

УДК 621.316

## **К РАСЧЕТУ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ТОРМОЗА С МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТЬЮ**

**А.Х. Григорян, А.Г. Аветисян, Т.Р. Мелконян**

*Национальный политехнический университет Армении*

Исследована электромагнитная система тормоза с магнито-реологической жидкостью. Магнитная цепь электромагнитной системы разбита на четыре характерных участка. Составлена схема замещения магнитной цепи. Сделаны допущения, в частности: магнитные частицы, подвешенные в масле, имеют форму куба; под воздействием магнитного поля кубические частицы складываются в столбики прямоугольной призмы, которые формируют элементарные мостики между сердечником и полым цилиндром (длина столбиков зависит от значения электромагнитной силы, действующей на магнитные частицы, которая, в свою очередь, зависит от квадрата тока в обмотке управления и, соответственно, квадрата магнитного потока). Предложена математическая модель, описывающая электромагнитную систему тормоза; получены формулы для определения магнитных индукций, магнитных напряженностей, разностей магнитных потенциалов, магнитодействующей силы (МДС) обмотки управления. Описаны алгоритмы решения прямой и обратной задач магнитной цепи с применением метода кусочно-линейной аппроксимации, многочленов Лагранжа.

На основе предложенной математической модели электромагнитной системы тормоза с реологической жидкостью и с помощью алгоритмов решения прямой и обратной задач магнитной цепи на языке программирования C# разработана программа расчета магнитной цепи. При заданных геометрических размерах конструкции и магнитных материалах, используемых в тормозе, определены значения величин, характеризующих электромагнитную систему тормоза. Получены графические зависимости этих величин, в частности, построены зависимости магнитного потока  $\Phi$  от МДС обмотки управления  $F$ , зависимости электромагнитной силы  $P_{\Sigma}$ , действующей на магнитные частицы, от размера немагнитного масляного зазора и зависимости скорости движения магнитных частиц (фронта элементарного мостика частиц) от МДС обмотки управления  $F$ .

**Ключевые слова:** тормоз, электромагнитная система, реологическая жидкость, магнитные частицы, схема замещения магнитной цепи, математическая модель, прямая и обратная задачи магнитной цепи.

**Введение.** Как известно, магнито-реологическая жидкость является взвесью магнитных частиц размерами  $0,1 \dots 100$  мкм в масле [1]. Благодаря свойству такой

жидкости – реагировать на внешнее магнитное поле, она применяется в ряде устройств: магнитореологических амортизаторах, опорах, муфтах, тормозах [1,2]. В данной работе рассматривается магнитная цепь электромагнитного тормоза.

**Математическая модель и алгоритмы решения задач магнитной цепи.**

Конструкция электромагнитного тормоза с магнитореологической жидкостью, выбранного в качестве объекта исследования, схематично показана на рис.1. Здесь 1 - ферромагнитный сердечник (ротор); 2 - обмотка управления; 3 - ферромагнитный полый цилиндр; 4 - реологическая жидкость; 5 и 6 – крышки из немагнитного материала; 7 - крутящийся вал. На рис. 1 также показаны геометрические размеры тормоза:  $l_c$  - длина цилиндра;  $l_k$  - длина обмотки управления;  $l_3$  - размер зазора с магнитореологической жидкостью;  $d_k$  - внутренний диаметр обмотки управления;  $d_c$  - диаметр сердечника,  $d_{вт}$  - внутренний диаметр цилиндра;  $d_{вш}$  - внешний диаметр цилиндра.

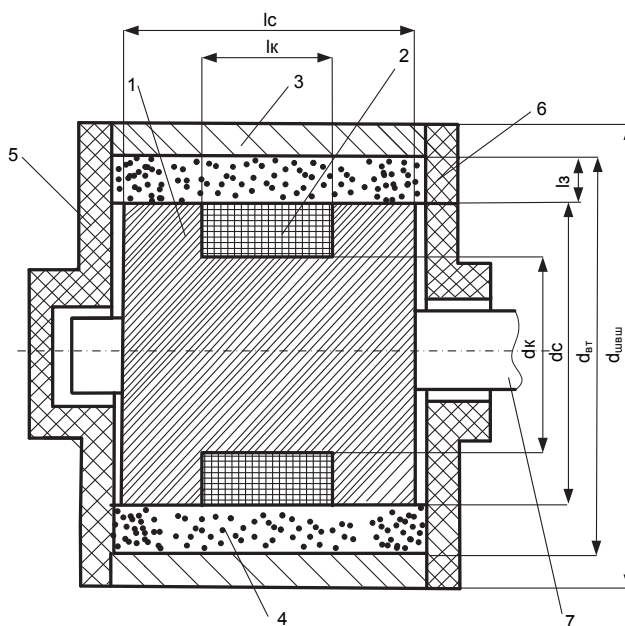


Рис.1. Конструкция тормоза с магнитореологической жидкостью

На рис. 2 электромагнитная схема тормоза показана в двух состояниях: когда в обмотке отсутствует ток управления (рис. 2 а) и когда в обмотке течет ток управления с определенным значением (рис. 2 б). В первом случае магнитные частицы хаотично подвешены в масле, а во втором - ориентированы по магнитному полю: между сердечником и цилиндром под воздействием электромагнитной силы, действующей на частицы, образованы элементарные

мостики. Благодаря последним тормозящий момент неподвижного цилиндра передается крутящемуся сердечнику.

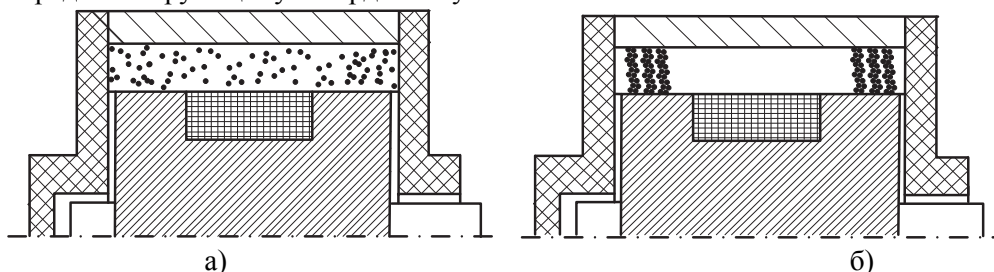


Рис. 2. Магнитные частицы в масляной среде при отсутствии тока управления (а) и определенном значении тока в обмотке управления (б)

При составлении схемы замещения магнитной цепи электромагнитной системы тормоза, как в [3], были приняты следующие допущения:

1. Магнитный поток  $\Phi$ , средняя линия которого показана на рис. 2 б, полностью охватывает обмотку управления и, соответственно, сцеплен со всеми витками обмотки.
2. Магнитные частицы имеют форму куба с размером ребра  $a$  (рис. 3 а). Грани квадратов покрыты слоем немагнитного материала толщиной  $b$  (рис. 3 б).
3. Под воздействием магнитного поля кубические частицы складываются в столбики в форме прямоугольной призмы (рис.3 в). Естественно, в масляном зазоре образуется множество таких призм, составляющих элементарные мостики.
4. Длина призм, образованных магнитными частицами, зависит от электромагнитной силы, действующей на частицы, значение которой, в свою очередь, зависит от квадрата тока обмотки управления и, соответственно, квадрата магнитного потока  $\Phi$  [4,5].

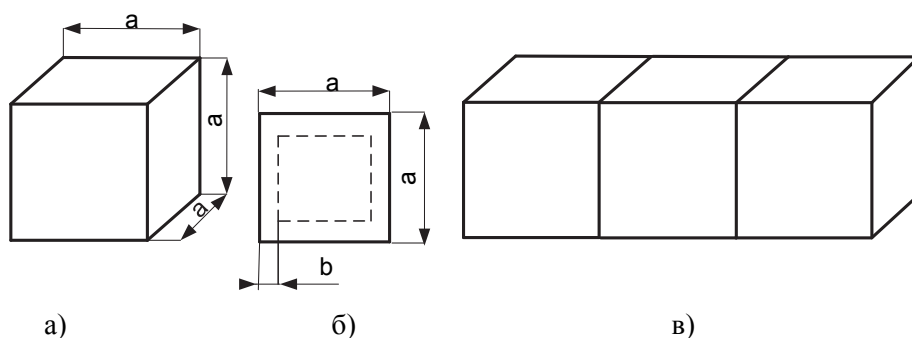


Рис. 3. Магнитная частица в виде куба (а), ребро частицы со слоем немагнитного покрытия (б) и столбик в виде прямоугольной призмы, составленный частицами (в)

С целью составления схемы замещения магнитной цепи электромагнитная система по пути прохождения магнитного потока  $\Phi$  разбита на 4 характерных участка 1-4 (рис. 4 а), представляющих ферромагнитный сердечник (участки 1 и 2), масляный зазор с магнитными частицами (участок 3) и ферромагнитный цилиндр (участок 4). Причем участок 3 разбит на две части: 3.1 – часть участка, занимаемая элементарными мостиками, и 3.2 – часть участка, занимаемая немагнитным маслом.

Схема замещения магнитной цепи показана на рис. 4 б. Здесь  $R_{m1}$ ,  $R_{m2}$ ,  $R_{m3}$  и  $R_{m4}$  – магнитные сопротивления соответствующих характерных участков магнитной цепи;  $F$  – магнитодействующая сила обмотки управления.

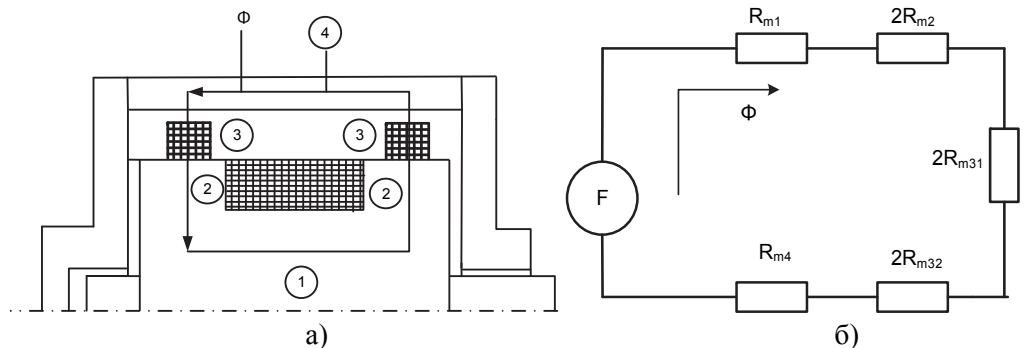


Рис. 4. Разбиение магнитной цепи на характерные участки 1-4 (а) и схема замещения магнитной цепи (б)

В табл.1 сведены выражения для длины средней магнитной линии на отдельных участках магнитной цепи, а также выражения для площади поперечного сечения, через которую протекает магнитный поток, на этих же участках (в формулах коэффициент  $K$  показывает, какую часть размера  $l_3$  масляного зазора занимает элементарный мостик магнитных частиц).

Таблица 1

Выражения для длин и площадей

Участок	Длина	Площадь поперечного сечения
1	$l_1 = 0,5 (l_c + l_k)$	$S_1 = 0,25\pi d_k^2$
2	$l_2 = 0,5 (d_c - d_k)$	$S_2 = 0,25\pi (d_c + d_k) (l_c - l_k)$
3.1	$l_{31} = K l_3$	$S_{31} = \pi (d_c + l_{31}) \frac{l_c - l_k}{2}$
3.2	$l_{32} = (1 - K) l_3$	$S_{32} = \pi (d_{вт} - l_{32}) \frac{l_c - l_k}{2}$
4	$l_4 = l_1$	$S_4 = 0,25\pi (d_{вш}^2 - d_{вт}^2)$

Более подробно рассмотрим участок цепи 3.1. Магнитный поток  $\Phi$  здесь разделяется на две составляющие  $\Phi_{31p}$  и  $\Phi_{31}$ , как это показано на рис.5 а. Первая составляющая проходит через немагнитные слои частиц длиной  $l_{31}$ , а вторая

составляющая проходит поочередно через немагнитные и магнитные участки столба, соответственно, с длинами  $l_{31n}$  и  $l_{31m}$ :

$$l_{31n} = 2bl_{31}/a, \quad (1)$$

$$l_{31m} = l_{31}(a - 2b)/a. \quad (2)$$

Для площадей поперечных сечений, через которые протекают магнитные потоки  $\Phi_{31p}$  и  $\Phi_{31}$  соответственно, можно записать

$$S_{31f} = S_{31} \left[ \frac{4b(a-b)}{a^2} \right], \quad (3)$$

$$S_{31q} = S_{31} \left[ \frac{(a-2b)^2}{a^2} \right]. \quad (4)$$

На рис. 5 б приведена та часть схемы замещения магнитной цепи, которая соответствует магнитному сопротивлению  $R_{m31}$  (рис. 4 б). Здесь  $R_{m31p}$  – магнитное сопротивление на пути потока  $\Phi_{31p}$ ;  $R_{m31m}$  – сопротивление магнитных участков на пути потока  $\Phi_{31}$ , а  $R_{m31n}$  – сопротивление немагнитных участков на пути потока  $\Phi_{31}$ .

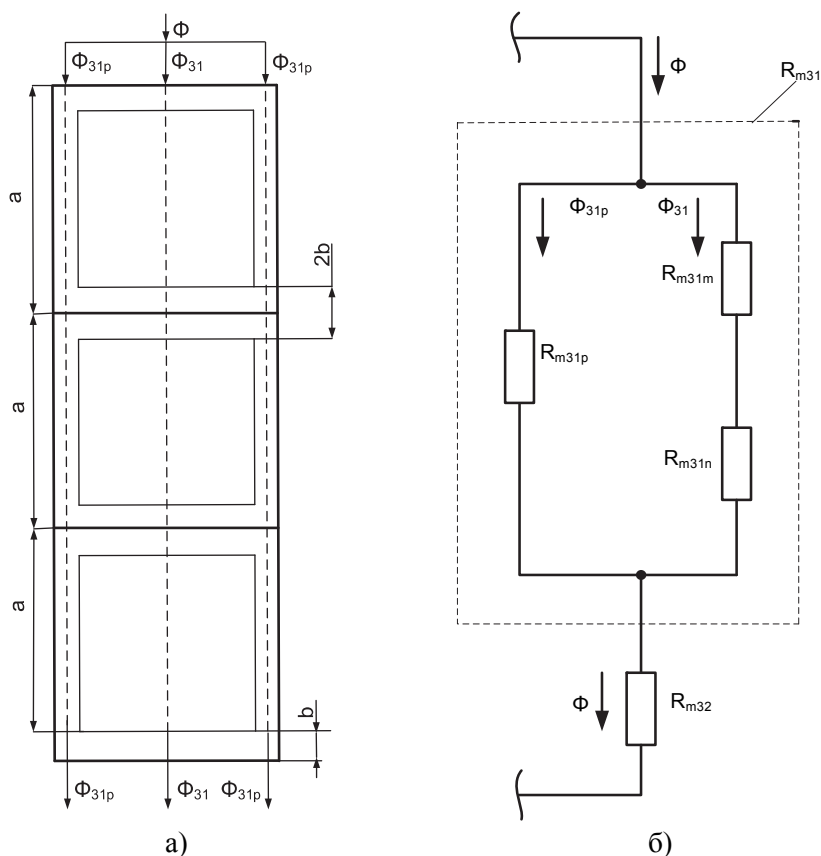


Рис. 5. Составляющие магнитного потока  $\Phi_{31}$  и  $\Phi_{31p}$  (а) и участок схемы замещения магнитной цепи, соответствующий магнитному сопротивлению  $R_{m31n}$  (б)

В табл.2 сведены выражения для определения магнитных индукций и разностей магнитных потенциалов отдельных участков магнитной цепи.

Отметим, что в таблице  $H_1, H_2, H_{31m}$  и  $H_4$  – магнитные напряженности соответствующих участков цепи, которые определяются при известных значениях магнитных индукций с применением кривой намагничивания магнитного материала  $H(B)$  [4,5]. При автоматизированном расчете функция  $H(B)$  задается координатами точек кривой намагничивания, а по известному значению индукции  $B$  напряженность  $H$  в нашем случае определяется применением метода кусочно-линейной аппроксимации [6].

Таблица 2  
Выражения для магнитных индукций и разностей магнитных потенциалов  
( $\mu_0$  – магнитная проницаемость в вакууме)

Участок	Магнитная индукция	Разность магнитных потенциалов
1	$B_1 = \Phi/S_1$	$U_{m1} = H_1 l_1$
2	$B_2 = \Phi/S_2$	$U_{m2} = H_2 l_2$
3	$B_{31m} = \Phi_{31}/S_{31q}$	$U_{m31m} = H_{31m} l_{31m}$
	$B_{31n} = \Phi_{31}/S_{31q}$	$U_{m31n} = \frac{\Phi_{31} l_{31n}}{\mu_0 S_{31q}}$
	$B_{31p} = \Phi_{31p}/S_{31f}$	$U_{m31p} = \frac{\Phi_{31p} l_{31p}}{\mu_0 S_{31f}}$
	$B_{32} = \Phi/S_{32}$	$U_{m32} = \frac{\Phi l_{32}}{\mu_0 S_{32}}$
4	$B_4 = \Phi/S_4$	$U_{m4} = H_4 l_4$

Как известно, прямая задача магнитной цепи сводится к определению МДС обмотки  $F$  при заданном значении магнитного потока  $\Phi$  [4,5]. Для МДС  $F$ , согласно схеме замещения магнитной цепи (рис. 4 б), можно записать

$$F = U_{m1} + U_{m2} + U_{m3} + U_{m4}, \quad (5)$$

где  $U_{m3}$  – разность магнитных потенциалов на участке 3:  $U_{m3} = U_{m2} + U_{m31p} = U_{m2} + U_{m31m} + U_{m31n}$ .

При решении прямой задачи магнитной цепи разности магнитных потенциалов  $U_{m1}, U_{m2}, U_{m32}, U_{m4}$  определяются по соответствующим выражениям табл. 2. Следует особое внимание обратить на определение потоков  $\Phi_{31}, \Phi_{31p}$  и разностей магнитных потенциалов  $U_{m31p}, U_{m31m}, U_{m31n}$ . Ввиду нелинейного характера магнитного сопротивления  $R_{m32m}$  процесс определения приведенных выше величин приводится к решению системы уравнений

$$\begin{cases} U_{m31m}(\Phi_{31}) = U_{m31p}(\Phi_{31p}), \\ \Phi_{31} + \Phi_{31p} = \Phi. \end{cases} \quad (6)$$

С целью численного решения данной системы функция  $U_{m31p} = f(\Phi_{31p})$  аппроксимируется линейной функцией с использованием значений  $\Phi_{31p}^0, \Phi_{31p}^1$  и соответствующих им значений функций  $U_{m31p}^0 = f(\Phi_{31p}^0)$  и  $U_{m31p}^1 = f(\Phi_{31p}^1)$ :

$$L_1(\Phi_{31p}) = \frac{U_{m31p}^0 - U_{m31p}^1}{\Phi_{31p}^0 - \Phi_{31p}^1} \Phi_{31p} + \frac{\Phi_{31p}^0 U_{m31p}^1 - \Phi_{31p}^1 U_{m31p}^0}{\Phi_{31p}^0 - \Phi_{31p}^1}.$$

Функция  $U_{m31mn} = f(\Phi_{31})$  аппроксимируется многочленом Лангража второй степени [6] с использованием значений  $\Phi_{31}^0, \Phi_{31}^1, \Phi_{31}^2$  и соответствующих значений функций  $U_{m31mn}^0 = f(\Phi_{31}^0), U_{m31mn}^1 = f(\Phi_{31}^1), U_{m31mn}^2 = f(\Phi_{31}^2)$ :

$$\begin{aligned} L_2(\Phi_{31p}) &= \frac{(\Phi_{31} - \Phi_{31}^1)(\Phi_{31} - \Phi_{31}^2)}{(\Phi_{31}^0 - \Phi_{31}^1)(\Phi_{31}^0 - \Phi_{31}^2)} U_{m31mn}^0 + \frac{(\Phi_{31} - \Phi_{31}^0)(\Phi_{31} - \Phi_{31}^2)}{(\Phi_{31}^1 - \Phi_{31}^0)(\Phi_{31}^1 - \Phi_{31}^2)} U_{m31mn}^1 + \\ &+ \frac{(\Phi_{31} - \Phi_{31}^0)(\Phi_{31} - \Phi_{31}^1)}{(\Phi_{31}^2 - \Phi_{31}^0)(\Phi_{31}^2 - \Phi_{31}^1)} U_{m31mn}^2 = [\hat{U}_{m31mn}^0 + \hat{U}_{m31mn}^1 + \hat{U}_{m31mn}^2](\Phi_{31})^2 - \\ &- [(\Phi_{31}^1 + \Phi_{31}^2)\hat{U}_{m31mn}^0 + (\Phi_{31}^0 + \Phi_{31}^2)\hat{U}_{m31mn}^1 + (\Phi_{31}^0 + \Phi_{31}^1)\hat{U}_{m31mn}^2]\Phi_{31} + \\ &+ \Phi_{31}^1 \Phi_{31}^2 \hat{U}_{m31mn}^0 + \Phi_{31}^0 \Phi_{31}^2 \hat{U}_{m31mn}^1 + \Phi_{31}^0 \Phi_{31}^1 \hat{U}_{m31mn}^2, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \hat{U}_{m31mn}^0 &= \frac{U_{m31mn}^0}{(\Phi_{31}^0 - \Phi_{31}^1)(\Phi_{31}^0 - \Phi_{31}^2)}, & \hat{U}_{m31mn}^1 &= \frac{U_{m31mn}^1}{(\Phi_{31}^1 - \Phi_{31}^0)(\Phi_{31}^1 - \Phi_{31}^2)}, \\ \hat{U}_{m31mn}^2 &= \frac{U_{m31mn}^2}{(\Phi_{31}^2 - \Phi_{31}^0)(\Phi_{31}^2 - \Phi_{31}^1)}. \end{aligned}$$

Для решения уравнения  $U_{m31p} = U_{m31mn}$  составляется уравнение  $L_1(\Phi_{31p}) = L_2(\Phi_{31p})$ , которое представляется в виде квадратного уравнения

$$\begin{aligned} &[\hat{U}_{m31mn}^0 + \hat{U}_{m31mn}^1 + \hat{U}_{m31mn}^2](\Phi_{31})^2 - \\ &- [(\Phi_{31}^1 + \Phi_{31}^2)\hat{U}_{m31mn}^0 + (\Phi_{31}^0 + \Phi_{31}^2)\hat{U}_{m31mn}^1 + (\Phi_{31}^0 + \Phi_{31}^1)\hat{U}_{m31mn}^2 + \\ &+ \frac{U_{m31p}^0 - U_{m31p}^1}{\Phi_{31p}^0 - \Phi_{31p}^1}] \Phi_{31} + \Phi_{31}^1 \Phi_{31}^2 \hat{U}_{m31mn}^0 + \Phi_{31}^0 \Phi_{31}^2 \hat{U}_{m31mn}^1 + \Phi_{31}^0 \Phi_{31}^1 \hat{U}_{m31mn}^2 - \\ &- \frac{\Phi_{31p}^0 U_{m31p}^1 - \Phi_{31p}^1 U_{m31p}^0}{\Phi_{31p}^0 - \Phi_{31p}^1} = 0. \end{aligned}$$

Корни этого уравнения определяются в виде

$$\Phi_{31} = \frac{[(\Phi_{31}^1 + \Phi_{31}^2)\hat{U}_{m31mn}^0 + (\Phi_{31}^0 + \Phi_{31}^2)\hat{U}_{m31mn}^1 + (\Phi_{31}^0 + \Phi_{31}^1)\hat{U}_{m31mn}^2 + \frac{U_{m31p}^0 - U_{m31p}^1}{\Phi_{31p}^0 - \Phi_{31p}^1}] \pm \sqrt{D}}{2[\hat{U}_{m31mn}^0 + \hat{U}_{m31mn}^1 + \hat{U}_{m31mn}^2]},$$

где

$$D^2 = \left[ (\Phi_{31}^1 + \Phi_{31}^2) \hat{U}_{m31mn}^0 + (\Phi_{31}^0 + \Phi_{31}^2) \hat{U}_{m31mn}^1 + (\Phi_{31}^0 + \Phi_{31}^1) \hat{U}_{m31mn}^2 + \frac{U_{31p}^0 - U_{31p}^1}{\Phi_{31p}^0 - \Phi_{31p}^1} \right]^2 -$$

$$- 4 \left[ \hat{U}_{m31mn}^0 + \hat{U}_{m31mn}^1 + \hat{U}_{m31mn}^2 \right] \times$$

$$\times \left[ \Phi_{31}^1 \Phi_{31}^2 \hat{U}_{m31mn}^0 + \Phi_{31}^0 \Phi_{31}^2 \hat{U}_{m31mn}^1 + \Phi_{31}^0 \Phi_{31}^1 \hat{U}_{m31mn}^2 - \frac{\Phi_{31p}^0 U_{31p}^1 - \Phi_{31p}^1 U_{31p}^0}{\Phi_{31p}^0 - \Phi_{31p}^1} \right].$$

Обратная задача магнитной цепи сводится к определению магнитного потока  $\Phi$  при заданном значении МДС обмотки  $F$  [4,5]. Как известно, при решении этой задачи задается множество значений потока  $\Phi$ , и для этих значений путем решения прямой задачи определяются соответствующие значения МДС  $F$ . Далее, имея зависимость  $\Phi(F)$ , по значению МДС  $F$  определяется искомое значение потока  $\Phi$ . С этой целью в данной работе применяется метод кусочно-линейной аппроксимации [6].

С целью расчета характерных величин электромагнитной системы тормоза с помощью вышеизложенных алгоритмов прямой и обратной задач составлена программа расчета на языке C#.

**Результаты расчетов.** На рис. 6-9 показаны зависимости, полученные расчетным путем при следующих значениях величин, характеризующих электромагнитную систему тормоза:  $l_c=28$  мм;  $l_k=12$  мм;  $d_{\text{вн}}=47$  мм;  $d_{\text{вт}}=40$  мм;  $d_c=38$  мм;  $d_k=24$  мм;  $a=0,01$  мм;  $b=0,0005$  мм;  $\Phi_{31p}=0,0002$  Вб. В качестве материала сердечника, цилиндра и частиц условно принята сталь 3.

Следует отметить, что для определения значения электромагнитной силы  $P_{\text{Э}}$ , действующей на магнитные частицы (на фронт элементарного мостика, как и в [3], магнитных частиц), использована известная формула Максвелла [4, 5]:

$$P_{\text{Э}} = \frac{\Phi_{31}^2}{2\mu_0 S'_{31q}}, \quad (7)$$

где

$$S'_{31q} = 0,5\pi(d_c + 2l_{31})(l_c - l_k) \left[ \frac{(a-2b)^2}{a^2} \right].$$

Для определения скорости движения магнитных частиц (фронта элементарного мостика магнитных частиц)  $v$  была применена формула противодействующей силы, действующей на движущееся в жидкости тело [3, 7]:

$$P_{\text{П}} = CA \frac{\rho v^2}{2}, \quad (8)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;  $A$  – площадь проекции фронтальной поверхности тела в направлении движения;  $C$  – коэффициент, значение которого зависит от формы тела.

Отметим, что при расчетах значение силы  $P_{\text{П}}$  в (8) приравнивалось к расчетному значению электромагнитной силы  $P_{\text{Э}}$ , а значения остальных членов (8) составляли:  $C=0,01$ ;  $\rho=900$  кг/м<sup>3</sup>. Значение площади  $A$  определялось по выражению

$$A = S'_{31} = \pi(d_c + 2l_{31}) \frac{l_c - l_k}{2}.$$



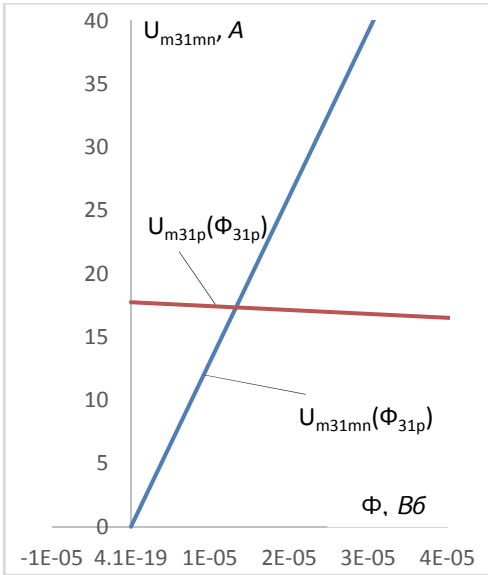


Рис. 6. Графическое представление численного решения системы уравнений (6)

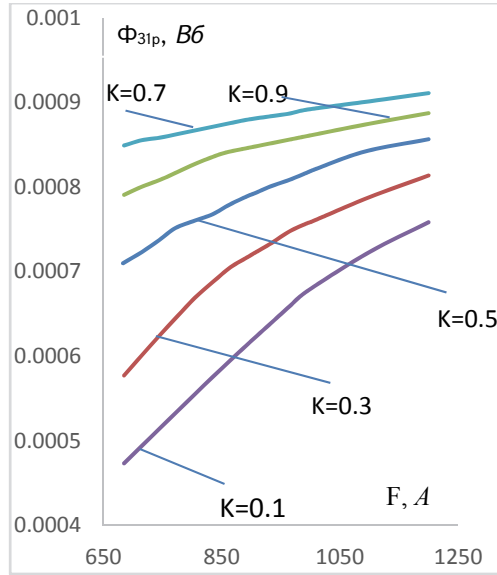


Рис. 7. Зависимости магнитного потока  $\Phi$  от МДС обмотки управления  $F$

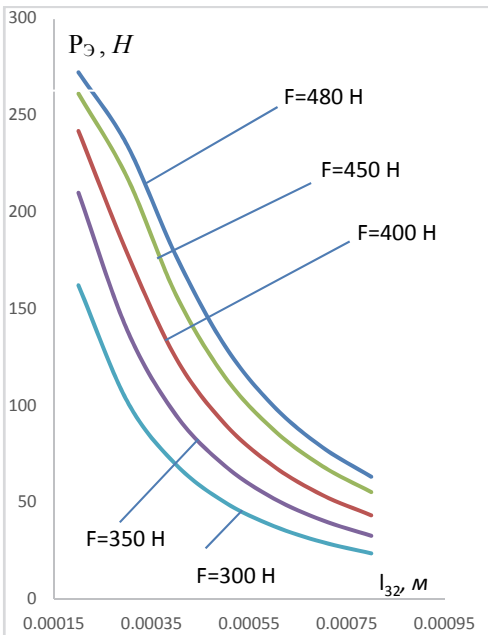


Рис. 8. Тяговые характеристики  $P_{\Delta}(I_{32})$  для разных значений МДС  $F$  обмотки управления

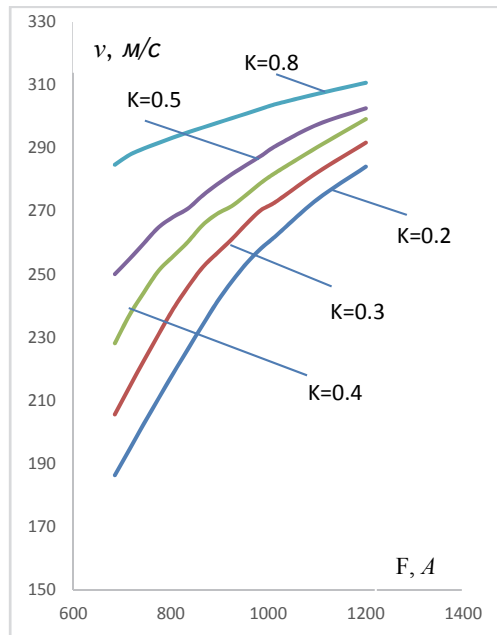


Рис. 9. Зависимости скорости движения частиц (фронта столбика частиц)  $v$  от МДС обмотки управления  $F$  для разных значений  $K$

**Выводы.** На основе предложенной в работе математической модели электромагнитной системы тормоза и с помощью алгоритмов решения прямой и обратной задач магнитной цепи на языке программирования C# составлена программа расчета магнитной цепи. При заданных геометрических размерах конструкции и магнитных материалах, использованных в тормозе, определены значения величин, характеризующих электромагнитную систему. Получены графические зависимости этих величин.

*Работа выполнена в базовых научно-исследовательских лабораториях НПУА “Электромагнитные системы” и “Автоматизированные системы и моделирование” при финансовой поддержке фонда Комитета по науке при Министерстве образования и науки РА.*

### Литература

1. Магнитореологическая жидкость.  
<http://mrfengineering.com.ua/magnitoreologicheskaya-zhidkost>
2. **Poznić A., Zelić A., Szabó L.** Magnetorheological fluid brake – basic performances testing with magnetic field efficiency improvement proposal // Hungarian Journal of Industry and Chemistry Veszprém. – 2012.- Vol. 40 (2). - P. 113-119.
3. **Գրիգորյան ԱՊԽՁ, Աղջոյան ԳՊԱՁ, Մելքոնյան ՏՊՌՁ, Չուխաջյան ՆՊՀՁ** Մագնիսակառավարվող կախոցի էլեկտրամագնիսական համակարգի մաթեմատիկական մոդելավորում և բնութագրերի որոշում // ՀՀ ԳԱԱ և ՀԱՊՀ տեղեկագիրք Տեխ. գիտ. սերիա. – 2017"- Հատոր LXXI, №4" - էջ 438-449:
4. Электрические и электронные аппараты /Под ред. **Ю.К. Розанова.** -2-е изд., испр. и доп.- М.: Информэлектро, 2001.- 420 с.
5. **Буль Б.К., Буль О.Б., Азанов В.А., Шоффа В.Н.** Электромеханические аппараты автоматики.- М.: Высшая школа, 1988.-304 с.
6. **Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М.** Численные методы. - М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. - 636 с.
7. **Прандтль Л.** Гидроаэромеханика. - Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2000. -576 с.

*Поступила в редакцию 04.03.2018.  
Принята к опубликованию 05.06.2018.*

**ՄԱԳՆԻՍԱՌԵՈՒՈՂԳԻԱԿԱՆ ՀԵՂՈՒԿՈՎ ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԱՐԳԵԼԱԿԻ  
ՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ՇՂԹԱՅԻ ՀԱՇՎԱՐԿԻ ՄԱՍԻՆ**

**Ա.Խ. Գրիգորյան, Ա.Գ. Ավետիսյան, Տ.Ռ. Մելքոնյան**

Հետազոտվել է մագնիսառեոլոգիական հեղուկով արգելակի էլեկտրամագնիսական համակարգը: Վերջինիս մագնիսական շղթան տրոհվել է չորս բնութագրական տեղամասերի, և կազմվել է մագնիսական շղթայի փոխարինման սխեման: Մասնավորապես, ընդունվել է, որ յուղում կախված վիճակում գտնվող մագնիսական մասնիկներն ունեն խորանարդի ձև, ինչպես նաև, որ մագնիսական դաշտի ազդեցությամբ խորանարդաձև մասնիկները կազմում են ուղղանկյուն պրիզմա-սյուններ, որոնք միջուկի և սնամեջ գլանի միջև՝ յուղային ճեղքում, ձևավորում են տարրական կամրջակներ (սյունների երկարությունը կախված է մագնիսական մասնիկների վրա գործող էլեկտրամագնիսական ուժի արժեքից, որն էլ իր հերթին կախված է կառավարման փաթույթի հոսանքի քառակուսուց և, համապատասխանաբար, մագնիսական հոսքի քառակուսուց): Առաջարկվել է արգելակի էլեկտրամագնիսական համակարգը նկարագրող մաթեմատիկական մոդել. ստացվել են մագնիսական ինդուկցիաների, մագնիսական լարվածությունների, մագնիսական պոտենցիալների տարբերությունների, կառավարման փաթույթի մագնիսաշարժ ուժի (ՄՇՈՒ) բանաձևերը: Նկարագրվել են մագնիսական շղթայի ուղիղ և հակադարձ խնդիրների լուծման ալգորիթմները՝ հատված-գծային և Լագրանժի բազմանդամների մեթոդների կիրառմամբ:

Ռեոլոգիական հեղուկով արգելակի էլեկտրամագնիսական համակարգի մաթեմատիկական մոդելի և մագնիսական շղթայի ուղիղ ու հակադարձ խնդիրների լուծման ալգորիթմի հիման վրա C# ծրագրավորման լեզվով կազմվել է մագնիսական շղթայի հաշվարկի ծրագիրը: Կառուցվածքի առաջադրված երկրաչափական չափերի ու արգելակում օգտագործված մագնիսական նյութերի համար որոշվել են արգելակի էլեկտրամագնիսական համակարգը բնութագրող մեծությունները, ստացվել են այդ մեծությունների գրաֆիկական կախվածությունները, մասնավորապես, կառուցվել են  $\Phi$  մագնիսական հոսքի կախվածությունը փաթույթի F ՄՇՈՒ-ից, քարշային բնութագրերը՝ մագնիսական մասնիկների վրա գործող  $P_3$  էլեկտրամագնիսական ուժի կախվածությունը ոչ մագնիսական յուղային բացակի չափից և մագնիսական մասնիկների (մասնիկների տարրական յուղային կամրջակի ճակատի) շարժման արագության կախվածությունը կառավարման փաթույթի F ՄՇՈՒ-ից:

**Առանցքային բաներ.** արգելակ, էլեկտրամագնիսական համակարգ, ռեոլոգիական հեղուկ, մագնիսական մասնիկներ, մագնիսական շղթայի փոխարինման սխեմա, մաթեմատիկական մոդել, մագնիսական շղթայի ուղիղ և հակադարձ խնդիրներ:

## CALCULATION OF THE MAGNETIC CIRCUIT OF THE ELECTROMAGNETIC BRAKE WITH MAGNETORHEOLOGICAL FLUID

A.Kh. Grigoryan, A.G. Avetisyan, T.R. Melkonyan

The electromagnetic brake system with rheological fluid is studied. The magnetic circuit of the electromagnetic system is divided into four characteristic sections. An equivalent circuit of the magnetic circuit is made up. Assumptions have been made, in particular: the magnetic particles suspended in oil have the form of a cube; under the influence of the magnetic field, cubic particles are added to the columns of a rectangular prism, which form elementary bridges between the core and the hollow cylinder (the length of the columns depends on the value of the electromagnetic force, acting on the magnetic particles, which, in turn, depends on the square of the current in the control winding and, respectively, on the square of the magnetic flux). A mathematical model, describing the electromagnetic brake system is proposed; formulae are obtained for the determination of magnetic inductions, magnetic strengths, differences of magnetic potentials, the magnetomotive force of the (MDS) control winding. Algorithms for solving the direct and inverse problems of the magnetic circuit are described, using the piecewise linear approximation method and the Lagrange polynomials.

Based on the proposed mathematical model of the electromagnetic brake system with rheological fluid and by the algorithm for solving the direct and inverse problems of the magnetic circuit in the programming language C #, a program for calculating the magnetic circuit has been developed. Given the geometric dimensions and magnetic materials of the brake design, the values of the quantities, characterizing the electric brake system are determined, the graphs of these quantities are determined, in particular, the dependences of the magnetic flux  $\Phi$  on the control winding MDS  $F$ , the traction characteristics of the electromagnetic force dependence  $PE$ , acting on the magnetic particles, on the size of the non-magnetic oil gap, and the dependence of the velocity of motion of the magnetic particles (the front of the column of particles) on the MDS of the control winding  $F$ .

**Keywords:** brake, electromagnetic system, rheological fluid, magnetic particles, equivalent circuit of the magnetic circuit, mathematical model, direct and inverse problems of the magnetic circuit.