

***Ковганюк Виктор Федорович***

студент

***Самкова Татьяна Олеговна***

студентка

***Орлов Алексей Вениаминович***

канд. техн. наук, доцент

Филиал ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный  
авиационный технический университет» в г. Стерлитамаке  
г. Стерлитамак, Республика Башкортостан

## **ОДИН ИЗ МЕТОДОВ УВЕЛИЧЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА ПОСТОЯННОГО ТОКА**

*Аннотация:* в данной статье рассматривается расчет быстродействия электромагнита постоянного тока в зависимости от формы поперечного сечения магнитопровода.

*Ключевые слова:* электромагнит постоянного тока, магнитопровод, поперечное сечение.

*Введение.*

Из-за влияния вихревых токов массивные электромагниты постоянного тока срабатывают довольно медленно. В данной статье рассматривается влияние вырезов специальной формы в сердечнике как способ уменьшения времени срабатывания таких электромагнитов. Теоретическая проверка данного способа очень сложна, так как это требует решения задачи о распределении электромагнитного поля в нелинейной среде в нестационарном режиме. Для того чтобы проверить на сколько эффективен этот метод гораздо удобнее воспользоваться введением короткозамкнутых контуров с нескорым эквивалентным активным сопротивлением, охватывающим магнитопровод без потерь. Данный метод учета влияния вихревых токов может дать менее точный результат. Причина неточности заключается в том, что сопротивление в установившемся синусоидальном режиме для

магнитопровода 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 рассчитывается 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.

Ввиду того, что круговая частота влияет на скорость изменения эквивалентной глубины проникновения, то в переходных режимах работы электромагнита (режимах срабатывания) глубина проникновения будет переменной. Относительная магнитная проницаемость также будет изменяющейся величиной, а это влияет на величину  $z_0$  еще в большей степени.

Цели: провести сравнительный анализ скорости нарастания магнитных потоков в тороидальных магнитопроводах с распределенными обмотками, подключенными к постоянному напряжению с разными формами поперечного сечения магнитопровода.

Расчетные сечения магнитопроводов с намагничивающими катушками изображены на рис. 1.

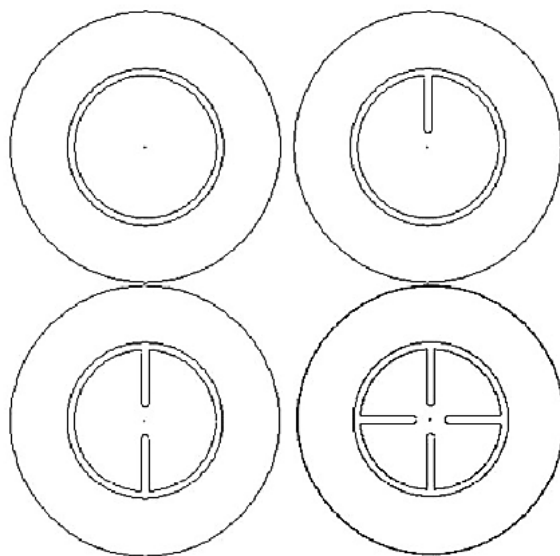


Рис. 1. Формы магнитопроводов для расчета

Задачи: провести расчет переходного процесса изменения параметров в ферромагнитном магнитопроводе при подключении намагничивающей катушки на постоянное напряжение. Задачу необходимо решить в осесимметричной системе координат, центр которой должен совпадать с центром тора, а центр сечения магнитопровода должен быть расположен на расстоянии  $R$  от начала координат.

В таком случае расчетное уравнение для всех областей:

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

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

Уравнение для электрической цепи:

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

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

Применяя закон Фарадея, на основании выражения (4) получим выражение для  $E(t)$ :

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

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

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

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

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.

*Проведение расчетов.*

Исходные данные: ширина катушки – 16 мм; расстояние от начала координат до центра магнитопровода – 60 мм; сопротивление катушки – 7 Ом; диаметр сердечника – 40 мм; число витков катушки – 470; напряжение сети – 200 В; индуктивность внешней цепи –  $1 \cdot 10^{-5}$  Гн; время окончания счета – 3 мс. Зависимость относительной магнитной проницаемости от значения магнитной индукции будет определяться как:

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

На рис. 2 изображен график этой зависимости.

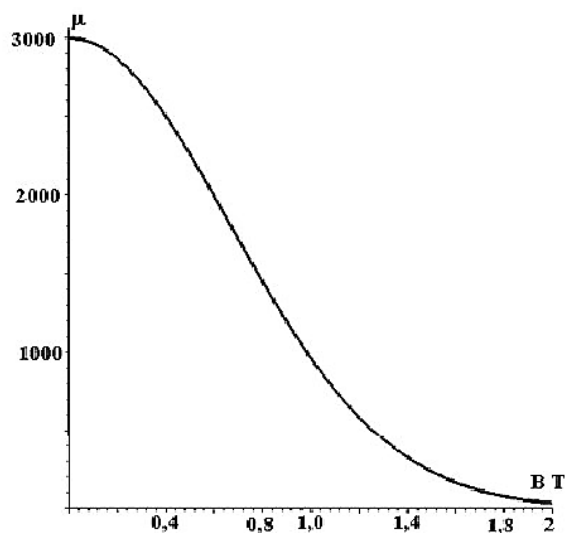


Рис. 2. Кривая магнитной проницаемости

*Результаты расчета.*

Для решения задачи использовался метод конечных элементов, который удалось применить благодаря специализированному программному комплексу.

Так как скорость нарастания потока в сердечнике определяет скорость срабатывания электромагнитного механизма постоянного тока (из-за пропорциональности квадрата потока тяговой силе), то по сравнительному анализу скоростей нарастания потока можно будет определить влияние вырезов различной формы в сердечнике на скорость срабатывания. По результатам сравнительного

расчета (рис. 3) видно, что увеличение числа вырезов повышает скорость нарастания магнитного потока (значения потоков представлены в относительных единицах в зависимости от количества вырезов.)

Мгновенное значение электрического сопротивления, привносимого в цепь магнитопроводом определяется формулой:

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

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

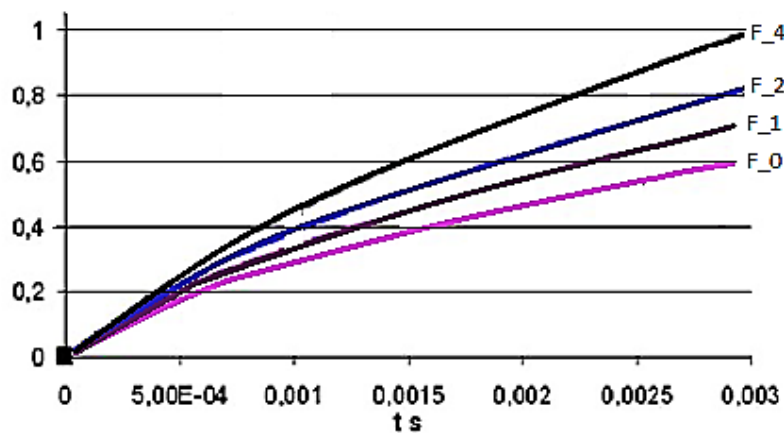


Рис. 3. Относительные значения потоков для сечений различной формы

На рис. 4 изображены значения для магнитопроводов, приведенных на рис. 1.

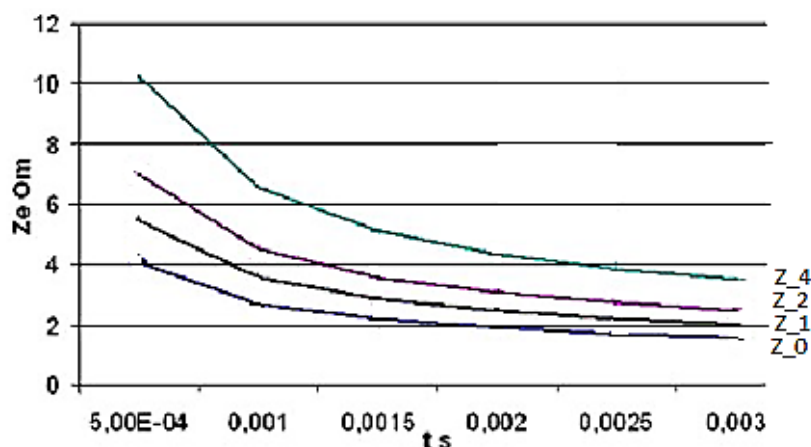


Рис. 4. Значения электрических сопротивлений, привносимых в цепь магнитопроводом

На рис. 5 представлено изображение распределения магнитной индукции в сечении магнитопровода через 3 мс после включения катушки.

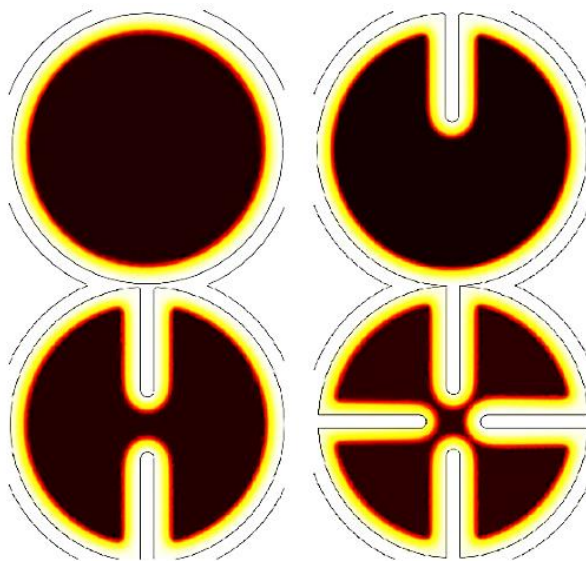


Рис. 5. Распределение индукции в сечении магнитопровода спустя 3 мс

Однако все расчеты были проведены только для замкнутого магнитопровода. Для того, чтобы выяснить влияние формы сердечника на скорость нарастания магнитного потока в общем случае необходимо построить модель, при этом учесть немагнитный зазор в магнитопроводе.

Если воспользоваться законом Кирхгофа для магнитной цепи, то для магнитопровода с воздушным зазором будет справедливо, что эквивалентное магнитное сопротивление будет являться 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 данном случае можно сказать об эквивалентной относительной магнитной проницаемости, которая равна:

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

Так, если величина воздушного зазора равна 3 мм, то значение максимальной магнитной проницаемости уменьшается с 3000 до 120 единиц. На рис. 6 изображен график эквивалентной относительной магнитной проницаемости в зависимости от величины воздушного зазора.

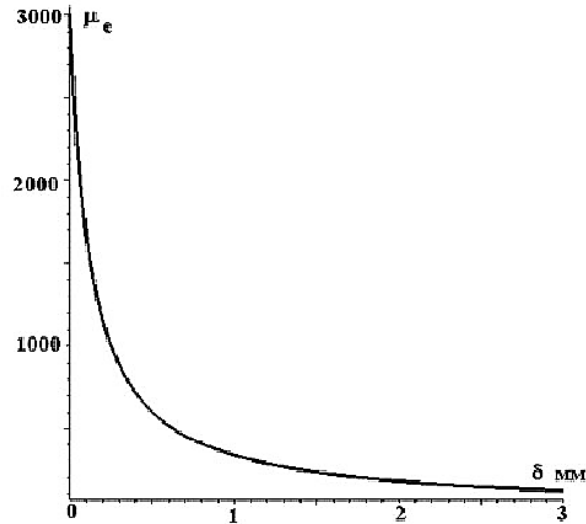


Рис. 6. Зависимость эквивалентной магнитной проницаемости от величины воздушного зазора

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

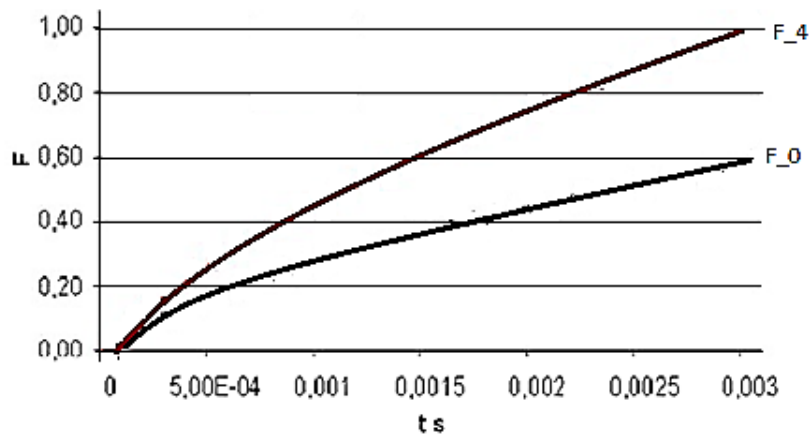


Рис. 7. Увеличение магнитных потоков для сечения с четырьмя разрезами и сплошного сечения

На рис. 8 представлены картины распределения магнитной индукции спустя 1 мс и 3 мс по поперечному сечению магнитопровода.

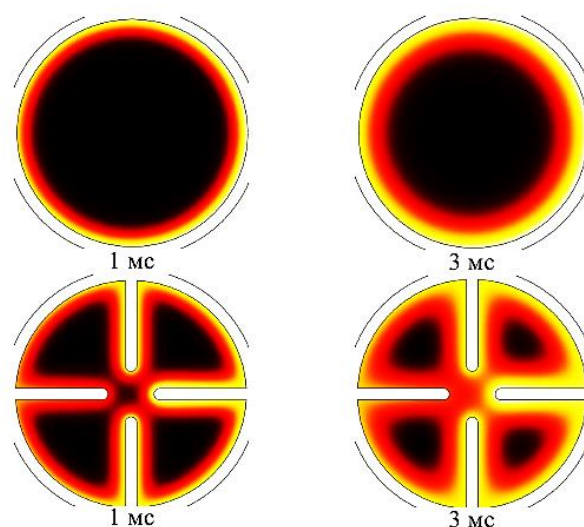


Рис. 8. Распределение магнитной индукции по сечению магнитопровода в моменты времени 1 мс и 3 мс

*Выводы:*

1. Форма поперечного сечения магнитопровода оказывает существенное влияние на скорость нарастания магнитного потока.
2. Необходимо отметить, что замена влияния вихревых токов эквивалентным активным сопротивлением возможна лишь для проведения приближенных расчетов. А электрическое сопротивление, привносимое в электрическую цепь магнитопроводом – есть величина непостоянная.
3. В сердечнике с вырезами поперечное сечение магнитопровода используется наиболее эффективно в переходных режимах, а это способствует уменьшению времени срабатывания электромагнита.
4. Наличие воздушного зазора не оказывает влияния на соотношение потоков.
5. За счет увеличения эффективного мгновенного сечения магнитопровода, которое равно периметру, помноженному на мгновенное значение глубины проникновения магнитного потока, происходит увеличение потока в сердечнике с вырезами.

*Список литературы*

1. Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники / Л.Р. Нейман, П.Л. Калантаров. – Л-д.: Госэнергоиздат, 1948. – 343 с.



2. Клименко Б.В. Форсированные электромагнитные системы. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 160 с.