

## ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЙ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ КЛАПАННОГО ТИПА НА ЭНЕРГИЮ МАГНИТНОГО ПОЛЯ РАССЕЯНИЯ

А. В. КУРНОСОВ

(Представлена научным семинаром каф. «Электрические машины и аппараты»  
и «Общая электротехника»)

Массовое применение электромагнитов в аппаратуре автоматики и телемеханики, радиотехники, приборостроении и др. ставит на очередь задачу довести теоретический расчет электромагнитов во всех отношениях на такой же уровень, на котором находится, например, в настоящее время расчет электрических машин. Решение этой задачи должно пойти по пути систематизации накопленного производственного опыта изготовления электромагнитов и нахождения условий, соответствующих рациональному использованию активных материалов.

Расход активных материалов в первую очередь зависит от правильного выбора основных геометрических соотношений размеров электромагнита, которые оказывают непосредственное влияние на магнитное поле рассеяния.

Наличие потоков рассеяния в электромагнитном механизме намного усложняет его расчет. Практически при всех встречающихся соотношениях размеров потоки рассеяния соизмеримы с главным потоком, и их необходимо учитывать при расчете электромагнитов. Так, в [1 и 2] даны значения коэффициентов рассеяния для некоторых электромагнитных механизмов, где  $\delta = 1,8-3$  при разомкнутом положении якоря электромагнита. Поэтому представляет интерес исследовать влияние соотношений основных геометрических размеров на характер изменения потока рассеяния.

Как и основной поток, определяемый магнитной энергией, запасенной в рабочем воздушном зазоре, поле рассеяния можно характеризовать магнитной энергией рассеяния  $W_{\text{мр}}$ , которая в свою очередь зависит от соотношений основных геометрических размеров электромагнита.

Магнитное поле рассеяния характеризуется проводимостью потока утечки  $\Phi_{\text{у}}$ . На рис. 1 представлена электромагнитная система, у кото-

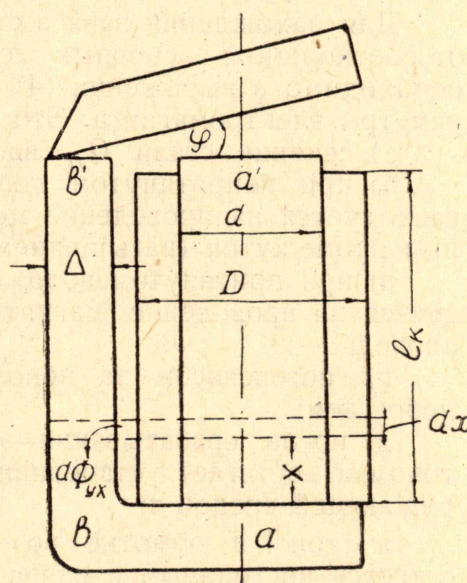


Рис. 1. Эскиз электромагнита.

рой разность магнитных потенциалов между корпусом и сердечником изменяется с ростом координаты  $x$ . В этом случае при пренебрежении насыщением магнитопровода разность магнитных потенциалов между точками  $a$  и  $b$  равна нулю, а вверху, между точками  $a^1$  и  $b^1$ , имеется полная разность потенциалов, определяемая м.д.с. катушки. В связи с этим при вычислении  $W_{\text{мп}}$  необходимо найти выражение потокосцепления рассеяния  $\Psi_p$  через проводимость потока утечки, учитывающей характер распределения разности магнитного потенциала по длине  $l_k$ .

Энергию магнитного поля рассеяния можно представить как

$$W_{\text{мп}} = \int_0^I \Psi_p di. \quad (1)$$

Потокосцепление рассеяния на элементарном участке  $dx$  на расстоянии  $x$  от начала катушки можно выразить как [3]

$$d\Psi_{\text{рх}} = d\Phi_{\text{yx}} W_x, \quad (2)$$

где поток утечки  $d\Phi_{\text{yx}} = \frac{IW}{l_k} x g dx$ . Число витков на длине  $x$  можно определить как

$$W_x = W \cdot x / l_k,$$

тогда 
$$\Psi_p = \int_0^{l_k} IW \cdot x / l_k \cdot g W \cdot x / l_k \cdot dx = IW^2 \frac{g l_k}{3}. \quad (3)$$

Подставив (3) в (1), получим

$$W_{\text{мп}} = (IW)^2 \frac{g l_k}{6}. \quad (4)$$

Для нахождения зависимости энергии магнитного поля рассеяния от соотношений основных геометрических размеров электромагнита необходимо в выражении (4) выразить  $IW$  через геометрические параметры электромагнита. Это можно сделать, если предположить, что:

а) сечение стали  $Q_{fe}$  вдоль длины магнитопровода постоянным;  
 б) при непритянутаом положении якоря вся м. д. с.  $IW$  обмотки расходуется на проведение магнитного потока через рабочий воздушный промежуток (насыщением стали пренебрегаем);

в) при притянутаом положении якоря вся м. д. с. обмотки расходуется на проведение магнитного потока вдоль длины  $l_{fe}$  магнитопровода;

г) гистерезисом за неполный цикл работы электромагнита пренебрегаем;

д) после срабатывания электромагнит длительно находится под током и достигает установившейся температуры превышения над окружающей средой  $\tau$ ;

ж) ток  $I$  в обмотке во время движения якоря электромагнита остается постоянным и равен установившемуся значению.

$IW$  можно выразить как  $H \cdot l_{fe}$ , где  $H$  — напряженность магнитного поля магнитопровода в замкнутом положении якоря. Напряженность магнитного поля в однородной магнитной цепи, соответствующая ампервиткам трогания  $AW_{\text{тр}}$ , равна

$$H = \frac{jK_3 Q_0}{1,65 l_{fe}}, \quad (5)$$

здесь  $j$  — плотность тока в обмотке;

$K_3$  — коэффициент заполнения обмотки;

$Q_0$  — площадь сечения обмотки;

$1,65 = AW_{гор}/AW_{тр}$  [4].

$AW_{гор}$  — допустимые по нагреву ампер-витки обмотки. Допустимая плотность тока в обмотке может быть определена равенством:

$$j^2 \rho V_{ок} K_3 = K_{то} S_0 \tau, \quad (6)$$

где  $K_{то}$  — коэффициент теплоотдачи с поверхности;

$S_0 = (S_H + \alpha S_B)$  [4] — теплоотдающая поверхность обмотки;

$S_H$  — наружная поверхность обмотки;

$S_B$  — внутренняя поверхность обмотки;

$\alpha$  — коэффициент;

$\rho$  — удельное сопротивление провода обмотки.

Подставим значение из (6) в (5), получим

$$H = \frac{K_0 \sqrt{S_0 V_{ок}}}{l_{fe} l_{м.ср.}}, \quad (7)$$

где

$$K_0 = \sqrt{\frac{K_{то} K_3 \tau}{1,65^2 \rho}}.$$

Подставив вместо  $IW$  в (4)  $H \cdot l_{fe}$ , получим выражение для энергии поля рассеяния через электромагнитные и геометрические параметры электромагнита

$$W_{мп} = \frac{K_0^2 S_0 V_{ок} l_{кг}}{6 l_{м.ср.}^2}, \quad (8)$$

здесь  $V_{ок}$  — объем обмотки,

$l_{м.ср.}$  — средняя длина витка обмотки.

Для электромагнита клапанного типа, у которого ширина ярма примерно равна  $(1,25-2,5)D/2$  (в нашем случае ширина ярма равна  $2D/2$ ) можно воспользоваться приближенной формулой [2] для определения удельной проводимости потока утечки между цилиндром и параллельной плоскостью, которая определяется как

$$g = \frac{K_a 2\pi \mu_0}{\ln(2n + \sqrt{4n^2 - 1})}, \quad (9)$$

где  $K_a = 0,85 - 0,92$  — поправочный коэффициент [2]

$$n = \frac{D/2}{d}.$$

Подставим выражение (9) в (8).

Для нахождения зависимости энергии магнитного поля рассеяния от соотношений основных геометрических размеров электромагнита отнесем полученное выражение к сумме объемов активных материалов, т. е. будем находить зависимость удельной энергии магнитного поля рассеяния от соотношений основных геометрических размеров  $X = d/D$  и  $Y = l_{к}/D$ . Анализ проведем на электромагните клапанного типа (рис. 1) в случае, когда  $\alpha = 1$ , так как это несколько упростит выражение удельной энергии поля рассеяния без значительного влияния на характер кривых  $\Gamma(X, Y)$ .

Выразив в правой части вновь полученного выражения все геометрические параметры через относительные величины  $X$  и  $Y$ , а абсолютные электромагнитные параметры и базовый размер вынеся

в левую часть выражения, получим в правой части геометрический фактор  $\Gamma(X, Y)$ , характеризующий зависимость электромагнитной энергии, запасенной в магнитном поле рассеяния электромагнита в функции соотношений основных геометрических размеров

$$\frac{W_{\text{мр}}}{K_{01} D (V_{\text{fe}} + V_{\text{ок}})} = \frac{Y^3 (I - X)}{(2,36 \cdot X^4 + X^2 Y + X^2 + Y) \ln \left( \frac{I + \sqrt{I - X^2}}{X} \right)}, \quad (10)$$

здесь  $K_{01} = \frac{4K_{\text{а}} \mu_0 K_0^2}{3}$ .

Кривые  $\Gamma(X, Y)$  строились в функции  $X$  при различных постоянных значениях  $Y$  (рис. 2). Из кривых  $\Gamma(X, Y)$ , а также из (10) видно, что

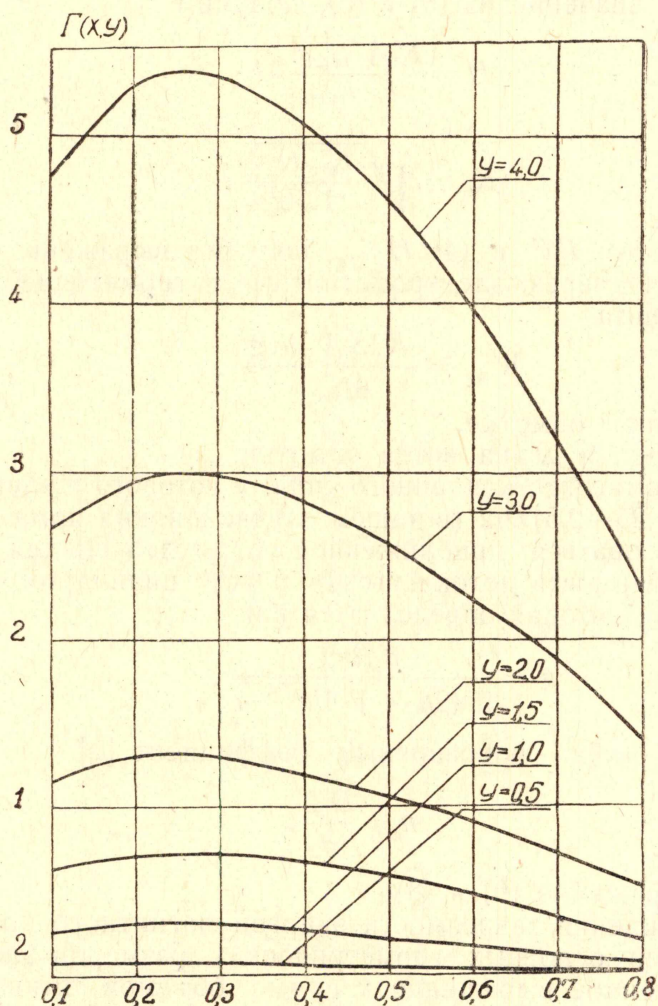


Рис. 2. Геометрический фактор, характеризующий энергию магнитного поля рассеяния электромагнита клапанного типа.

в большой степени на характер изменения геометрического фактора влияет  $Y$ . При  $Y \geq 3$  резкое возрастание геометрического фактора магнитного поля рассеяния, а следовательно, возрастание удельной магнитной энергии, запасенной в поле рассеяния электромагнита кла-

панного типа, подсказывает нецелесообразность применения  $Y \geq 3$ . Кроме того, максимум геометрического фактора магнитного поля рассеяния наступает при  $X = 0,25$  для  $\alpha = 1$ .

Кривые (рис. 2) представляют ценность в отношении наглядного представления характера зависимости удельной энергии магнитного поля рассеяния от соотношений основных геометрических размеров электромагнита постоянного тока клапанного типа.

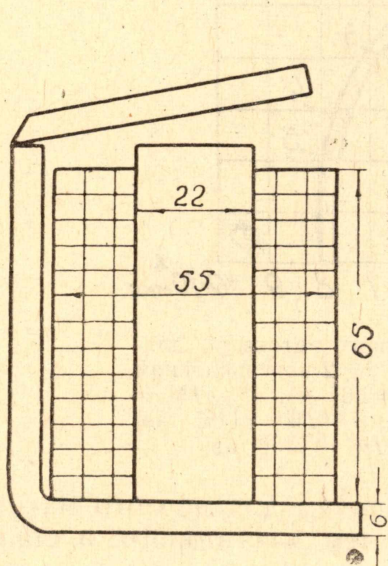


Рис. 3. Макет электромагнита с  $X = 0,39$ ;  $Y = 1,18$ .

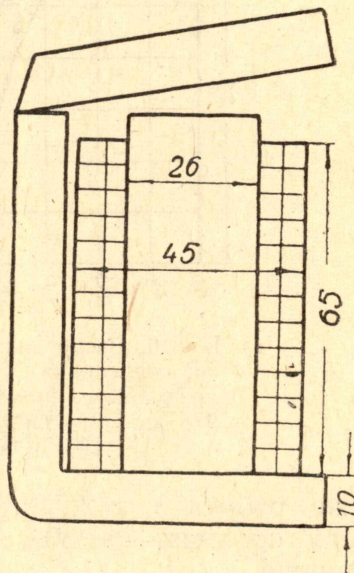


Рис. 4. Макет электромагнита с  $X = 0,59$ ;  $Y = 1,4$ .

Для проверки теоретических выводов было изготовлено ряд макетов электромагнитов с различными значениями  $X$  и  $Y$ . Расчет макетов производился с учетом выполнения определенной механической

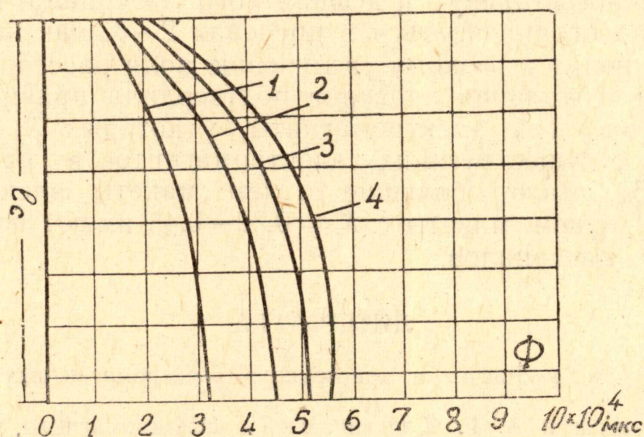


Рис. 5. Распределение магнитного потока по длине сердечника  $l_c$  для макета № 1 при начальном воздушном промежутке  $\delta_n = 6$  мм. 1— $IW = 1580$  ав; 2— $IW = 2380$  ав; 3— $IW = 3160$  ав; 4— $IW = 3960$  ав.

работы. В качестве примера на рис. 3 и рис. 4 представлены два макета, у которых высота катушек одинакова и равна 6,5 см, а диаметры сердечников разные. Так  $d_1 = 2,2$  см,  $d_2 = 2,6$  см.

На рис. 5 и рис. 6 представлены соответственно кривые распределения потоков вдоль сердечников для первого макета с  $X = 0,39$  и  $Y = 1,18$ , и второго — с  $X = 0,59$  и  $Y = 1,4$ . При выполнении одной

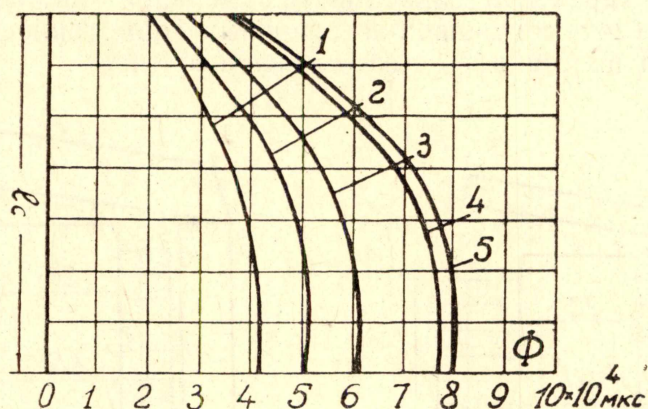


Рис. 6. Распределение магнитного потока по длине сердечника  $l_c$  для макета № 2 при начальном воздушном промежутке  $\delta_n = 6$  мм. 1 —  $IW = 978$  ав; 2 —  $IW = 1210$  ав; 3 —  $IW = 1485$  ав; 4 —  $IW = 2000$  ав; 5 —  $IW = 2150$  ав.

и той же работы  $\sigma_1 \cong 2,7$ , а  $\sigma_2 \cong 2$ . Причем для первого макета расход меди составил на 30% больше, чем для второго, а стали — на 10% меньше.

#### Выводы

а) Применение  $X=0,25$  и близких к нему значений в электромагните клапанного типа, как это следует из рис. 2, нецелесообразно. Значение  $X$  должно выбираться при проектировании электромагнита справа от  $X=0,25$ , так как выбор слева приводит к резкому возрастанию расхода такого дорогостоящего и дефицитного материала, как медь. Значение  $Y$  должно ограничиваться в пределах 2—3, так как дальнейшее увеличение приводит к резкому увеличению поля рассеяния.

б) Экспериментальная проверка подтвердила правильность теоретических выводов. Так, электромагниты, у которых  $X$  было выбрано такое же, как у существующих электромагнитов в промышленности ( $X=0,32—0,45$ ), имеют большие  $\sigma$ , чем макеты электромагнитов с  $X=0,55—0,6$ . Причем, макеты с  $X=0,32—0,45$  имеют повышенный расход активных материалов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. А. Ступель. Расчет и конструкция электромагнитных реле. Госэнергоиздат, 1950.
2. А. В. Гордон и А. Г. Сливинская. Электромагниты постоянного тока. Госэнергоиздат, 1960.
3. Н. Е. Лысов. Расчет электромагнитных механизмов. Госэнергоиздат, 1949 г.
4. М. Г. Кобленц. Выбор оптимальных соотношений меди и стали в аппаратах постоянного тока. Вестник электропромышленности, № 11, 1961.