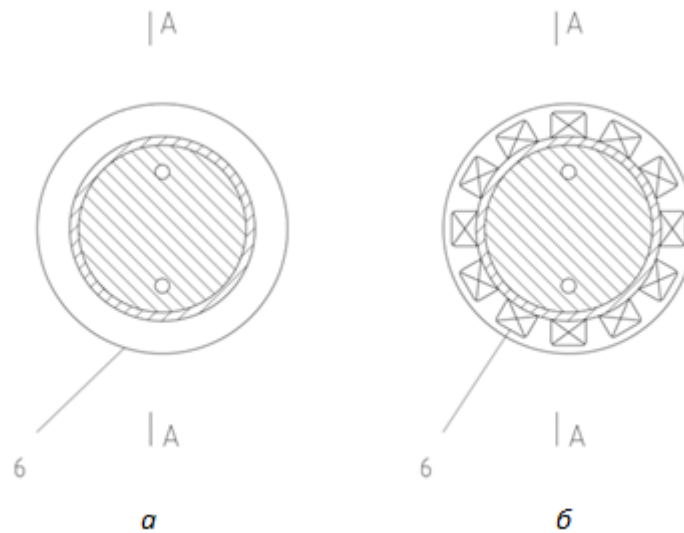


Рис. 4. Магнитодинамический демпфер: б – серия управляющих электромагнитов; а – серия управляющих кольцевых электромагнитов (вид А); б – серия управляющих дифференциальных кольцевых электромагнитов (вид А)

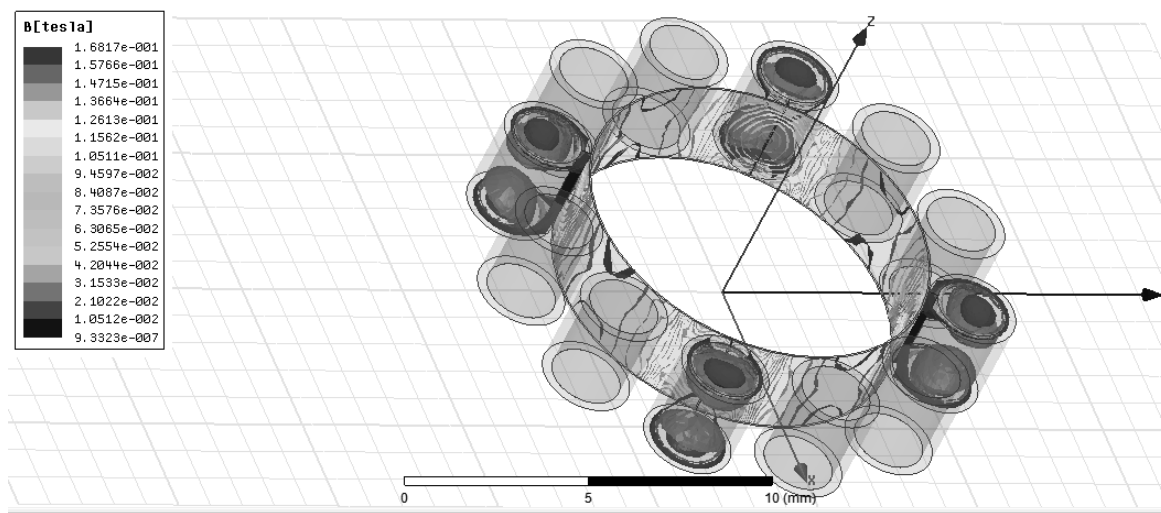


Рис. 5. Дифференциальный блок электромагнитного управления

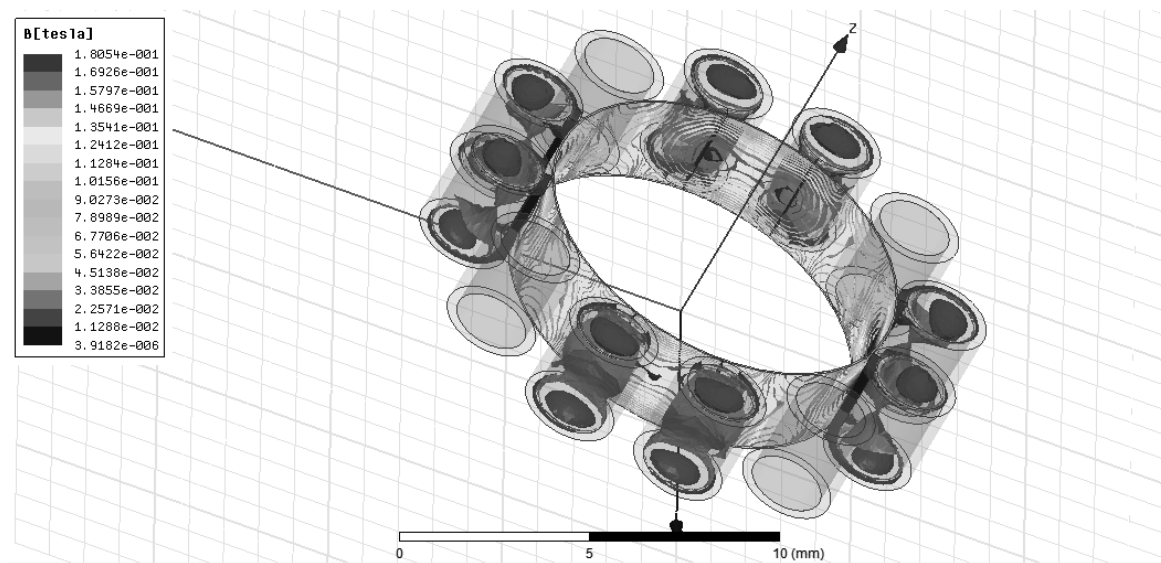


Рис. 6. Дифференциальный блок электромагнитного управления

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Дифференциальный индуктор является, по сути, сборкой коротких цилиндрических проволочных катушек, состоящих из N витков одинакового радиуса.

Поэтому принимая, что электромагнитные сборки состоят из одинаковых индукторов, рассмотрим метод расчета одного индуктора.

Напряженность магнитного поля в произвольной точке короткой катушки:

$$H = \frac{1}{2} \frac{IR_{in}^2}{(R_{in}^2 + z^2)^{3/2}} N,$$

где R – радиус индуктора; z – высота; I – сила тока; N – количество витков.

Для напряженности магнитного поля справедлив принцип суперпозиции:

$$H = \int dH .$$

Принимая во внимание различия в работе блоков управления разработанных магнитореологических устройств, выделим методики расчета обмоток электромагнитов постоянного и переменного тока [5].

Оценку требуемых характеристик индукторов рационально определять по критерию, обозначим его, как магнитодвижущая сила:

$$F = Hl_c = IN,$$

где l_c – длина катушки.

При постоянном токе:

$$F = \frac{U}{R} N = -\frac{US_c N}{\rho l_l N} = \frac{US_c}{\rho l_l},$$

l_l – длина витка:

$$l_l = \pi \frac{d_{in} + D_{in}}{2},$$

где d_{in} – внутренний диаметр индуктора; D_{in} – внешний диаметр индуктора; ρ – удельное сопротивление; R – сопротивление:

$$R = \frac{\rho l_l N}{S_c};$$

S_c – сечение провода:

$$S_c = \frac{F \rho l_l}{U}.$$

Тепловой расчет индуктора проводится по мощности выделяемого тепла:

$$Q_p = \frac{U^2}{R} = \frac{U^2 S_c}{\rho l_l f_{in} S_{in}} = F^2 \frac{\rho l_l}{f_{in} S_{in}},$$

f_{in} – коэффициент заполнения:

$$f_{in} = \frac{NS_c}{S_{in}};$$

где S_{in} – сечение индуктора.

Число витков:

$$N = \frac{f_{in} S_{in}}{S_c}.$$

Для переменного тока:

Напряжение сети из условия уравновешивания активных и реактивных падений напряжения:

$$U^2 = (IR)^2 + (4,44 f N \Phi_m)^2,$$

где f – частота; Φ_m – амплитуда магнитного потока.

Число витков с учетом активных и реактивных падений напряжения:

$$N_s = \frac{(0,8)U}{4,44 f \Phi_m}.$$

Так как нагрев магнитопровода зависит от потерь за счет вихревых токов и гистерезиса, запишем силу тока как:

$$I = \frac{I_m N}{N_s \sqrt{2}},$$

где I_m – амплитуда тока.

Расчет сечения индуктора с учетом активных и реактивных падений напряжения:

$$S_{in} = \frac{N_s \pi d^2}{4 f_{in}}.$$

Активное сопротивление:

$$R_a = \frac{\rho l_l N_s}{S_c}.$$

Максимально допустимая сила тока:

$$I_{max} = j_{lim} S_c,$$

где j_{lim} – допустимая плотность тока.

Рассчитать длину катушки можно как:

$$l_c = \frac{RS_c}{\rho} = \frac{US_c}{I_{max} \rho}.$$

Мощность сборки индукторов в блоке электромагнитного управления:

$$P = UI_{max} n_{in},$$

где n_{in} – число катушек электромагнита.

Соотношение габаритов обмотки электромагнита и его магнитных свойств:

$$IN = H_g l_g + H_{mc} l_{mc} + H_h l_h,$$

где H_g – напряженность магнитного поля в зазоре; l_g – величина зазора; H_{mc} – напряженность магнитного поля в сердечнике; l_{mc} – величина средней линии сердечника (длина магнитного потока в сердечнике); H_h – напряженность магнитного поля в корпусе; l_h – длина магнитного потока в корпусе.

Так как напряженностью магнитного поля в корпусе электромагнита и напряженностью магнитного поля в сердечнике можно пренебречь запишем для сборки в виде:

$$IN = H_g l_g n_{in}.$$

Описанная математическая модель позволяет производить расчет основных параметров индукторов требуемых для оптимизации рабочего процесса дифференциального электромагнитного блока.

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ

Приемлемым временем срабатывания электромагнитов считается 0,05–0,15 с для повышения скорости отработки сигнала управления возможно применение различных схем электрических контуров питания индукторов. Рассмотрим несколько вариантов уменьшения времени отработки сигнала индуктором схемным методом (рис. 7).

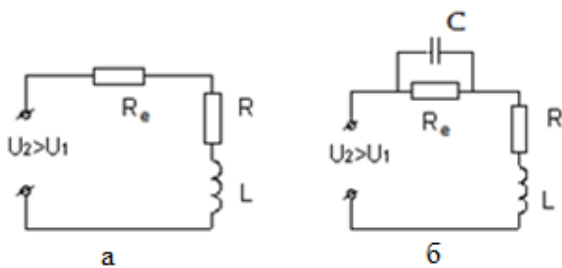


Рис. 7. Электрические схемы уменьшения времени отработки сигнала индуктором

В первом случае время отработки сигнала уменьшается при включении в цепь катушки добавочного сопротивления (рис. 7, а) и соразмерном увеличении напряжения питания электромагнита так, чтобы установившееся значение тока в обмотке электромагнита при этом осталось неизменным.

То есть справедливо следующее для значения, установившегося в обмотке тока:

$$I = \frac{U_1}{R} = \frac{U_2}{R + R_e},$$

где R_e – добавочное сопротивление.

Уменьшение времени отработки сигнала (изменения параметров потока магнитореологической жидкости в управляющих электромагнитных полях) опишем как:

$$T_1 = \frac{L}{R} > T_2 = \frac{L}{R + R_e},$$

$$t_{m2} < t_{m1},$$

$$t_m = T \cdot \ln \frac{I}{I - i_m},$$

где i_m – ток отработки сигнала, T – постоянная времени, t_m – время отработки сигнала, L – индуктивность обмотки:

$$L = \frac{\mu_0 \mu N S_{in}}{l_c},$$

где μ – относительная магнитная проницаемость сердечника, μ_0 – магнитная постоянная.

Данная схема позволяет достигать пропорционального увеличения мощности, но при этом происходит потеря мощности в добавочном сопротивлении.

Второй вариант это совмещение последовательного включения с обмоткой электромагнита добавочного резистора, шунтированного конденсатором, и поднятия напряжения питания в цепи (рис. 7, б). Повышение скорости отработки сигнала растет, путем повышения скорости роста тока в обмотке электромагнита за счет тока зарядки конденсатора, так как незаряженная емкость создает дополнительный путь для тока.

Переходный процесс до начала отработки сигнала электромагнита [6–8]:

$$U = iR + i_1 R_e + L \frac{di}{dt};$$

$$i_1 R_e = \frac{1}{C} \int i_2 dt;$$

$$i = i_1 + i_2.$$

Оптимальная емкость конденсатора:

$$C_{op} = \frac{L \cdot 10^6}{R R_e}.$$

При проектировании подобных электрических схем необходимо учитывать значительную емкость конденсатора.

Использование одной из схем в электрической цепи каждого дифференциального индуктора позволяет снизить время отработки сигнала управления и увеличить быстродействие магнитореологической системы.

Уменьшить время отработки сигнала электромагнитом возможно также конструктивно. Для этого требуется снижение вихревых токов, демпфирующих изменения магнитного потока. С целью понижения

вихревых токов целесообразно выполнение магнитопровода из магнитных материалов с высоким удельным электрическим сопротивлением и шихтованной конструкции, например, из листов электротехнической стали.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В результате численного моделирования в программном комплексе MATLAB получена зависимость времени отработки сигнала управления магнитореологическим устройством от сопротивления электрической цепи индуктора (рис. 8).

Результаты компьютерного моделирования иллюстрируют высокую эффективность схемного метода повышения скорости отработки сигнала управления, подтверждая адекватность выбранных конструктивных решений и способа сокращения времени переходных процессов. В целом совокупность численных зависимостей позволяет моделировать рабочий процесс дифференциальных электромагнитных блоков управления и производить их оптимизацию.

НОВИЗНА

Разработанная методика создания реологических и гидродинамических эффектов в магнитореологической среде позволяет создавать устройства с оригинальными рабо-

чими характеристиками, отличающимися от ранее известных реализацией управления расходными характеристиками потока магнитореологической среды за счет вращающихся и винтовых электромагнитных полей.

Предложена методика осуществления высокоэффективной виброзащиты, отличающейся от ранее известных применением магнитореологической рабочей камеры, разделенной на субкамеры с индивидуальным электромагнитным управлением, которые позволяют генерировать неоднородные распределенные адаптивные диссипативно-жесткостные свойства и способны изменять реологические характеристики объема рабочей среды в субкамерах в соответствии с распространением в ней ударных волн, оптимизируя процесс абсорбции жидкостью вибрационной нагрузки.

Создана концепция реализации блоков электромагнитного управления магнитореологических систем нового поколения, отличающаяся от ранее известных наличием сборок дифференциальных индукторов, установленных каскадами так, чтобы генерируемые ими динамические электромагнитные поля обладали оригинальными структурами, способными создавать в рабочей среде требуемые реологические и гидродинамические эффекты.

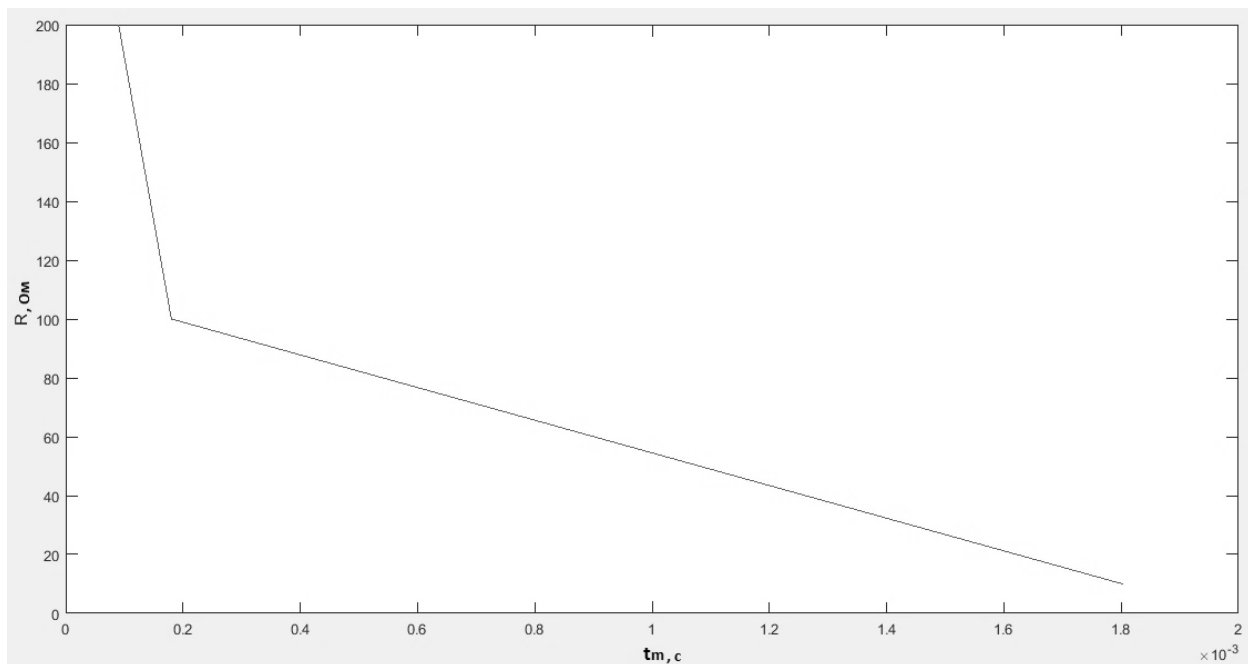


Рис. 8. Зависимость времени отработки сигнала управления магнитореологическим устройством от сопротивления электрической цепи индуктора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанные в работе конструктивные решения предоставляют возможность создавать оригинальные магнитореологические устройства с не имеющими аналогов рабочими процессами, улучшающими характеристики устройств и расширяющими интервалы рабочих параметров.

Представленные устройства применяют новые методы реализации рабочих процессов, позволяющие в значительной степени повысить эффективность управления расходными характеристиками потока магнитореологической среды и оптимизировать абсорбцию вибрационных нагрузок и ударных волн.

Приведенные методы расчета параметров дифференциальных электромагнитных блоков управления обладают достаточной точностью за счет простоты алгоритма его реализации, применимы в инженерной практике и не требуют больших вычислительных мощностей.

Схемные методы повышения скорости отклика на сигнал управления эффективны и предпочтительны для оптимизации характеристик дифференциальных электромагнитных блоков и сокращения времени переходных процессов в них.

Работа поддержана ООО «Научно-производственным предприятием Авионика и Мехатроника».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Найгерт К. В., Редников С. Н. Магнитореологический привод прямого электромагнитного управления характеристиками потока верхнего контура гидравлической системы золотника: Патент РФ № 2634163, опублик. 24.10.2017 Бюл. № 30. [К. В. Naigert, S. N. Rednikov, "The magnetorheological drive for directly electromagnetically controlling flow characteristics of an upper contour of a hydraulic slide-valve system", RU Patent № 2634163, 2017.]
2. Найгерт К. В., Редников С. Н. Магнитореологический привод прямого электромагнитного управления характеристиками потока верхнего контура гидравлической системы с гидравлическим мостиком: Патент РФ № 2634166, опублик. 24.10.2017 Бюл. № 30. [К. В. Naigert, S. N. Rednikov, "The magnetorheological drive for directly electromagnetically controlling flow characteristics of an upper contour of a hydraulic system which includes a hydraulic bridge", RU Patent № 2634166, 2017.]
3. Найгерт К. В., Тутынин В. Т. Адаптивный комбинированный реологический амортизатор: Патент РФ № 175044, опублик. 20.11.2017 Бюл. № 32. [К. В. Naigert, V. T. Tutyinin, "The adaptive combined rheological damper", RU Patent № 175044, 2017.]
4. Найгерт К. В. Моделирование и расчет рабочих процессов магнитореологического дросселя: Дисс. канд. техн. наук. Челябинск: ЮУрГУ, 2016. 147 с. [К. В. Naigert, "The modeling and the calculation of working Processes of the magneticorological throttle", Ph.D. Thesis, pp. 147, 2016.]
5. Балагуров В. А., Галтеев Ф. Ф., Гордон А. В. Проектирование электрических аппаратов авиационного электрооборудования. М.: Оборонгиз, 1960. 515 с. [V. A. Balagurov, F. F. Galteev, A. V. Gordon *Projecting of Electrical Apparatus of Aviation Electrical Equipment*, (in Russian), Moscow: Oborongiz, 1960.]
6. Сахаров П. В. Проектирование электрических аппаратов. М.: Энергия, 1975. 560 с. [P. V. Sakharov *Designing of electrical apparatuses*, (in Russian), Moscow: Energia, 1975.]
7. Гуревич А. Г. Ферриты на сверхвысоких частотах. М.: Физматгиз, 1960. 408 с. [A. G. Gurevich *Ferrites at ultrahigh frequencies*, (in Russian), Moscow: Fizmatgiz, 1960.]
8. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. М.: Наука, 1988. 512 с. [L. D. Landau, E. M. Lifshitz, *Field Theory*, (in Russian). Moscow: Nauka, 1988.]

ОБ АВТОРАХ

НАЙГЕРТ Катарина Валерьевна, канд. техн. наук, докторант кафедры «Автомобильный транспорт» ЮУрГУ.

ЦЕЛИЩЕВ Владимир Александрович, д-р техн. наук, проф., зав. каф. Прикладной гидромеханики УГАТУ.

METADATA

Title: About fast electromagnetic control units of new generation magnetorheological systems.

Authors: K. V. Naigert¹, V. A. Tselishev²

Affiliation:

¹ South Ural State University (national research university) (SUSU (NRU)), Russia.

² Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹kathy_naigert@mail.ru, ²pgl.ugatu@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 22, no. 4 (82), pp. 109-118, 2018. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: Most researches in magnetorheological systems are dedicated to improving the geometry of flowing part in magnetorheological devices or development of working environments with new physical/chemical properties but to development of electromagnetic control unit constructions are given undeservedly little attention. It's obvious that control electromagnetic fields are generated in control units; these electromagnetic fields determine the specificity of magnetorheological device working processes in many respects. Therefore innovative solutions for electromagnetic control unit constructions can increase the characteristics of magnetorheological systems to qualitatively new level and create the conception of new generation devices.

Key words: magnetorheological systems; electromagnetic control units; dissipative-rigidity properties; rheological effects; dynamic effects.

About authors:

NAIGERT, Katharina Valerevna, Ph.D., doctoral student, Department of Automobile Transport of South Ural State University.

TSELISCHEV, Vladimir Aleksandrovich, Doctor of Technics, Professor, Head of the Applied Hydromechanics Department of Ufa State Aviation Technical University.