

## Переключатель магнитного потока на основе сверхпроводящих колец из керамики.

А.С. Веселовский, В.Д. Жемерикин, С.С. Иванов, С.И. Копылов  
Объединенный институт высоких температур РАН, 125412 Москва, Россия

Компенсация или локализация магнитного потока, проходящего через сверхпроводящий замкнутый контур (кольцо) позволяет рассматривать такой контур на участке замкнутого магнитопровода в качестве переключателя магнитного потока, аналогичного по своим характеристикам вентильным элементам. Принцип действия таких устройств не требует изменения характеристик намагничивающего магнитопровода и целиком основан на зависимости магнитной связи обмотки и сверхпроводящего кольца от значений магнитных потоков. Возможные области применения достаточно многообразны, например, выключатели индукционного типа и токоограничители.

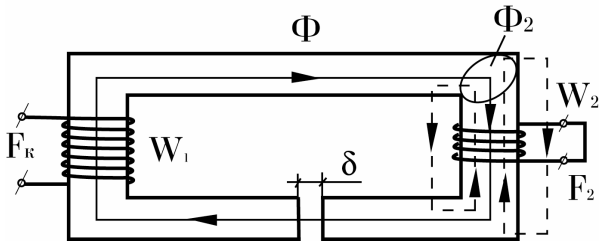


Рис. 1а.

Рассмотрим магнитную цепь на рис. 1а, на котором показан однофазный короткозамкнутый двухобмоточный трансформатор. Реальные магнитные потоки в магнитопроводе  $\Phi = \Phi_{12} + \Phi_{21}$ ,  $\Phi_2 = \Phi + \Phi_{2s}$  где  $\Phi_{12}$  и  $\Phi_{21}$  потоки, соответственно полученные при разомкнутой обмотке экрана и при разомкнутой намагничивающей катушке,  $\Phi_2$  – поток, пронизывающий экран то есть, вторичную короткозамкнутую обмотку, а  $\Phi_{2s}$  – поток рассеяния вторичной обмотки.

Поток  $\Phi_2$  наводит в экране эдс  $E_2 = I_2 R_2$ , которая вследствие индуктивности рассеяния отстает от эдс намагничивающей катушки  $E$  на угол  $\varphi_2$ , при этом  $\tan \varphi_2 = x_{2s} / R_2$ , где  $x_{2s}$  – индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки (экрана).

Складывая н.с.  $F$ , создающую магнитный поток  $\Phi$ , и н.с. экрана  $F_2$ , получим н.с. катушки  $F_K$ . Намагничивающую силу экрана  $F_2$  можно разложить на активную и реактивную составляющие  $F_{2a} = \Phi R_{\mu\delta}$  и  $F_{2r} = \Phi x_{\mu\delta}$ , где  $R_{\mu\delta}$  и  $x_{\mu\delta}$  – активное и реактивное сопротивление экрана, тогда  $F_K = (F + \Phi R_{\mu\delta}) + j \Phi x_{\mu\delta}$ .

Учитывая, что н.с.  $F$  должна компенсировать падения магнитных напряжений в активном магнитном сопротивлении стали  $\Phi R_{\mu\sigma}$  и воздушном зазоре  $\Phi R_{\mu\delta}$ , получим  $F_K = \Phi [(R_{\mu\sigma} + R_{\mu\delta} + R_{\mu\delta}) + j x_{\mu\delta}]$ . Затем определяется комплексное магнитное сопротивление  $Z_\mu = F_K / \Phi = (R_{\mu\sigma} + R_{\mu\delta} + R_{\mu\delta}) + j x_{\mu\delta} = R_\mu + j x_\mu$ .

Таким образом, эквивалентное активное магнитное сопротивление цепи равно сумме активных маг-

нитных сопротивлений стали, воздушного зазора и экрана. Реактивное магнитное сопротивление в данном случае определяется только реактивным магнитным сопротивлением экрана.

Выразим магнитное сопротивление экрана  $R_{\mu\delta}$  и  $x_{\mu\delta}$  через его конструктивные параметры. Из прямоугольного треугольника  $ABC$  (рис. 1б) можно записать  $AC = \Phi R_{\mu\delta} = F_2 \sin \varphi_2$ .

В свою очередь, намагничивающая сила экрана

$$F_2 = I_2 w_2 = w_2 \frac{F_2}{R_2} = w_2 \frac{E \cos \varphi_2}{R_2} = w_2^2 \frac{\omega \Phi}{\sqrt{2} R_2} \cos \varphi_2,$$

тогда

$$AC = \Phi R_{\mu\delta} = w_2^2 \frac{\omega \Phi}{\sqrt{2} R_2} \sin \varphi_2 \cos \varphi_2 = w_2^2 \frac{\omega \Phi}{\sqrt{2} R_2} \cdot \frac{x_{2s} R_2}{Z_{2s}^2},$$

откуда активное магнитное сопротивление экрана

$$R_{\mu\delta} = \frac{w_2^2 \omega}{\sqrt{2}} \cdot \frac{x_{2s}}{R_{2s}^2 + x_{2s}^2}. \quad (1)$$

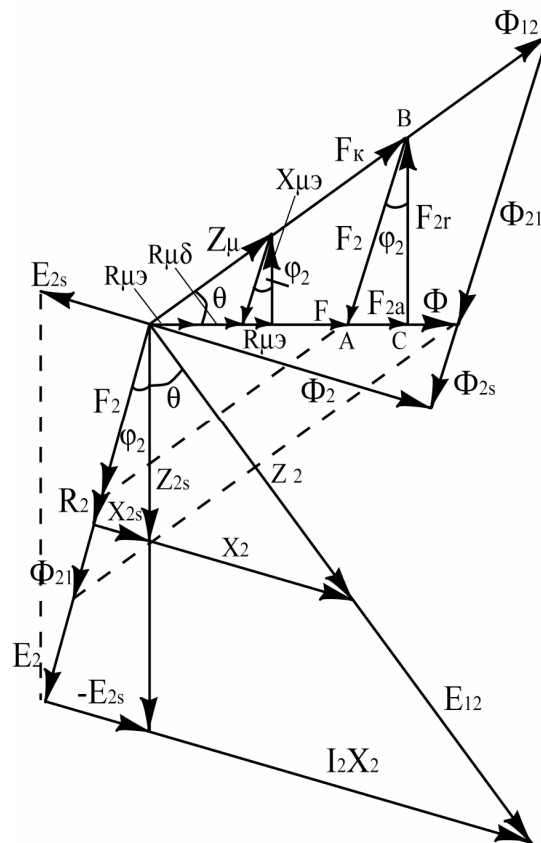


Рис. 1б.

Таким образом, при учете рассеяния экрана в комплексном магнитном сопротивлении цепи появляется активная составляющая магнитного сопротивления экрана. Если рассеяние экрана не учитывать, то  $R_{\mu\delta} = 0$ .

Реактивную магнитную составляющую комплексного сопротивления экрана можно найти из рассмотрения прямоугольного треугольника  $ABC$  (рис. 1б)

$$CB = \Phi x_{\mu\delta} = F_2 \cos \varphi_2 = \frac{w_2 E}{R_2} \cos^2 \varphi_2 = \frac{w_2^2 \omega}{\sqrt{2} R_2} \Phi \cos^2 \varphi_2,$$

откуда

$$x_{\mu\delta} = \frac{w_2^2 \omega}{\sqrt{2} R_2} \cdot \frac{R_2}{R_2 + x_{2S}^2}. \quad (2)$$

Если  $x_{2S}=0$ , то уравнение (2) принимает вид

$$x_{\mu\delta} = \frac{w_2^2 \omega}{\sqrt{2} R_2} \text{ (без учета рассеяния экрана).}$$

Схема замещения цепи с экраном без учета потерь в стали показана на рис. 1в.

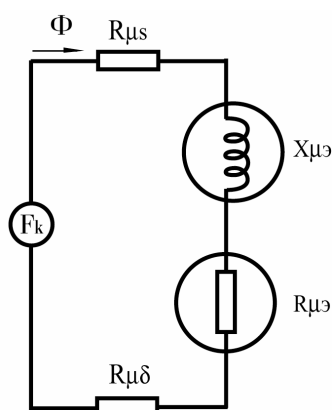


Рис. 1в.

Реальный поток  $\Phi$  в магнитной цепи в рассматриваемом случае определяется уравнением:

$$\Phi = \frac{F_K}{\sqrt{(R_{\mu C} + R_{\mu \delta} + R_{\mu \epsilon})^2 + x_{\mu \delta}^2}}. \quad (3)$$

Угол потерь в экране

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{x_{\mu \delta}}{R_{\mu C} + R_{\mu \delta} + R_{\mu \epsilon}}. \quad (4)$$

Пусть вторичная обмотка (рис. 1а) выполнена в виде короткозамкнутого кольца ( $w_2=1$ ), сделанного из сверхпроводящей керамики.[1] Предположим, что  $R_{\mu C}$  мало, а  $R_{\mu \delta}$  отсутствует, так как  $\delta=0$ .

При  $R_2=0$  (кольцо находится в сверхпроводящем состоянии),

$$R_{\mu \delta} = \frac{\omega}{\sqrt{2} x_{2S}}; x_{\mu \delta} = 0. \quad (5)$$

Если кольцо находится в нормальном состоянии ( $R_2$  – велико, а стабилизатора нет), то

$$R_{\mu \delta} \rightarrow 0; x_{\mu \delta} = \frac{\omega}{\sqrt{2} R_2}. \quad (6)$$

Подставляя (5) и (6) в (3), выразим поток в стержне магнитопровода  $\Phi_m$  (кольцо в сверхпроводящем состоянии) через поток незэкранированного стержня  $\Phi_0$  (кольцо в нормальном состоянии), получим:

$$\Phi_m = \frac{x_{2S}}{R_2} \Phi_0, \quad (7)$$

где  $R_2$  – активное сопротивление кольца в нормальном состоянии.

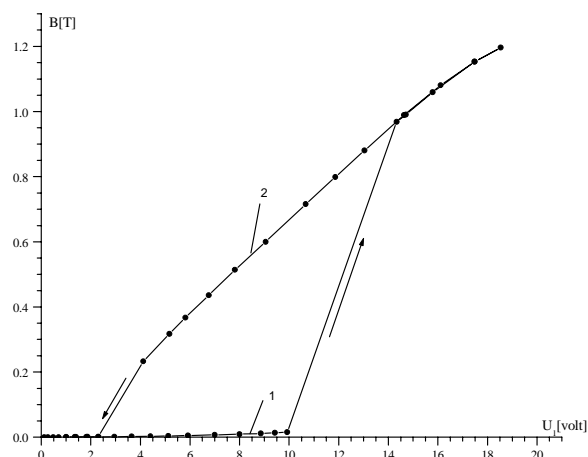


Рис. 2.

На рис. 2 показаны результаты измерения индукции магнитного поля в сердечнике для сверхпроводящего экрана, имеющего форму кольца.[2] При нулевом сопротивлении экрана (экран находится в сверхпроводящем состоянии, кривая 1) поток намагничивающей катушки, проходящей через экран, полностью компенсируется потоком экрана. Индуктивность катушки близка к нулю, а напряжение на ее зажимах определяется активным сопротивлением. Если сверхпроводящий экран находится в нормальном состоянии (кривая 2), то поток намагничивающей катушки полностью проходит через экран, что соответствует режиму холостого хода.

Представленная работа выполнена в рамках Российской федеральной программы по сверхпроводимости (контракт № 40.012.1.1146)

1. Полуценко О.Л., Матвеев В.А., Нижельский Н.А., Шавкин С.В. Рост кристаллов и структуры иттрий-бариевых сверхпроводников при направленной кристаллизации. //Физика и химия обработанных материалов, 2003, №1, с. 77 – 82

2. С.С. Иванов, В.Д. Жемерикин, С.И. Копылов Однофазный сверхпроводящий управляемый реактор Препринт ОИВТ РАН № 4-475. –М., 2004, 28 с.