

## ВЛИЯНИЕ ПРОВОДИМОСТИ МАТЕРИАЛА НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

*У статті розглянуто питання математичного моделювання динамічних процесів, що відбуваються у електромагнітному механізмі в залежності від електропровідності матеріалу, з якого його зроблено. Наведено динамічні характеристики спрацьовування електромагнітного механізму постійного струму. Дані якісні та кількісні оцінки отриманих результатів.*

*В статье рассматривается вопрос математического моделирования динамических процессов, происходящих в электромагнитном механизме в зависимости от электропроводности используемого материала. Приведены динамические характеристики срабатывания электромагнитного механизма постоянного тока. Даны количественные и качественные оценки полученных результатов.*

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в связи с появлением надежных и компактных электронных блоков управления, в электроаппаратостроении наметилась тенденция замены приводных электромагнитов переменного тока электромагнитами постоянного тока. Такая замена обусловлена возможностью создания более надежного и компактного (при использовании электронных систем форсировки или постоянных магнитов) электромагнитного привода. Наиболее эффективными и простыми по конструкции являются магниты цилиндрической формы с двумя воздушными зазорами, изготавливаемые из недорогих сортов стали. Однако в этом случае актуальной становится задача по определению времени срабатывания такого электромагнита. Отказ от шихтованного магнитопровода упрощает изготовление электромагнитов, но приводит к появлению значительных вихревых токов в корпусе, сердечнике и якоре, замедляющих процесс нарастания магнитного потока, что увеличивает время срабатывания электромагнита.

Ввиду того, что все меры по уменьшению вихревых токов в электромагните можно рассматривать как изменение эквивалентной электрической проводимости материала, то в настоящей статье рассмотрен расчет динамических характеристик срабатывания электромагнитного механизма в зависимости от величины проводимости материала магнитопровода. Решение данной задачи актуально, так как позволяет определить степень влияния эквивалентной проводимости материала магнитопровода на динамику электромагнита.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Провести расчет динамики включения электромагнитного механизма, катушка которого включается на постоянное напряжение в зависимости от значения эквивалентной проводимости материала сердечника на основании решения мультифизической задачи по решению уравнений:

- электромагнитного поля с учетом проводимости материала магнитопровода;
- электрической цепи;
- движения якоря электромагнита.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Вид электромагнита и его размеры показаны на рис. 1 (в осесимметричной постановке). Все размеры указаны в мм. Показанное положение магнита выбрано

в связи с большей наглядностью получаемых результатов (направление движения и значения электромагнитной силы имеют положительное направление). Данная задача решается на деформируемой сетке, причем, величина и скорость деформации сетки вокруг якоря определяется параметрами его движения.

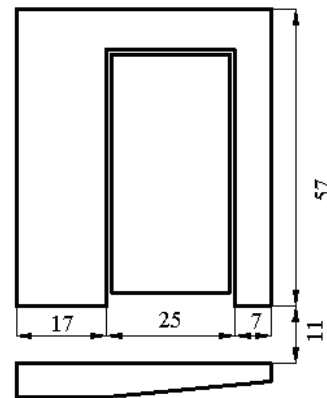


Рис. 1. Расчетная модель ИДМ

Уравнения электромагнитного поля для задачи с осевой симметрией без учета токов смещения можно записать через векторный магнитный потенциал:

$$\sigma \cdot \frac{\partial A_{\varphi}(t)}{\partial t} + \nabla \times (\mu^{-1} \cdot \nabla \times A_{\varphi}(t)) = J_{\varphi}(t). \quad (1)$$

В (1) используются общепринятые обозначения, не нуждающиеся в расшифровке.

Так как катушка намотана равномерно распределенным по сечению проводом, то пренебрегая неравномерностью тока в отдельном проводящем витке для электрической цепи можно записать уравнение:

$$R \cdot i(t) + \frac{w}{S} \cdot \iiint_V \frac{\partial A_{\varphi}(t)}{\partial t} \cdot dV = U(t), \quad (2)$$

где  $R$  – активное сопротивление катушки;  $w$  – число витков катушки;  $S$  – площадь поперечного сечения катушки;  $V$  – объем катушки;  $i(t)$  – ток катушки;  $U(t)$  – напряжение на катушке.

Полученная система уравнений (1) и (2) должна быть дополнена уравнением движения якоря:

$$\begin{cases} m \cdot \frac{dv(t)}{dt} = Q(t) - P(z(t)) \\ \frac{dz(t)}{dt} = v(t) \end{cases}. \quad (3)$$

Уравнение (3) представляет собой уравнение движения тела с постоянной массой, где  $m$  – масса якоря и движущихся с ним тел;  $v(t)$  – скорость;  $Q(t)$  – электромагнитная сила;  $P(z(t))$  – противодействующая сила;  $z(t)$  – координата положения якоря.

Электромагнитная сила определяется выражением на основании тензора Максвелла в цилиндрической системе координат:

$$Q(t) = \iint_{S_{pov}} (-0.5 \cdot (H_r \cdot B_r + H_z \cdot B_z) \cdot \vec{n}_z \cdot dS_{pov} + \iint_{S_{pov}} (\vec{n}_r \cdot H_r + \vec{n}_z \cdot H_z) \cdot B_z \cdot dS_{pov}, \quad (4)$$

где  $n$  – вектора внешней нормали к поверхности якоря  $S_{pov}$ .

#### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

В качестве основных исходных данных было принято: значение напряжения электрической цепи – 200 В; число витков катушки – 3000; начальная противодействующая сила – 10 Н; массы движущихся тел – 0,3 кг; активное сопротивление катушки – 200 Ом. Для ферромагнитного сердечника и якоря задавалось значение относительной магнитной проницаемости в функции модуля магнитной индукции (см. рис. 2). Расчеты динамики проводились для трех значений эквивалентной электрической проводимости материала электромагнита:  $\sigma = 0,2$  MS/m;  $\sigma = 2$  MS/m;  $\sigma = 20$  MS/m. Последнее значение соответствует проводимости конструкционных сталей, таких как Ст3, Ст10, Ст20.

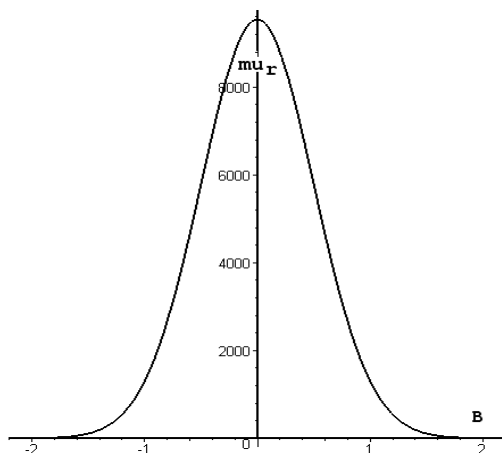


Рис. 2. Кривая относительной магнитной проницаемости

#### РЕШЕНИЕ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Решение задачи проводилось численными методами (метод конечных элементов) в нестационарном режиме на деформируемой сетке решателем с автоматическим (в зависимости от получаемого результата) выбором временного шага для интервала времени (0-0,1) с.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Решение поставленной задачи проводилось, как было сказано выше, для трех значений эквивалентной проводимости материала электромагнита. Для большей наглядности результаты решения представлены в виде графиков. На рис. 3 показаны графики тока катушки в зависимости от значения проводимости материала магнитопровода.

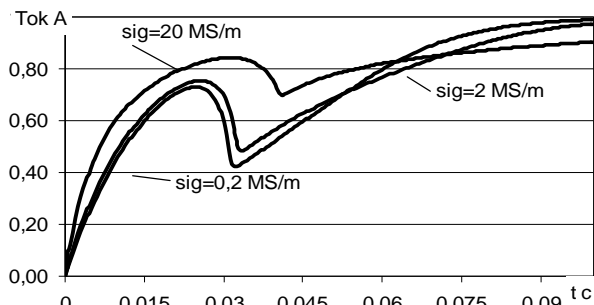


Рис. 3. Временная зависимость тока катушки от проводимости материала магнитопровода

На рис.4 показана зависимость хода якоря от времени и проводимости материала магнитопровода.

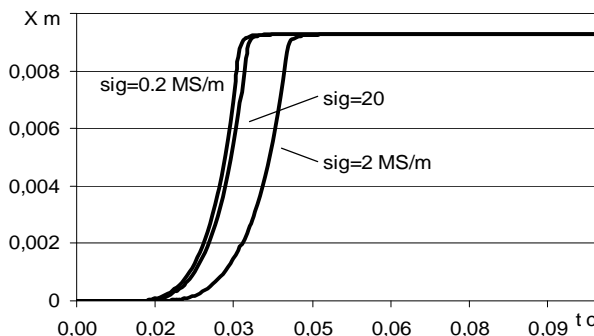


Рис. 4. Временная зависимость хода от проводимости материала магнитопровода

На рис. 5 показана зависимость противоЭДС, наводимой в катушке, при подключении электромагнита к источнику постоянного напряжения.

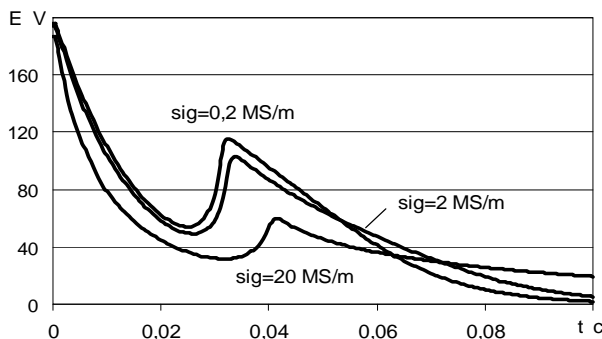


Рис. 5. Временная зависимость наводимой в катушке противо-ЭДС от проводимости материала магнитопровода

На рис. 6 показаны графики токов, наведенных в корпусе электромагнита в зависимости от значения проводимости материала магнитопровода и времени. На рис. 7 показаны графики нарастания потока в магнитопроводе.

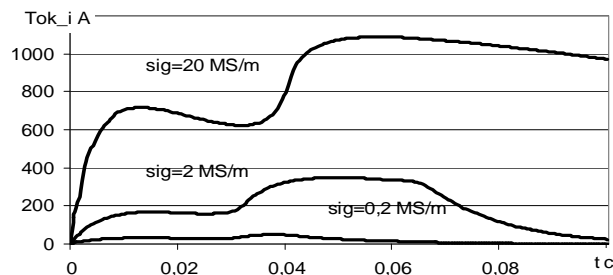


Рис. 6. Временная зависимость наводимых в корпусе токов от проводимости материала магнитопровода

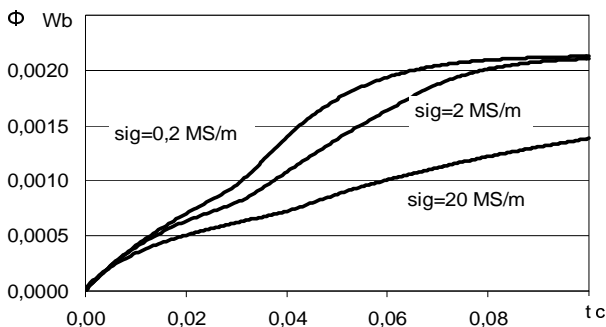


Рис. 7. Временная зависимость потоков в корпусе для разной проводимости материала магнитопровода

И, наконец, на рис. 8 показаны графики нарастания электромагнитной силы, действующей на якорь электромагнита.

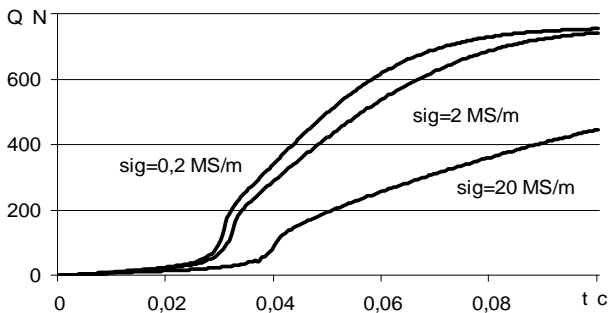


Рис. 8. Временная зависимость электромагнитной силы, действующей на якорь для различной проводимости материала магнитопровода

На рис. 9 и 10 показано распределение вихревых токов в электромагните через определенные моменты времени.

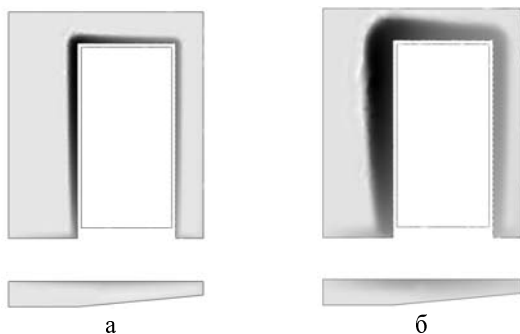


Рис. 9. Распределение вихревых токов в магнитопроводе через 5 мс (а) и 20 мс (б) после момента включения для проводимости 2 МСм

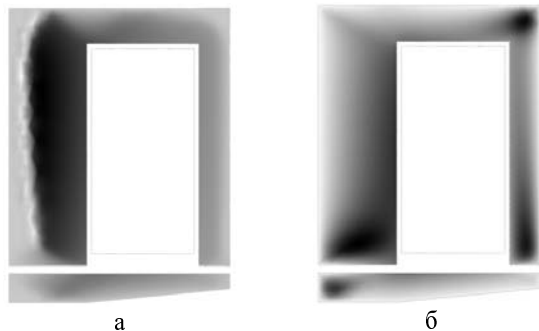


Рис. 10. Распределение вихревых токов в магнитопроводе через 50 мс (а) и 100 мс (б) после момента включения для проводимости 2 МСм

## ВЫВОДЫ

1. Математическая модель, базирующаяся на мультифизическом подходе (теория поля, уравнения электрической цепи, уравнения движения с учетом деформации расчетной сетки), учитывающая нелинейность и электропроводность материала магнитопровода, позволяет наиболее полно количественно и качественно описать процессы в электромагнитном и ему подобных механизмах.

2. Значения эквивалентной проводимости до величин порядка 2 MS/m практически не влияют на время срабатывания электромагнита. Увеличение проводимости на порядок (с 0,2 MS/m до 2 MS/m) увеличивает время срабатывания с 33 до 34 мс. Увеличение проводимости до 20 MS/m увеличивает время срабатывания до 42 мс, т.е. на 30 %.

3. Решение мультифизической задачи движения на деформируемой сетке дает возможность искусственно не вводить в расчетные уравнения члены, связанные с индуктивностью рассеяния катушки и скоростью движением якоря, так как при решении полевой задачи эти компоненты учитываются автоматически.

4. Вихревые токи в корпусе электромагнита в момент включения достигают килоампера и время их затухания достаточно велико.

5. Вихревые токи мало влияют на время трогания якоря, что связано с достаточно большой величиной воздушного зазора, определяющей индуктивность системы. Увеличение проводимости усиливает неравномерность распределения вихревых токов и магнитной индукции по сечению электромагнита.

6. Анализ рис. 3 и 7 показывает, что постоянная времени магнитной цепи в несколько раз больше постоянной времени электрической цепи и определяется эквивалентной проводимостью материала корпуса.

7. Проводимость магнитопровода в наибольшей степени влияет на характер нарастания потока и электромагнитной силы (рис. 7 и 8).

Поступила 14.09.2009

Байда Евгений Иванович, к.т.н., доц.  
Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21  
НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические аппараты"  
тел. (057) 707-69-76

*E.I. Bayda*

### **Influence of material conductance on dynamic characteristics of DC electromagnetic mechanisms**

The paper considers a problem of mathematical modeling of dynamical processes in an electromagnetic mechanism versus electrical conduction of the mechanism's material. Dynamic characteristics of a DC electromagnetic mechanism operation are presented. Quantitative and qualitative estimations of results obtained are given.

**Key words – dynamic characteristics, mathematical modeling, DC electromagnetic mechanism**