

## УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПОЛЮСОВ МАГНИТОПРОВОДА В ЩЕЛЕВОМ ВИХРЕТОКОВОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ

В. К. ЖУКОВ, Р. М. ЗАКИРОВ

(Представлена научно-техническим семинаром кафедры информационно-измерительной техники)

В щелевом вихретоковом преобразователе наблюдаются значительные расхождения между теорией и экспериментом [1]. Одной из основных причин расхождения является искажение поля вихревых токов цилиндра, вызываемое близостью полюсов магнитопровода. С целью проверки этого утверждения был проделан следующий эксперимент. Цилиндр вместе с измерительными обмотками помещался в однородное поперечное поле, создаваемое кольцами Гельмгольца, имеющими радиус  $R = 50$  см. Две измерительные обмотки, расположенные по разные стороны от цилиндра имели по 50 витков. Геометрические размеры последних —  $24 \times 24$  мм. В качестве цилиндра использовался медный прутки диаметром 13,9 мм с электропроводностью  $47,5 \cdot 10^6$  см/м. При такой постановке эксперимента проводящий цилиндр оказывался в однородном поперечном магнитном поле, созданном без помощи магнитопровода.

Расхождения между значениями привнесенной э. д. с., определенными экспериментально и подсчитанными по аналитической зависимости [1]

$$\frac{\Delta \dot{E}}{|\dot{E}_0|} = i\eta \dot{F}(\kappa_c r_0),$$

не превышали  $5 \div 7\%$  во всем диапазоне частот намагничивающего тока.

Данные эксперимента подтверждают высказанное выше предположение о влиянии полюсов магнитопровода на чувствительность преобразователя.

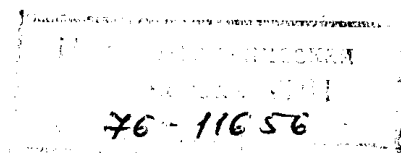
Попытаемся учесть влияние полюсов магнитопровода при выводе аналитической зависимости между параметрами цилиндра и щелевого преобразователя.

Вследствие близости полюсов магнитопровода топография магнитного поля, созданного вихревыми токами цилиндра, изменяется как в воздушном зазоре, так и в пространстве, занятом магнитопроводом, по сравнению с картиной поля без магнитопровода.

В [1] показано, что приращение векторного потенциала в воздушном пространстве, окружающем цилиндр, в прямоугольной системе координат имеет вид

$$\Delta \dot{A} = \dot{B}_0 y \frac{r_0^2}{x^2 + y^2} \dot{F}(\kappa_c r_0), \quad (1)$$

где  $r_0$  — радиус образца.



Определив составляющие приращения вектора индукции  $\Delta \dot{B}_x = \frac{\partial \dot{A}}{\partial y}$  и  $\Delta \dot{B}_y = -\frac{\partial \dot{A}}{\partial x}$ , найдем его модуль

$$\Delta \dot{B} = \dot{B}_0 \frac{r_0^2}{x^2 + y^2} \dot{F}(\kappa_c r_0). \quad (2)$$

С учетом высказанного выше предположения вектор искривляется вблизи ферромагнетика и нормально входит в полюса магнитопровода. Следовательно, он полностью участвует в создании магнитного потока, пронизывающего измерительные обмотки вблизи полюсов магнитопровода:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{\Phi} &= \int_S \Delta \dot{B} dS = \int_{-c}^c \int_{-l}^l \dot{B}_0 r_0^2 \dot{F}(\kappa_c r_0) \frac{dy dz}{x^2 + y^2} = \\ &= \dot{B}_0 r_0^2 \dot{F}(\kappa_c r_0) \cdot 2l \cdot \frac{2}{d} \operatorname{arctg} \frac{c}{d} = \dot{\Phi}_0 \dot{F}(\kappa_c r_0) \frac{r_0^2}{dc} \operatorname{arctg} \frac{c}{d}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\dot{\Phi}_0 = \dot{B}_0 \cdot 2l \cdot 2c$  — магнитный поток первичного поля,  
 $2l$  — размер обмотки вдоль оси  $z$ ,  
 $2c$  — размер обмотки вдоль оси  $y$ ,  
 $d$  — расстояние от оси образца до обмотки.

После несложных преобразований из (3) получим выражение для относительного приращения э. д. с. измерительной обмотки:

$$\frac{\Delta \dot{E}}{-|\dot{E}_0|} = i \eta_1 \dot{F}(\kappa_c r_0), \quad (4)$$

где  $\eta_1 = \frac{r_0^2}{dc} \operatorname{arctg} \frac{c}{d}$ .

Выражение (4) было просчитано при значениях величин  $d$ ,  $c$  и  $r_0$ , соответствующих размерам изготовленного для проведения эксперимента преобразователя.

На рис. 1 (кривая 2) показана зависимость отношения нормированных приведенных э. д. с., подсчитанных по выражению (4) и найден-

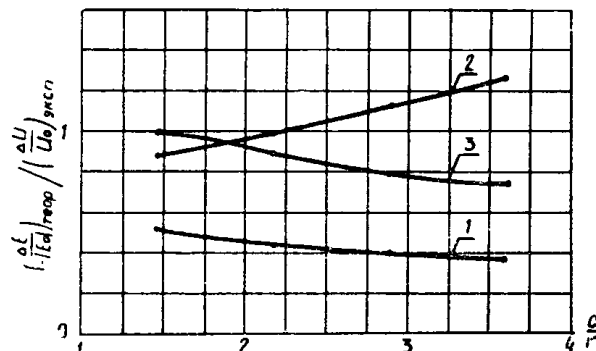


Рис. 1

ных экспериментально, от значения нормированной высоты измерительной обмотки. Приведенная зависимость показывает, что учет влияния полюсов при сделанных допущениях уменьшает расхождение между

теорией и экспериментом. Однако различие остается еще существенным. Это объясняется, по-видимому, тем, что при выводе выражения (4) не было учтено искажение поля в зазоре преобразователя.

Чтобы учесть искажения собственного поля цилиндра в зазоре преобразователя, воспользуемся для вывода аналитической зависимости методом отображений. Сущность метода заключается в замене влияния ферромагнитной границы на приложенное поле линейного тока простой системой токов, расположенной позади граничной поверхности. Обычно поддаются анализу поля, имеющие либо одну граничную поверхность, либо несколько (не более четырех), но углы должны быть целыми частями  $\pi$  [2]. Так как полюс магнитопровода имеет 3 граничных поверхности и угол между плоскостями  $\frac{3}{2}\pi$ , то такое

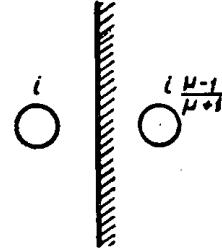


Рис. 2

поле невозможно анализировать методом отображений. Поэтому упрощаем задачу, заменяя поверхность торца полюса бесконечной поверхностью (рис. 2). Поле в воздухе, где протекает линейный ток  $i$ , расположенный на расстоянии  $h$  от бесконечной плоскости с относительной магнитной проницаемостью  $\mu$ , складывается из полей тока  $i$  и его зеркального отображения  $i(\mu-1)/(\mu+1)$ . Поле, создаваемое вихревыми токами в цилиндре, можно рассматривать как суперпозицию полей линейных токов. Поэтому можно записать

$$\Delta \dot{A} = \Delta \dot{A}_1 + \Delta \dot{A}_2, \quad (5)$$

где  $\Delta \dot{A}_1$  — векторный потенциал, обусловленный вихревыми токами в цилиндре и определяемый из выражения (1), а  $\Delta \dot{A}_2$  — векторный потенциал, обусловленный зеркальными отображениями вихревых токов. Здесь величина  $(\mu-1)/(\mu+1)$  принята равной 1, что приведет к незначительной погрешности при  $\mu \gg 1$ .

Поток, пронизывающий измерительную рамку,

$$\Delta \Phi = \oint_L \Delta \dot{A} dl = \Phi_0 r_0^2 \frac{2(c^2 + d^2) + 4(h-d)}{(c^2 + d^2)[(c^2 + d^2) + 4h(h-d)]} \dot{F}(\kappa_c r_0), \quad (6)$$

где  $l$ ,  $c$  и  $d$  — те же, что и в (3).

Выражение для относительного приращения э.д.с., измерительной обмотки

$$\frac{\Delta \dot{E}}{-|\dot{E}_0|} = i\eta_2 \dot{F}(\kappa_c r_0), \quad (7)$$

где

$$\eta_2 = r_0^2 \frac{2(c^2 + d^2) + 4(h-d)}{(c^2 + d^2)[(c^2 + d^2) + 4h(h-d)]}.$$

Выражение (7) было просчитано для реального преобразователя. Кривая 3 (рис. 1) показывает зависимость отношения нормированных привнесенных э.д.с., подсчитанных по выражению (7) и найденных экспериментально, от значения нормированной высоты измерительной обмотки.

Сравнение результатов теории и опыта позволяет сделать следующие выводы.

1. При высоте измерительной обмотки, значительно меньшей высоты магнитопровода, расхождения между теоретическими и экспериментальными данными не превышают погрешности эксперимента.

2. При измерительных обмотках, высота которых близка к высоте магнитопровода, разница между теоретическими и экспериментальными результатами достигает 23%. Это объясняется допущениями, которые были сделаны при выводе выражения (7), когда полюс магнитопровода был заменен ферромагнитным полупространством.

Таким образом, учет влияния полюсов магнитопровода на топографию магнитного поля позволяет повысить точность аналитического выражения, связывающего параметры цилиндра и преобразователя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. К. Жуков, Р. М. Закиров. Ферромагнитный цилиндр в щелевом вихретоковом преобразователе. Настоящий сборник.
  2. К. Бинс, П. Лауренсон. Анализ и расчет электрических и магнитных полей. М., «Энергия», 1970.
-