

**НАИВЫГОДНЕЙШИЕ СООТНОШЕНИЯ ОСНОВНЫХ
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ
ПОСТОЯННОГО ТОКА ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТИПА**

А. В. КУРНОСОВ

(Представлена научным семинаром кафедры электрических машин
и аппаратов)

Электромагниты такого типа нашли широкое применение для подъема стального лома, в качестве удерживающих электромагнитов и электромагнитных муфт. Расчет данных электромагнитов может быть значительно облегчен, если заранее будут известны условия, соответствующие максимальному использованию активных материалов. В конечном результате они сводятся к нахождению соотношений между диаметром сердечника d и диаметром катушки D , а также между длиной катушки l_k и D . Эти соотношения полностью определяют геометрию электромагнита цилиндрического типа. На рис. 1 представлен эскиз электромагнита.

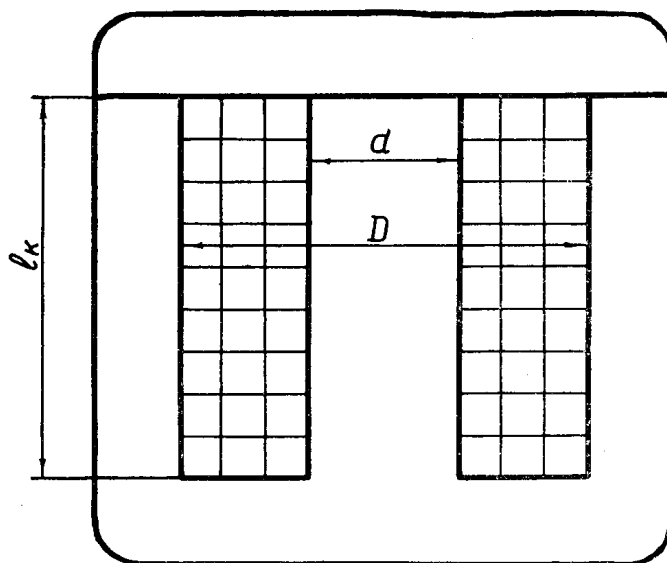


Рис. 1. Эскиз электромагнита.

В основу выбора соотношений между основными размерами электромагнита можно принять отношение наибольшей механической работы W_m , которую может совершить электромагнит, к объему активных материалов:

$$\frac{W_M}{V_c + V_o},$$

здесь V_c — объем стали магнитопровода;
 V_o — объем обмотки катушки.

Наибольшая механическая работа, которую должен совершить электромагнит, эквивалентна площади петли $S_{ocаво}$ (рис. 2).

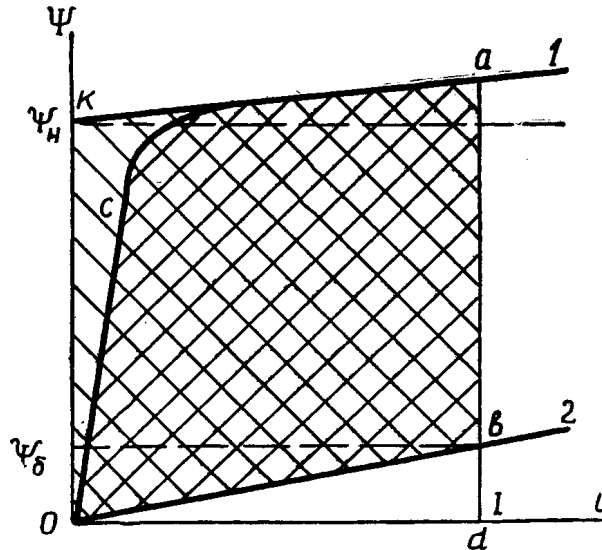


Рис. 2. Аппроксимация кривых потоко-сцеплений для двух крайних положений якоря.

При выводе основных соотношений сделаем допущения:

- считаем сечение стали Q_c вдоль длины магнитопровода постоянным;
- при притянutom положении якоря вся м. д. с. обмотки расходуется на проведение магнитного потока вдоль магнитопровода;
- при непритянutom положении якоря насыщением стали пренебрегаем;
- после срабатывания электромагнит длительно находится под током и достигает установившейся температуры перегрева τ ;
- ток в обмотке во время движения якоря остается неизменным.

Работа, выполненная якорем электромагнита, пропорциональна площади петли «ток — поток», заключенной между кривыми $\psi = f(i)$, построенными для двух крайних положений якоря (притянutom и непритянutom). Площадь $S_{ocаво}$ выразим через электрические и магнитные параметры электромагнита. Для этого произведем аппроксимацию кривых $\Psi = f(i)$ в замкнутом и разомкнутом положении якоря.

Аппроксимация с помощью аналитических формул [1] приводит к громоздким выражениям и не дает возможности выразить условия максимума удельной работы в явном виде. Как показывает анализ вопроса, к более простым и удовлетворительным результатам приводит кусочно-линейная аппроксимация.

Действительная кривая «ос1» заменяется ломаной «ок-к1». Уравнения для прямых можно записать в виде:

$$1) \Psi = \Psi_{II} + K_1 i, \text{ где } K_1 = \frac{\Psi - \Psi_{II}}{I}, \text{ при } \Psi = \Psi_{II};$$

$$2) \Psi = K_2 i, \text{ где } K_2 = \frac{\Psi_{\delta}}{I}.$$

Выражение для электромагнитной энергии, израсходованной на совершение механической работы, может быть записано как

$$W_M = \int_0^l K_H (\psi_H + K_1 i) di - \int_0^l K_2 i di. \quad (1)$$

Подставив вместо K_1 и K_2 их выражения и сделав соответствующие преобразования, получим окончательное выражение для работы:

$$W_M = \frac{HV_c}{2} [K_H (B + B_H) - \sigma_p B \mu \delta]. \quad (2)$$

(см. приложение 1).

В равенстве (2) выразим H через геометрические параметры электромагнита, при этом будем исходить из допустимого превышения температуры обмотки электромагнита.

Потери в обмотке любого электромагнита постоянного тока при установившемся режиме определяются выражением:

$$P = I^2 \rho \frac{l_M}{q_M} w. \quad (3)$$

w — число витков катушки;

ρ — удельное сопротивление обмотки электромагнита;

l_M — средняя длина витка обмотки;

q_M — сечение меди провода.

Выражение (3) можно записать следующим образом:

$$j^2 \rho V_o K_3 = K_T S_o \tau, \quad (4)$$

где j — плотность тока в обмотке;

K_3 — коэффициент заполнения;

K_T — коэффициент теплоотдачи с поверхности;

S_o — наружная поверхность катушки и магнитопровода.

Напряженность магнитного поля в однородной магнитной цепи:

$$H = \frac{j Q_o K_3}{1,65 l_c}, \quad (5)$$

Q_o — сечение обмоточного окна;

l_c — средняя длина магнитной цепи;

1,65 — коэффициент запаса по ампервиткам.

Возведя обе части равенства (5) в квадрат, выразив из полученного соотношения j^2 и подставив его в (4), найдем выражение для H через геометрические параметры электромагнита:

$$H = \frac{\sqrt{K_o S_o V_o}}{l_c l_M}, \quad (6)$$

где

$$K_o = \frac{K_T K_3 \tau}{1,65^2 \rho}.$$

Выражение (6) подставляем в (2). Отнесем обе части полученного равенства к сумме объемов активных материалов, после некоторых преобразований получим электромеханическую энергию на единицу объема активных материалов.

$$\frac{W_M}{V_c + V_o} = \frac{K_{o1} V_c \sqrt{V_o S_o}}{l_c l_M (V_c + V_M)}, \quad (7)$$

здесь

$$K_{o1} = \frac{K_H (B_H + B) - \sigma_p B \mu \delta}{2} K_o.$$

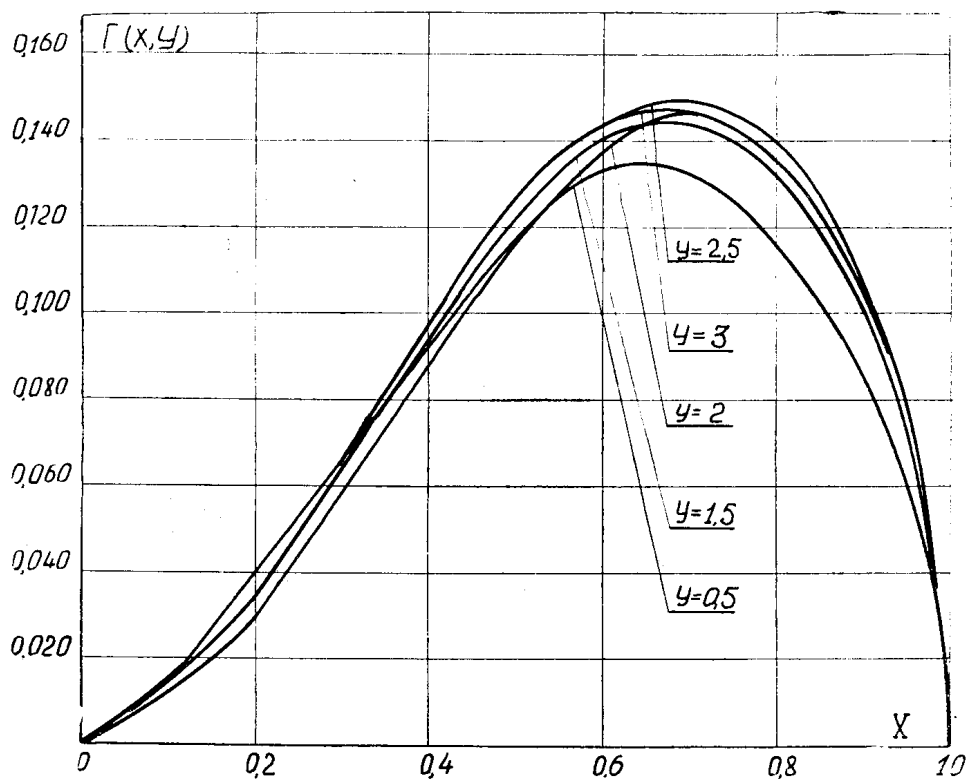
Выражение (7) пригодно для анализа любого типа тягового электромагнита. Применим выражение (7) для анализа электромагнита цилиндрического типа рис. 1.

Выразив в правой части выражения (7) все геометрические параметры электромагнита через его основные размеры (d , D , l_k) аналогично [2] и отнеся их к какому-нибудь одному размеру (в нашем случае D), получим:

$$\frac{W_M}{K_{01} (V_c + V_0) \sqrt{D}} = \frac{\sqrt{\frac{Y(1-X) \sqrt{1+X^2} (1,5 \sqrt{1+X^2} + Y - 1)}{1+X}}}{Y \left(\frac{1}{X^2} - 1 \right) + [1 + 2Y + 1,5 (\sqrt{1+X^2} - 1)]}, \quad (8)$$

где $X = \frac{d}{D}$; $Y = \frac{l_k}{D}$.

Правую часть выражения (8) обозначим через Γ и назовем ее геометрическим фактором. На рис. 3 построены кривые Γ для различных значений X и Y . Как видно из кривых, максимум геометрического фактора находится в пределах отношения $X = (0,65 \div 0,7)$ и $Y = (1,5 \div 2,5)$.



Фиг 3

Рис. 3. Кривые зависимости геометрического фактора от X и Y .

Вывод: на основании анализа кривых геометрического фактора оптимальные соотношения основных размеров электромагнита цилиндрического типа находятся в пределах

$$\frac{d}{D} = 0,65 \div 0,7; \quad \frac{l_k}{D} = 1,5 \div 2,5.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 1.

$$W_M = K_H \left[\Psi_H + \frac{\Psi + \Psi_H}{2l} i \right] i - \frac{1}{2} i \left(\frac{\Psi \delta}{l} i \right) = \\ = K_H \left[B_H + \frac{B - B_H}{2} \right] H V_c - \frac{w \Phi_{cp} l}{2}, \quad (I')$$

где $K_H = \frac{S_{ocado}}{S_{okado}}$ — поправочный коэффициент, учитывающий площадь S_{okado} ;

B_H — магнитная индукция, соответствующая Ψ_H ;

H — напряженность магнитного поля в замкнутом положении якоря;

B — магнитная индукция, выбираемая за коленом кривой намагничивания;

$\Psi \delta = W \Phi_{cp}$, где $\Psi \delta$ — потокосцепление электромагнита в непритянутом положении якоря.

$$\Phi_{cp} = \frac{1}{l_a} \int_0^{l_a} \Phi_x dx \quad [3] \quad \text{— средний поток вдоль длины сердечника}$$

электромагнита;

l_a — длина сердечника.

$$\Phi_x = \Phi_{max} - \frac{lwgx^2}{2l_a} \quad [3] \quad \text{— значение потока в сечении } x \text{ сердечника;}$$

Φ_{max} — максимальное значение магнитного потока в сечении сердечника.

$$\Phi_{cp} = \Phi_{max} - \frac{1}{3} \left(\frac{lwg l_a}{2} \right),$$

$$\text{но } \frac{lwg l_a}{2} \Phi_{max} = \Phi_{\mu \delta}, \quad \text{тогда}$$

$$\Phi_{cp} = \Phi_{\mu \delta} \left(\frac{1 + 2\sigma}{3} \right) = \sigma_p \Phi_{\mu \delta},$$

где $\Phi_{\mu \delta}$ — магнитный поток, выходящий из сердечника в рабочем воздушном зазоре;

$\sigma = \frac{\Phi_{max}}{\Phi_{\mu \delta}}$ — коэффициент рассеяния.

Подставив выражение для Φ_{cp} в (I'), получим:

$$W_M = \frac{H V_c}{2} [K_H (B + B_H) - \sigma_p B \mu \delta], \quad (I'')$$

где $B \mu \delta$ — магнитная индукция в рабочем воздушном зазоре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Бессонов. Электрические цепи со сталью, Госэнергоиздат, 1948.
2. А. В. Курносков. О проектировании электромагнитов постоянного тока с оптимальным соотношением меди и стали, Труды МЭИ, Электромеханика, вып. 56, 1964 г.
3. Н. Е. Лысов. Расчет электромагнитных механизмов, Оборонгиз, 1949.