

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 много 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 Φ_y . На рис. 1 представлена электромагнитная система, у кото-

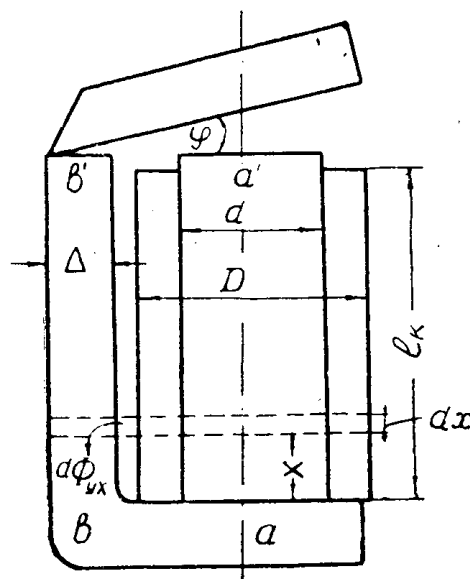


Рис. 1. Эскиз электромагнита.

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 сверху, между точками a^1 и b^1 , имеется полная разность потенциалов, определяемая м.д.с. катушки. В связи с этим при вычислении $W_{\text{мр}}$ необходимо найти выражение потокосцепления рассеяния Ψ_p через проводимость потока утечки, учитывающей характер распределения разности магнитного потенциала по длине l_k .

Энергию магнитного поля рассеяния можно представить как

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

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

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

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 τ ;

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;

$1,65 = AW_{\text{гор}}/AW_{\text{тр}}$ [4].

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

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

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

$S_0 = (S_{\text{н}} + \alpha S_{\text{в}})$ [4] — теплоотдающая поверхность обмотки;

$S_{\text{н}}$ — наружная поверхность обмотки;

$S_{\text{в}}$ — внутренняя поверхность обмотки;

α — коэффициент;

ρ — удельное сопротивление провода обмотки.

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

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

где

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

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

$$W_{\text{мр}} = \frac{K_0^2 S_0 V_{\text{ок}} l_{\text{к}} g}{6 l_{\text{м.ср.}}^2}, \quad (8)$$

здесь $V_{\text{ок}}$ — объем обмотки,

$l_{\text{м.ср.}}$ — 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 $2 D/2$) 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 $X = d_i D$ и $Y = l_{\text{к}}/D$. 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

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

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

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

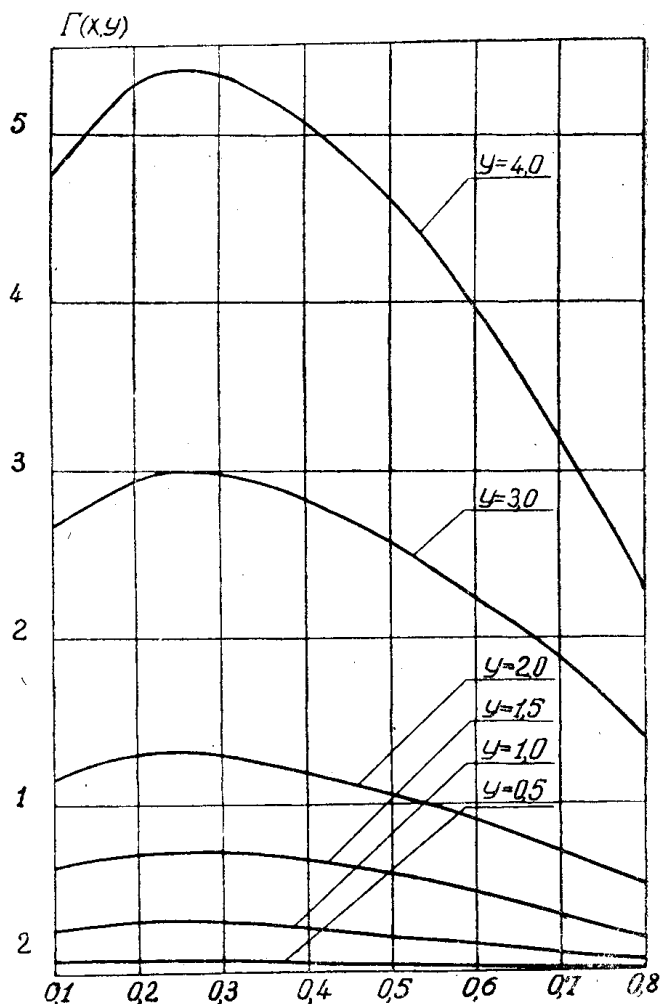


Рис. 2. Геометрический фактор, характеризующий энергию магнитного поля рассеяния электромагнита клапанного типа.

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.

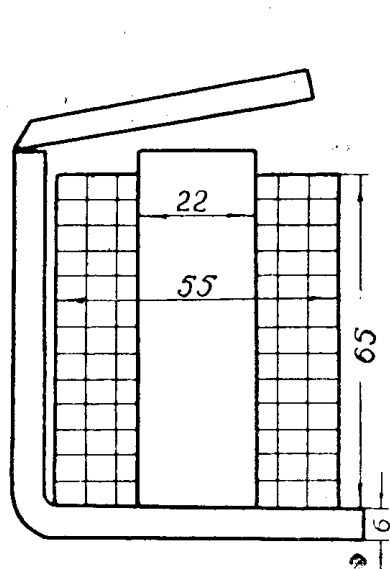


Рис. 3. Макет электромагнита с $X = 0,39$; $Y = 1,18$.

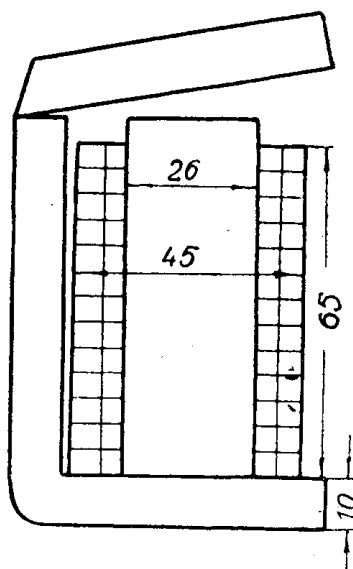


Рис. 4. Макет электромагнита с $X = 0,59$; $Y = 1,4$.

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

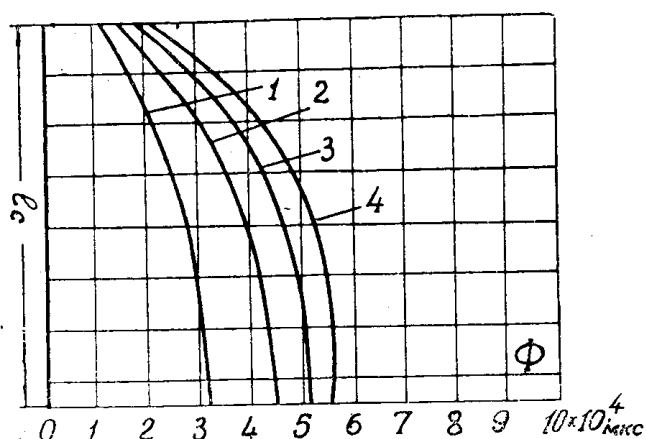


Рис. 5. Распределение магнитного потока по длине сердечника l_c для макета № 1 при начальном воздушном промежутке $\delta_n = 6$ мм. 1— $IW = 1580$ ав; 2— $IW = 2380$ ав; 3— $IW = 3160$ ав; 4— $IW = 3960$ ав.

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

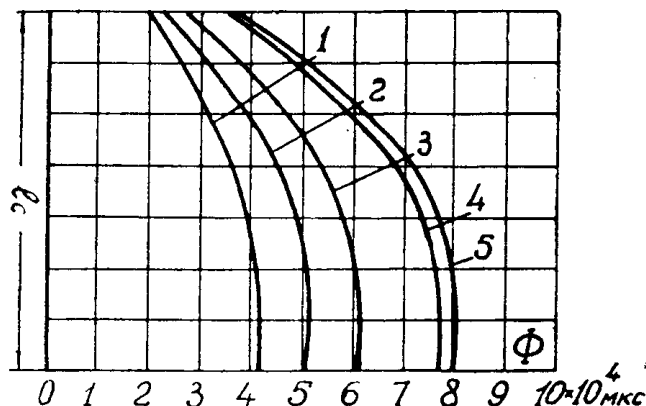


Рис. 6. Распределение магнитного потока по длине сердечника l_c для макета № 2 при начальном воздушном промежутке $\delta_n = 6$ мм. 1 — $IW = 978$ ав; 2 — $IW = 1210$ ав; 3 — $IW = 1485$ ав; 4 — $IW = 2000$ ав; 5 — $IW = 2150$ ав.

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 σ , 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.