

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.

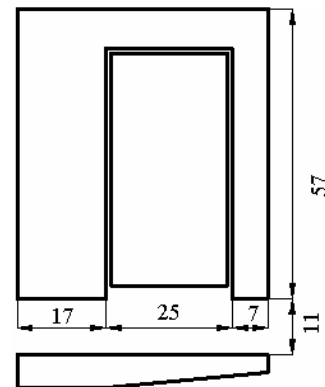


Рис. 1. Расчетная модель ИДМ

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.

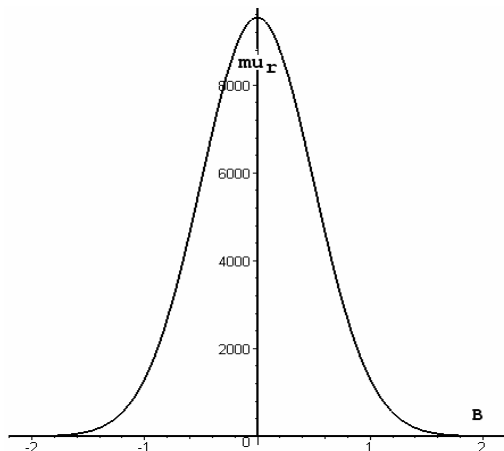


Рис. 2. Кривая относительной магнитной проницаемости

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.

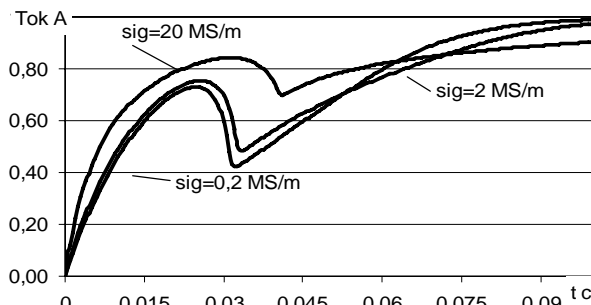


Рис. 3. Временная зависимость тока катушки от проводимости материала магнитопровода

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

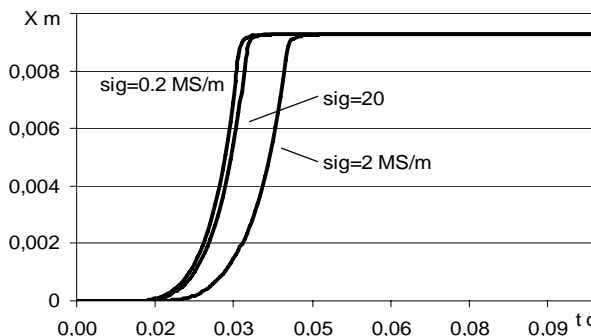


Рис. 4. Временная зависимость хода от проводимости материала магнитопровода

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

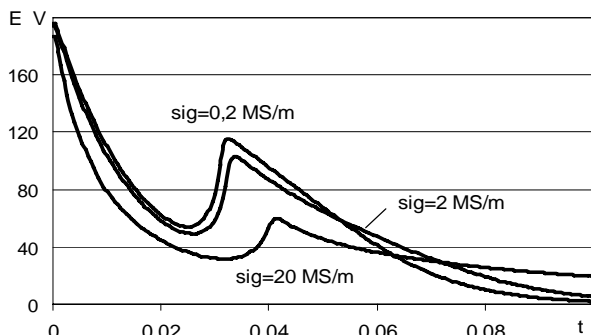


Рис. 5. Временная зависимость наводимой в катушке противо-ЭДС от проводимости материала магнитопровода

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.

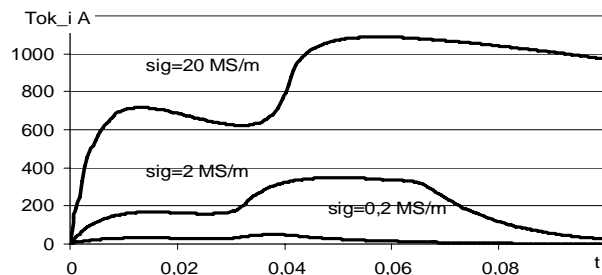


Рис. 6. Временная зависимость наводимых в корпусе токов от проводимости материала магнитопровода

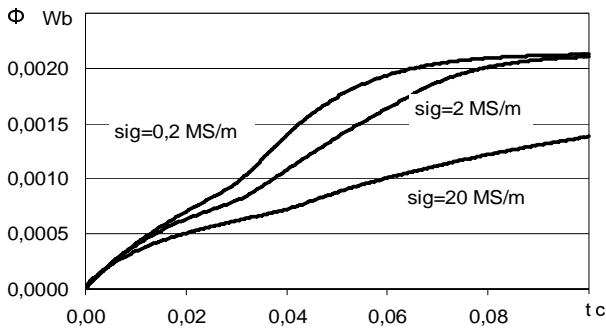


Рис. 7. Временная зависимость потоков в корпусе для разной проводимости материала магнитопровода

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

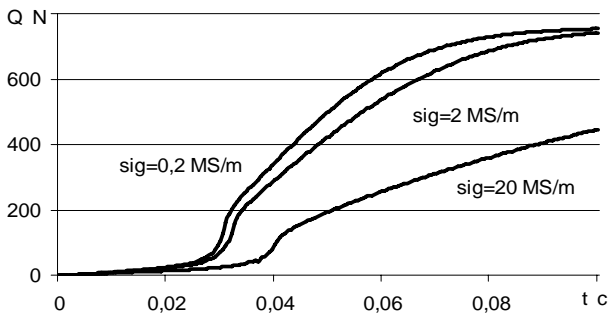


Рис. 8. Временная зависимость электромагнитной силы, действующей на якорь для различной проводимости материала магнитопровода

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

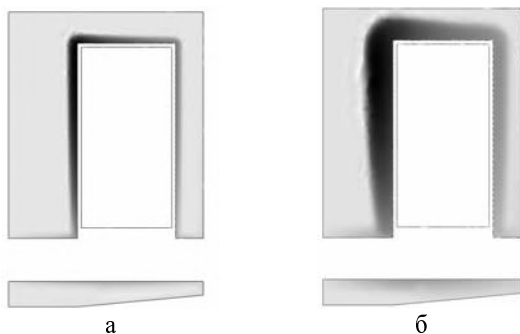


Рис. 9. Распределение вихревых токов в магнитопроводе через 5 мс (а) и 20 мс (б) после момента включения для проводимости 2 МСм

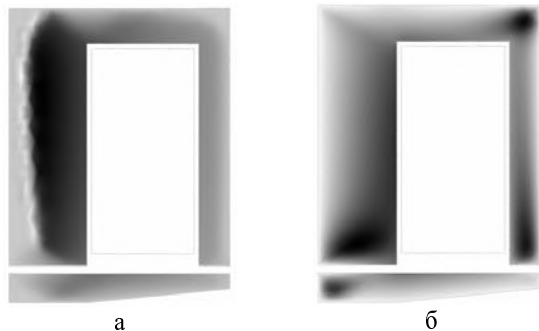


Рис. 10. Распределение вихревых токов в магнитопроводе через 50 мс (а) и 100 мс (б) после момента включения для проводимости 2 МСм

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