

## ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ МАГНИТОПРОВОДА ЭЛЕКТРОМАГНИТА ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ЕГО БЫСТРОДЕЙСТВИЕ

*У статті розглянуто питання розрахунку швидкодії електромагніта постійного струму в залежності від форми поперечного перетину осердя. Наведені якісні та кількісні характеристики.*

*В статті розглядається питання розрахунку швидкодії електромагніта постійного струму в залежності від форми поперечного сечення магнітопровода. Приведені якісні та кількісні характеристики.*

### ВВЕДЕНИЕ

Из литературы [1], известно, что за счет значительного влияния вихревых токов, массивные электромагниты постоянного тока имеют довольно значительные времена срабатывания. Одним из возможных методов уменьшения времени срабатывания таких электромагнитов является изготовление сердечника с вырезами специальной формы [1]. Проверить эффективность такого решения теоретически довольно затруднительно, так как для этого необходимо решить задачу о распределении электромагнитного поля в нелинейной среде в нестационарном режиме. Поэтому, в [1] влияние вихревых токов предлагается учитывать введением короткозамкнутых контуров с нескорым эквивалентным активным сопротивлением, охватывающим магнітопровод без потерь. Такой учет влияния вихревых токов неточен по следующей причине. Из теории электромагнитного поля известно, что сопротивление в установившемся синусоидальном режиме для магнітопровода радиуса  $a$  при явно выраженном поверхностном эффекте представляет собой комплексную величину [2]:

$$Z = r + j \cdot x = \frac{l}{\sigma \cdot 2 \cdot \pi \cdot a \cdot z_0} + j \cdot \frac{l}{\sigma \cdot 2 \cdot \pi \cdot a \cdot z_0}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – проводимость материала;  $a$  – радиус;  $z_0$  – глубина проникновения.

Эквивалентная глубина проникновения определяется по формуле:

$$z_0 = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}}, \quad (2)$$

где  $\omega$  – круговая частота;  $\mu$  – магнитная проницаемость.

Так как круговая частота отражает скорость изменения величины, то очевидно, что в переходных режимах работы электромагнита, а таковым является режим его срабатывания, "глубина проникновения" будет изменяться величиной. Переменной величиной будет и относительная магнитная проницаемость, что еще в большей степени влияет на величину  $z_0$ .

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью данной статьи является проведение сравнительного анализа скорости нарастания магнитного потока в тороидальном магнітопроводе с распределенной обмоткой, включаемой на постоянное напряжение при разных формах поперечного сечения магнітопровода.

На рис. 1 показаны расчетные сечения магнітопроводов с намагничивающей катушкой.

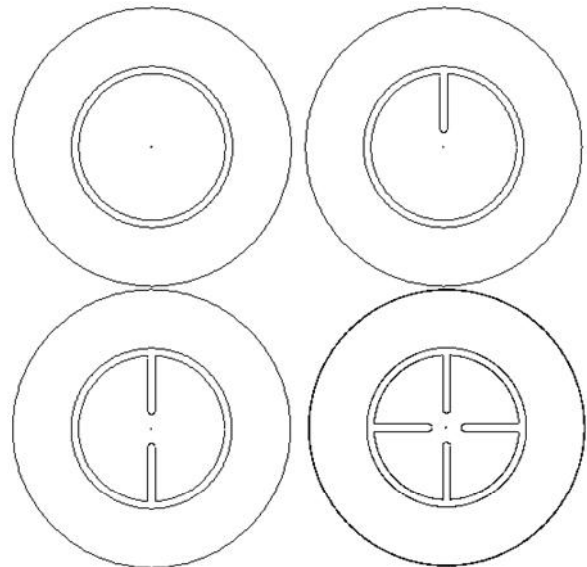


Рис. 1. Расчетные формы магнітопровода

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Математическую постановку задачи в общем виде можно сформулировать следующим образом: "Рассчитать переходный процесс изменения параметров в ферромагнитном магнітопроводе при подключении намагничивающей катушки на постоянное напряжение". Причем, задача будет решаться в осесимметричной системе координат, центр которой совпадает с центром тора, а центр сечения магнітопровода расположен на расстоянии  $R$  от начала координат.

В этом случае расчетное уравнение в общем виде для всех областей будет выглядеть:

$$\sigma \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \times \left( \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}, \quad (3)$$

где  $\vec{A}$  – векторный магнитный потенциал;  $\vec{J}$  – плотность тока сторонних источников.

Уравнение электрической цепи:

$$L_e \cdot \frac{di(t)}{dt} + R_e \cdot i(t) + E(t) = U, \quad (4)$$

где  $L_e$  – индуктивность внешней цепи;  $R_e$  – активное сопротивление катушки;  $i(t)$  – ток катушки;  $E(t)$  – противо – ЭДС;  $U$  – напряжение цепи.

В (4) выражение для  $E(t)$  может быть получено на основании закона Фарадея:

$$E(t) = -w \cdot \int_S \frac{\partial \vec{B}_\varphi}{\partial t} \cdot d\vec{S}, \quad (5)$$

где  $w$  – число витков катушки;  $B_\varphi$  – магнитная индукция;  $S$  – площадь поверхности, пронизываемая  $B_\varphi$ .

В (3) значение сторонней плотности тока в катушке будет определяться по формуле:

$$\vec{J} = \vec{e}_r \cdot \frac{i(t) \cdot w}{Sk} \cdot \sin(\alpha) - \vec{e}_z \cdot \frac{i(t) \cdot w}{Sk} \cdot \cos(\alpha), \quad (6)$$

где  $S_k$  – площадь протекания тока по катушке.

Значения тригонометрических функций в (6) определяются по формулам:

$$\sin(\alpha) = \frac{z}{\sqrt{(r-R)^2 + z^2}}, \cos(\alpha) = \frac{(r-R)}{\sqrt{(r-R)^2 + z^2}}, \quad (7)$$

где  $R$  – расстояние от начала координат до центра сечения магнитопровода;  $r, z$  – текущие координаты в пределах сечения катушки.

#### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

В качестве исходных данных принимались следующие значения: диаметр сердечника – 40 мм; ширина катушки – 16 мм; расстояние от начала координат до центра магнитопровода – 60 мм; число витков катушки – 470; сопротивление катушки – 7 Ом; индуктивность внешней цепи –  $1 \cdot 10^{-5}$  Гн; напряжение сети – 200 В; время окончания счета – 3 мс. Зависимость относительной магнитной проницаемости от значения магнитной индукции задавалось в следующей форме:

$$\mu_r = 3000 \cdot \exp(-1.13 \cdot B^2) + 1. \quad (8)$$

Графический вид зависимости приведен на рис. 2.

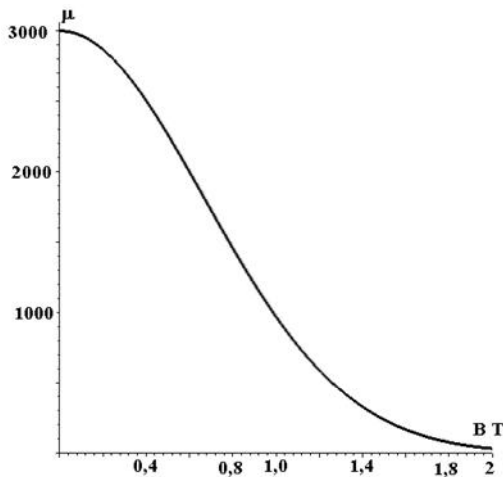


Рис. 2. Кривая магнитной проницаемости

#### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Решение задачи осуществлялось методом конечных элементов в специализированном программном комплексе.

Если принять, что критерием быстрогодействия электромагнитного механизма постоянного тока является скорость нарастания потока в сердечнике (квадрат потока пропорционален значению тяговой силы), то сравнительный анализ этой характеристики позволит определить влияние формы сечения на быстродействие. Результаты такого сравнительного расчета показаны на рис. 3, где значения потоков представлены в относительных единицах в зависимости от количества вырезов.

Как следует из рис. 3, увеличение числа вырезов увеличивает скорость нарастания магнитного потока.

Известно [2], что мгновенное значение электрического сопротивления, привносимого в цепь магнитопроводом можно определить по формуле:

$$Z_e(t) = \frac{E(t)}{i(t)}, \quad (9)$$

где  $Z_e(t)$  – мгновенное значение электрического сопротивления;  $i(t)$  – мгновенное значение потока.

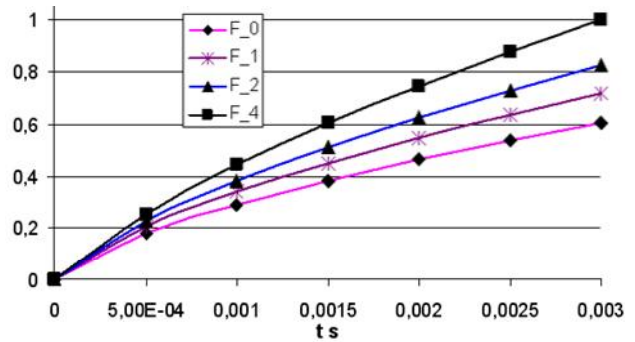


Рис. 3. Относительные значения потоков для сечений различной формы

На рис. 4 построены такие значения для магнитопроводов, показанных на рис. 1.

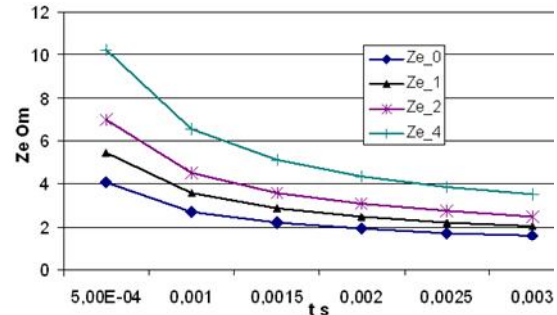


Рис. 4. Значения электрического сопротивления, привносимого в цепь магнитопроводом

На рис. 5 показано распределение магнитной индукции в сечении через 3 мс после включения катушки.

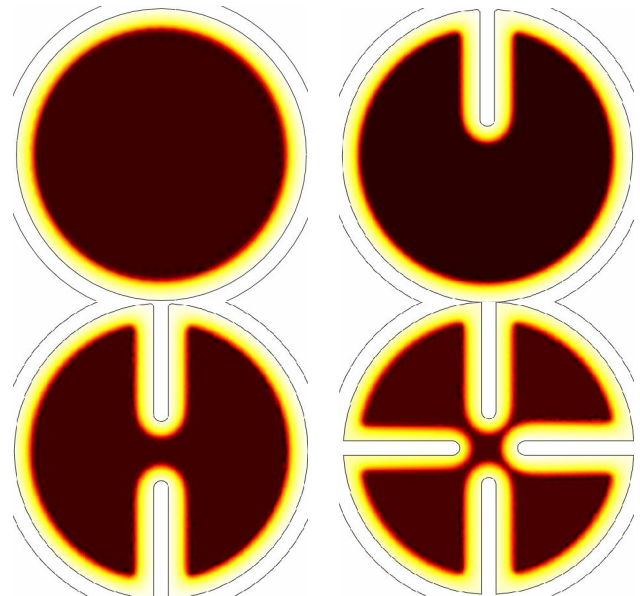


Рис. 5. Распределение индукции в магнитопровode

Необходимо отметить, что все расчеты были проведены для случая замкнутого магнитопровода. Для выяснения влияния формы сердечника на скорость нарастания магнитного потока в самом общем

случае, необходимо построить модель с учетом немагнитного зазора в магнитопроводе.

На основании закона Кирхгофа для магнитной цепи для магнитопровода с воздушным зазором можно предположить, что эквивалентное магнитное сопротивление в этом случае будет суммой магнитного сопротивления магнитопровода и воздушного зазора:

$$R_e = R_m + R_\delta = \frac{L}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S} + \frac{\delta}{\mu_0 \cdot S}, \quad (10)$$

где  $L$  – средняя длина магнитной силовой линии;  $S$  – сечение магнитопровода;  $\delta$  – величина воздушного зазора.

В этом случае можно говорить об эквивалентной относительной магнитной проницаемости равной:

$$\mu_{re} = \mu_r / \left( 1 + \frac{\delta}{L} \cdot \mu_r \right). \quad (11)$$

Так, к примеру, при величине воздушного зазора в 3 мм, величина максимальной магнитной проницаемости снижается с 3000 до 120 единиц. На рис. 6 приведен график эквивалентной относительной магнитной проницаемости в зависимости от величины воздушного зазора.

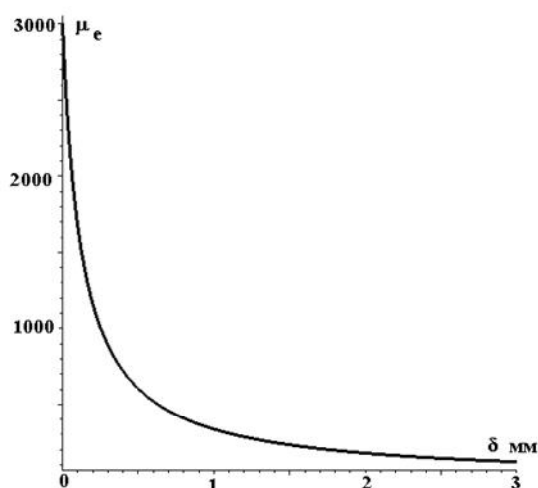


Рис. 6. Зависимость эквивалентной магнитной проницаемости от величины воздушного зазора

На рис. 7 приведены значения потока в относительных единицах с учетом эквивалентной магнитной проницаемости для двух форм магнитопровода.

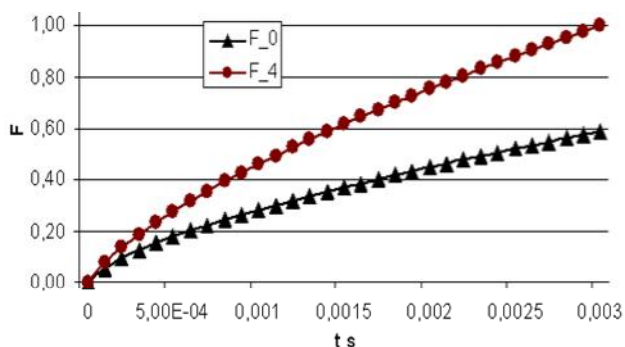


Рис. 7. Нарастание магнитных потоков для сплошного сечения и сечения с четырьмя разрезами

На рис. 8 приведены картины распределения магнитной индукции через 1 мс и 3 мс по сечению магнитопровода.

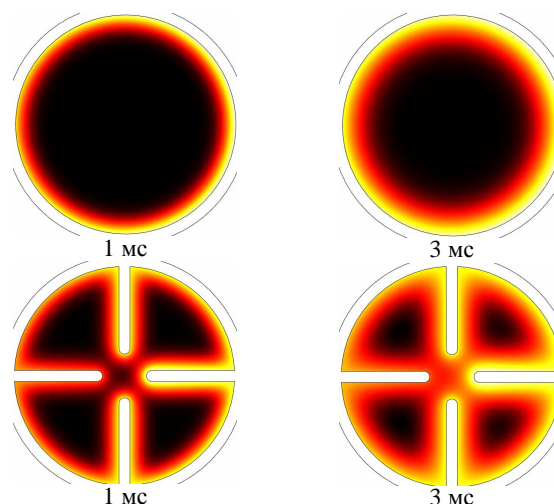


Рис. 8. Распределение магнитной индукции по сечению магнитопровода в моменты времени 1 мс и 3 мс

## ВЫВОДЫ

1. Скорость нарастания магнитного потока существенно зависит от формы поперечного сечения магнитопровода.
2. Электрическое сопротивление, привносимое в электрическую цепь магнитной системой, не является постоянной величиной и замена влияния вихревых токов эквивалентным активным сопротивлением возможно только для приближенных расчетов.
3. Наличие воздушного зазора не влияет на соотношение потоков.
4. В сердечнике с вырезами поперечное сечение магнитопровода используется более эффективно в переходных режимах, что способствует уменьшению времени срабатывания электромагнита.
5. Увеличение потока в сердечнике с вырезами происходит не за счет уменьшения вихревых токов (они возрастают), а за счет увеличения эффективного мгновенного сечения магнитопровода равного периметру, умноженному на мгновенное значение глубины проникновения магнитного потока.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клименко Б.В. Форсированные электромагнитные системы. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 160 с.
2. Нейман Л.Р., Калантаров П.Л. Теоретические основы электротехники. – Л-д.; Госэнергоиздат, 1948. – 343 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Klimenko B.V. Forsirovannyye `elektromagnitnyye sistemy. - M.; `Energoatomizdat, 1989. - 160 s. 2. Nejman L.R., Kalantarov P.L. Teoreticheskie osnovy `elektrotehniki. - L-d.; Gos`energoizdat, 1948. - 343 s.

Поступила 05.01.2011

Байда Евгений Иванович, к.т.н., доц.  
Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт"  
кафедра "Электрические аппараты"  
61002, Харьков, ул. Фрунзе 21  
тел. (057) 707-69-76, e-mail: baida@kpi.kharkov.ua

**Bayda E.I.**  
**Effect of a dc electromagnet magnetic conductor sectional shape on its speed.**

The paper considers a DC electromagnet speed computation problem as function of the magnetic conductor sectional shape. Qualitative and quantitative characteristics are given.

**Key words – DC electromagnet dynamics, electromagnet speed, magnetic conductor sectional shape.**