

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

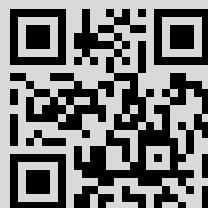
Б. К. Буль, Расчет магнитной цепи и катушки переменного тока по заданным параметрам, *Автомат. и телемех.*, 1957, том 18, выпуск 10, 918–926

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 194.226.199.4

25 марта 2017 г., 16:55:07



РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ И КАТУШКИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПО ЗАДАНЫМ ПАРАМЕТРАМ

Б. К. БУЛЬ

(Москва)

Приводится метод расчета электрических, магнитных и конструктивных параметров цепи и катушки переменного тока. Расчет ведется с учетом активного сопротивления катушки, потерь в стали и при нелинейной магнитной характеристике. Показывается, что метод расчета применим также и для цепей постоянного тока. Рассматривается расчет ряда вариантов при различных исходных данных. Дается числовой пример.

Предлагаемый метод расчета магнитной цепи и катушки при различных исходных данных (индукции, мощности, индуктивности и т. п.) может быть использован для расчета цепей без воздушного зазора или с малым зазором в случае, когда можно пренебречь потоком рассеяния [1, 2, 7—9]. При определении параметров катушки со сталью необходимо найти связь между электрическими, магнитными и конструктивными параметрами магнитной цепи и обмотки. Расчетным путем определяются индукция, длина или сечение магнитопровода, число витков (см. варианты 1 и 2 в табл. 1).

Плотность тока будем выбирать из условия нормального теплового режима. В случае длительной работы значение плотности тока примем равным $2,5 \text{ а/мм}^2$, при кратковременной работе — $10\text{—}15 \text{ а/мм}^2$, при работе в течение нескольких миллисекунд — 30 а/мм^2 [3]. Будем считать, что ток и поток изменяются синусоидально. Все электрические и магнитные величины выразим в практической системе единиц, причем для тока, э. д. с., магнитного сопротивления и проводимости возьмем эффективные величины, а для потока и индукции — максимальные.

Также будем считать заданными характеристику стали

$$\rho_R = f(B) \text{ или } \rho_z = f(B) \quad (1)$$

и характеристику обмоточного провода

$$f_m = f(d). \quad (2)$$

Таблица 1

Варианты	Дано	Выбираем	Определяем
1а	U (или I), P , S	i_q, H	$I, Z, d, f_m, B, \theta, W, l, R_0, X, \varphi$
1б	U (или I), P , S , δ	i_q, H	$I, Z, d, f_m, B, W, b, R_0, X, \varphi$
2а	U (или I), P , l , a	i_q, H	$I, Z, d, f_m, B, W, b, R_0, X, \varphi$
2б	U (или I), P , l , a , δ	i_q, H	$I, Z, d, f_m, B, W, b, R_0, X, \varphi$
3	U, l, S, W, H, d, δ	—	$B, \rho_R, \theta, I, i_q, P, R_{\sim}, X, Z, \varphi$
4	I, l, S, W, H, d, δ	—	$B, \rho_R, \theta, R_{\sim}, X, Z, U, P, \varphi$
5	I, L, Q, f	B	$R_0, R_{\sim}, Z, \varphi, U, P, V, S, l, q$
6	U, L, Q, f	B	$R_0, R_{\sim}, Z, \varphi, I, P, V, S, l, q$

Здесь ρ_R и ρ_z — активное и полное удельные магнитные сопротивления стали (рис. 1) [2,4], B — индукция в сердечнике, f_m — коэффициент заполнения медью окна обмотки [5], d — диаметр провода.

Для замкнутого магнитопровода намагничивающая сила катушки

$$F = IW = \Phi Z_\mu = Bl\rho_z, \quad (3)$$

где I — ток в катушке, Φ — поток в сердечнике.

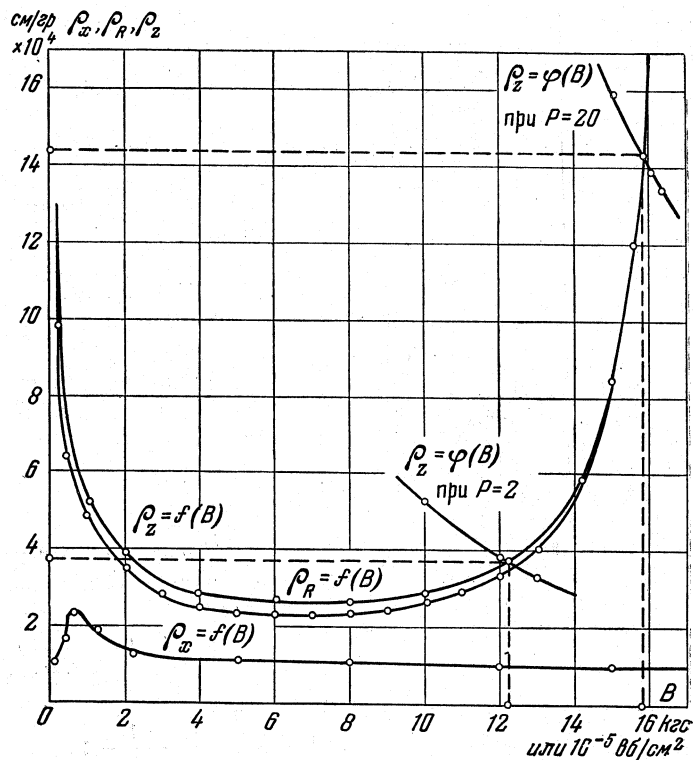


Рис. 1. Изменение удельного (эффективного) активного, реактивного и полного сопротивлений стали Э1-АА в зависимости от индукции для толщины жести 0,5 мм и $f = 50$ гц; $\rho_z = f(B)$ — магнитная характеристика материала, $\rho_z = \varphi(B)$ — магнитная характеристика проектируемой цепи

Для магнитопровода с воздушным зазором

$$F = IW = \Phi \sqrt{(R_{\mu\delta} + R_\mu)^2 + X_\mu^2} = B \sqrt{\left(\frac{\delta}{V^2 \mu_0} + \rho_R l\right)^2 + (\rho_x l)^2}, \quad (4)$$

где R_μ , X_μ , Z_μ — активное, реактивное и полное магнитные сопротивления стали, $R_{\mu\delta}$ — активное магнитное сопротивление воздушного зазора δ , ρ_x — реактивное удельное магнитное сопротивление стали (рис. 1), l — средняя длина магнитопровода, $\mu_0 = 0,4\pi 10^{-8}$.

Число витков катушки с учетом ее активного сопротивления и потерь в стали определяем по формуле, полученной автором в [6]:

$$W = \frac{U}{\sqrt{c_1^2 + c_2^2 + 2c_1c_2 \sin \theta}}, \quad (5)$$

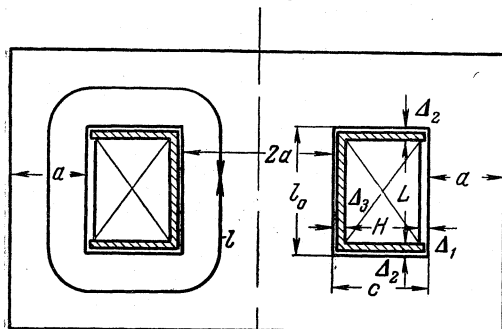
где

$$c_1 = \rho_i l_{cp}, \quad c_2 = \frac{\omega \Phi}{V^2}, \quad l_{cp} = 2(a_1 + b_1) + \pi H, \quad (6)$$

$$S = abk_3, \quad a_1 = 2(a + \Delta_3), \quad b_1 = b + 2\Delta_3. \quad (7)$$

Здесь ρ — удельное электрическое сопротивление провода, i_q — плотность тока, S — активное сечение магнитопровода, a и b — размеры магнитопровода (рис. 2), l_{cp} — средняя длина витка, k_3 — коэффициент заполнения стальной пакета магнитопровода, a_1 и b_1 — размеры каркаса.

Значение угла потерь в стали без зазора и с зазором соответственно определим из выражений



$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\rho_x}{\rho_R},$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\rho_x l}{\frac{\delta}{\sqrt{2} \mu_0} + \rho_R l}. \quad (8)$$

Если потери в стали малы ($\theta = 0$), уравнение (5) запишется в виде

$$W = \frac{U}{\sqrt{c_1^2 + c_2^2}}. \quad (9)$$

Если не учитывать активного сопротивления катушки, то

$$W = \frac{U}{c_2} = \frac{\sqrt{2} U}{\omega B S} \quad (10)$$

Среднюю длину магнитопровода можем выразить в виде

$$l = 2(c + l_0) + \pi a = 2L + \vartheta = 2IW\lambda + \vartheta, \quad (11)$$

Рис. 2. Дроссельная катушка со сталью

где

$$c = H + \Delta_1 + \Delta_3, \quad l_0 = L + 2\Delta_2, \quad \lambda = \frac{1}{i_q f_M H};$$

$$\vartheta = 2(\Delta_1 + 2\Delta_2 + \Delta_3 + H) + \pi a. \quad (12)$$

Здесь c и l_0 — ширина и высота окна магнитопровода. Размеры Δ_1 , Δ_2 , Δ_3 указаны на рис. 2. Диаметр голого провода

$$d = \sqrt{\frac{4I}{\pi i_q}}. \quad (13)$$

Сведем в табл. 1 возможные варианты исходных данных при проектировании электромагнитных устройств.

Расчет каждого варианта рассмотрим в отдельности.

Вариант 1а. Найдем связь между полным удельным магнитным сопротивлением стали проектируемой цепи ρ_z , магнитной индукцией B и другими известными электрическими и конструктивными параметрами цепи и обмотки. Решая уравнения (3), (5) и (11) относительно ρ_z , получим

$$\rho_z = \frac{-b_5 \pm \sqrt{b_5^2 + 4a_5 c_5}}{2a_5}. \quad (14)$$

Здесь

$$a_5 = B^2(m_2 + m_3 B^2), \quad b_5 = B(m_1 + m_4 B^2), \quad c_5 = P^2, \quad (15)$$

$$m_1 = 4\lambda P^2, \quad m_2 = (c_1 \vartheta)^2 - m_1 \lambda, \quad m_3 = \left(\frac{\omega S \vartheta}{\sqrt{2}}\right), \quad m_4 = \frac{2}{\sqrt{2}} c_1 \omega \vartheta^2 S \rho_x. \quad (16)$$

Ход расчета. 1. Ток в катушке и полное электрическое сопротивление определяем из формул

$$I = \frac{P}{U}, \quad Z = \frac{U}{I}. \quad (17)$$

2. Задаваясь плотностью тока i_d , по формуле (13) находим диаметр голого провода. Для соответствующего типа изоляции по кривым $f_m = f(d)$ [5] находим коэффициент заполнения меди f_m .

3. По формулам (12) и (16) определяем ϑ , λ , m_1 , m_2 , m_3 и m_4 . На графике магнитной характеристики материала $\rho_z = f(B)$ (рис. 1), задаваясь индукцией B , строим по выражению (14) кривую $\rho_z = \varphi(B)$ в том же масштабе (см. числовой пример). Точка пересечения этих характеристик и дает искомые значения B и ρ_z .

Используя выражения (3), (11) и (12), получим формулу для определения числа витков катушки:

$$W = \frac{\vartheta B \rho_z}{I(1 - 2\lambda B \rho_z)}. \quad (18)$$

Число витков также можно определить и по формуле (5).

5. По формуле (3) находим l , затем определяем $L = \frac{1}{2}(l - \vartheta)$, l_0 , c (рис. 2).

6. Активное и реактивное электрические сопротивления катушки без учета потерь в стали можно определить, пользуясь [6]:

$$R_0 = c_1 \frac{W}{I}, \quad X_0 = \frac{\omega W^2}{V \sqrt{2} R_\mu}, \quad (19)$$

где

$$R_\mu = \rho_R \frac{l}{S}. \quad (20)$$

Значение ρ_R для стали Э1-АА находим из кривой рис. 1 по уже известной индукции. Магнитные характеристики других сталей приведены в [2].

С учетом потерь в стали соответственно будем иметь

$$R = R_0 + R_\sim = R_0 + X_0 \sin \Theta \cos \Theta, \quad X = X_0 \cos^2 \Theta, \quad (21)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}. \quad (22)$$

Эта величина Z должна быть равна величине Z в уравнении (17). Угол между током и напряжением найдем из уравнения

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R_0 + R_\sim}. \quad (23)$$

Когда активное сопротивление R_0 и потери в стали малы и, следовательно, ими можно пренебречь, выражение (14) значительно упрощается:

$$\rho_z = \rho_R = \frac{V \sqrt{2} P}{(\omega \vartheta S B + 2 V \sqrt{2} \lambda P) B} = \varphi(B). \quad (24)$$

Как и в предыдущем случае, задаемся рядом значений B и строим кривую $\rho_R = \varphi(B)$. Точка пересечения ее с кривой $\rho_R = f(B)$ дает искомые значения B и ρ_R , соответствующие заданной мощности P .

Вариант 16. Расчет проведен при $R_0 = 0$ и $\Theta = 0$ (учет их приводит к уравнению высокой степени). Из выражений (3), (10) и (11) длина магнитопровода найдется в виде

$$l = \vartheta + 2\lambda I \frac{V \sqrt{2} U}{\omega S B}. \quad (25)$$

Подставляя в (4) значения W и l из выражений (10) и (25), найдем

$$\rho_R = \frac{-b_6 \pm \sqrt{b_6^2 + 4a_6c_6}}{2a_6}. \quad (26)$$

Здесь

$$a_6 = (B\xi)^2, \quad b_6 = 2SB^2R_{\mu}\xi, \quad c_6 = \left(\frac{\sqrt{2}P}{\omega SB}\right)^2, \quad (27)$$

$$\xi = \vartheta + \frac{2\sqrt{2}\lambda P}{\omega SP}. \quad (28)$$

Задаваясь B по выражению (26), строим кривую $\rho_R = \varphi(B)$. Точка пересечения ее с кривой $\rho_R = f(B)$ дает искомые значения B и ρ_R . Зная эти величины, легко определить все остальные.

Вариант 2а. Расчет по этому варианту приходится вести, когда заданы размеры пластин магнитопровода (известен штамп) и требуется определить толщину пакета.

Из уравнений (3) и (11) имеем

$$\rho_z = \frac{(l - \vartheta)}{2\lambda l} \frac{1}{B} = \varphi(B). \quad (29)$$

Аналогично предыдущему находим искомые значения B и ρ_z . По уравнению (3) определяем число витков:

$$W = \frac{lB}{I} \rho_z. \quad (30)$$

Толщину пакета определим из уравнений (5) и (6) [6]:

$$b = \frac{-b_3 \pm \sqrt{b_3^2 - 4a_3c_3}}{2a_3}. \quad (31)$$

Здесь

$$a_3 = \tau_1^2 + \tau_2^2 + 2\tau_1\tau_2 \sin \Theta, \quad b_3 = n_2(\tau_1^2 + \tau_1\tau_2 \sin \Theta), \quad (32)$$

$$c_3 = \left(\frac{n_2\tau_1}{2}\right)^2 - \left(\frac{U}{W}\right)^2, \quad (33)$$

где

$$\tau_1 = 2\rho i_q, \quad \tau_2 = n_1B, \quad n_1 = \frac{\omega a}{\sqrt{2}} k_3, \quad n_2 = \pi H + 2(a_1 + 2\Delta_3).$$

Когда потери в стали можно не учитывать ($\Theta = 0$), выражение (31) принимает вид:

$$b = \frac{\sqrt{4(U/W)^2(\tau_1^2 + \tau_2^2) - (n_2\tau_1\tau_2)^2}}{2(\tau_1^2 + \tau_2^2)}. \quad (34)$$

Если активное сопротивление катушки $R = 0$, то толщина пакета будет определяться из уравнения (31) или (10):

$$b = \frac{\sqrt{2}U}{\omega W a B k_3}. \quad (35)$$

Зная теперь активное сечение магнитопровода (7), можем подсчитать величины R_{μ} , X_0 , X , $\operatorname{tg} \varphi$.

Вариант 2б. По значению I находим d и f_m , а по уравнению (12) λ . Из (11) находим

$$W = \frac{l - \vartheta}{2\lambda I}. \quad (36)$$

Пользуясь уравнением (4), определяем связь между активным удельным сопротивлением и индукцией в виде

$$\rho_R = \frac{-b_7 \pm \sqrt{b_7^2 - 4a_7c_7}}{2a_7} = \varphi(B). \quad (37)$$

Здесь

$$a_7 = l^2, \quad b_7 = 2l \left(\frac{\delta}{\sqrt{2}\mu_0} \right), \quad c_7 = \left(\frac{\delta}{\sqrt{2}\mu_0} \right)^2 + (\rho_x l)^2 - \left(\frac{IW}{B} \right)^2. \quad (38)$$

Без учета потерь в стали выражение (37) принимает вид:

$$\rho_R = \frac{1}{l} \left(\frac{IW}{B} - \frac{\delta}{\sqrt{2}\mu_0} \right). \quad (39)$$

Аналогично предыдущему по точке пересечения характеристик $\rho_R = \varphi(B)$ и $\rho_R = f(B)$ находим искомые значения ρ_R и B . По формулам (31), (34) или (35) подсчитываем толщину пакета b , а затем определяем все другие величины (см. табл. 1).

Вариант 3. Расчет по этому варианту следует вести в том случае, когда уже готовое электромагнитное устройство (дрессель, реле и т. д.) должно работать при другом воздушном зазоре и требуется определить все электрические и магнитные параметры. Связь между ρ_R и B здесь определится из уравнений (3) — (5) в таком виде:

$$B = \frac{U}{SW \sqrt{0,5\omega^2 + \frac{k_0 Z_\mu}{W} \left(\frac{k_0 Z_\mu}{W} + \frac{2}{\sqrt{2}} \frac{\omega}{\rho_z} \rho_x \right)}}, \quad (40)$$

где

$$Z_\mu = \sqrt{\left(\rho_R \frac{l}{S} + R_{\mu\delta} \right)^2 + X_\mu^2}, \quad k_0 = \rho \frac{l_{cp}}{q}. \quad (41)$$

Задаваясь значениями ρ_R в уравнении (40), определяем значение B и строим кривую $\rho_R = \varphi(B)$. Затем известным уже способом находим искомые значения ρ_R и B .

Магнитное сопротивление Z_μ подсчитываем по (41), Θ по (8). Ток в катушке

$$I = \frac{BSZ_\mu}{W}. \quad (42)$$

Расчет при $R_0 = 0$ очень прост. Уравнение (40) принимает вид уравнения (10) ($k_0 = 0$).

Вариант 4. В этом случае связь между индукцией B и ρ_z , если воспользоваться уравнением (4), определится из (37). Определяя аналогично предыдущему значения B и ρ_R , подсчитываем все остальные величины (см. табл. 1).

Определим необходимые соотношения для расчета малоомощных дресселей (варианты 5 и 6).

Коэффициент добротности катушки со сталью

$$Q = \frac{X}{R_0 + R_\sim} = \frac{X}{R} \quad (43)$$

или

$$\frac{1}{Q} = \frac{R_0 + R_\sim}{X} = \frac{R_0}{X} + \frac{R_\sim}{X} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_m} = \frac{Q_m + Q_0}{Q_m Q_0}, \quad (44)$$

откуда

$$Q = \frac{Q_m Q_0}{Q_m + Q_0}. \quad (44)$$

Здесь добротность обмотки

$$Q_0 = \frac{X}{R_n} \quad (45)$$

и добротность магнитного материала

$$Q_m = \frac{X}{R_{\sim}} = \frac{X_0 \cos^2 \theta}{X_0 \sin \theta \cos \theta} = \frac{R_{\mu}}{X_{\mu}} = \frac{\rho_R}{\rho_x}, \quad (46)$$

$$R_0 = \rho \frac{l_{cp} W}{q}. \quad (47)$$

На основании результатов работы [6] можно получить связь объема магнитопровода (в $см^3$) с мощностью, индукцией и другими величинами в виде

$$V = \frac{V \sqrt{2} P \sin \varphi}{\omega B^2 \rho_R}. \quad (48)$$

Это уравнение учитывает активное сопротивление катушки и потери в стали. При $R_0 = 0$

$$V = \frac{V \sqrt{2} P \cos \varphi}{\omega B^2 \rho_R}. \quad (49)$$

Без учета потерь в стали

$$V = \frac{V \sqrt{2} P}{\omega B^2 \rho_R}. \quad (50)$$

Вариант 5.1. Так как потребляемая мощность должна быть небольшой, то индукцию B выбираем малой [7, 8]. По значению B из кривой рис. 1 определяем ρ_R и ρ_x , а по уравнениям (46) и (44) — Q_m и Q_0 .

Если частота отлична от 50 $гц$, то ρ_x необходимо пересчитать на заданную частоту, например, по формуле, имеющейся в [6].

2. По уравнениям (45), (46), (22) и (23) подсчитываем R_0 , R_{\sim} , Z и φ .

3. По формуле (48) находим объем стали магнитопровода, так как $P = I^2 Z$.

4. По объему V выбираем соответствующие размеры штампованной пластины. Таким образом определяем размеры магнитопровода a , b и l .

5. Пользуясь уравнениями (3), (47) и (6), подсчитываем число витков W и сечение провода q .

Вариант 6. Ход расчета тот же. Потребляемую мощность катушки находим из равенства $P = V^2/Z$.

Расчет магнитной цепи при постоянном токе

Магнитную цепь с малым зазором (рассеяние не учитывается) можно рассчитать по уравнениям (3), (4), (11)—(13). При этом надо считать, что реактивное удельное магнитное сопротивление стали $\rho_x = 0$, а активное $\rho_R = 1/\mu$, где μ — магнитная проницаемость стали [4, 6]. В качестве примера рассмотрим расчет цепи по варианту 1б (табл. 1).

Из (19) определяем число витков:

$$W = \frac{R_0 I}{\rho l_{cp} i q} = \frac{U}{\rho l_{cp} i q}.$$

По I находим d и f_m . По уравнению (11) рассчитываем l .

Из уравнения (4) находим

$$\rho_R = \frac{1}{l} \left(\frac{IW}{B} - \frac{\delta}{\mu_0} \right) = \varphi(B).$$

Как и ранее, точка пересечения кривой $\rho_R = \varphi(B)$ с магнитной характеристикой $\rho_R = 1/\mu = f(B)$ дает искомые величины B и ρ_R .

Числовой пример. Дано напряжение дросселя $U = 100$ в, потребляемая мощность $P = 2$ ватт, сечение магнитопровода $S = 1,98$ см² (рис. 3), сталь марки Э1-АА, провод обмоточной марки ПШД.

Задаемся плотностью тока $i_q = 250$ а/см² и высотой намотки $H = 10$ мм.

Выбираем расстояние между обмоткой и магнитопроводом $\Delta_1 = 1$ мм, (рис. 2), толщину стенок каркаса вместе с воздушной прослойкой между каркасом и магнитопроводом $\Delta_2 = 1,5$ мм, $\Delta_3 = 2$ мм.

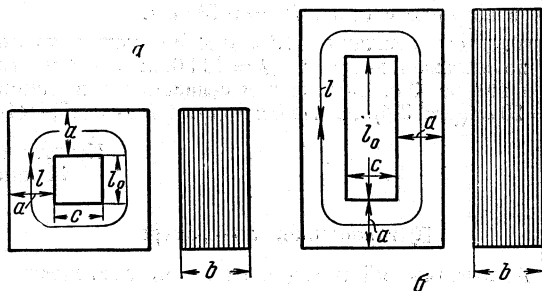


Рис. 3. Магнитная цепь при заданной мощности:

а — $P = 2$ ватт, $a = 12$, $b = 16,5$, $c = 13$, $l = 88,2$, $l_0 = 12,3$; б — $P = 20$ ватт, $a = 12$, $b = 16,5$, $c = 13$, $l = 139,5$, $l_0 = 37,9$ (размеры в мм)

Определяем длину магнитопровода l , число витков W , диаметр провода d , индукцию B , активные потери в стали и обмотке P_a , угол потерь θ , сопротивления катушки Z , R_0 , R и X , угол между током и напряжением ϕ .

Ход расчета. 1. Определяем ток и полное сопротивление катушки:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{2}{100} = 0,02 \text{ а}, \quad Z = \frac{U}{I} = \frac{100}{0,02} = 5000 \text{ ом}.$$

2. По плотности тока и току находим диаметр голого провода:

$$d = \sqrt{\frac{4I}{\pi i_q}} = \sqrt{\frac{4 \times 0,02}{\pi \times 2,5}} = 0,1 \text{ мм}.$$

Из кривой $f_m = f(d)$ [5] определяем коэффициент заполнения $f_m = 0,17$.

Подсчитаем по уравнениям (7), (6), (12) и (16) соответственно значения a_1 , b_1 , l_{cp} , c_1 , ϑ , λ , m_1 , m_2 , m_3 и m_4 : $a_1 = 1,6$ см, $b_1 = 2,05$ см, $l_{cp} = 10,44$ см, $c_1 = \rho l_{cp} i_q = 5,16 \times 10^{-3}$ в, $\vartheta = 6,97$ см, $\lambda = 2,35 \times 10^{-2}$ см/а, $m_1 = 37,6 \times 10^{-2}$ см а/д², $m_2 = -75,6 \times 10^{-4}$ см² в², $m_3 = 7,7 \times 10^6$ см⁶/сек², $m_4 = 2 \times 10^6$ асм⁵/сек².

Таблица 2

Данные кривой $\rho_z = \phi(B)$

$B \times 10^{-5}$, вб/см ²	a_b	b_b	$\rho_z \times 10^4$, см/гн	Примечание
10	6,94	39,6	5,24	$c_s = P^2 = 4$
12	14,9	48,5	3,84	
13	20,7	53,2	3,29	

Задаваясь значениями B (табл. 2), подсчитываем по уравнению (15) значения коэффициентов a_b и b_b , а затем по уравнению (14) определяем ρ_z . По данным табл. 2 строим кривую $\rho_z = \phi(B)$. Точка пересечения кривой с кривой характеристики стали Э1-АА дает индукцию $B = 12,2 \times 10^{-5}$ вб/см² и полное удельное магнитное сопротивление $\rho_z = 3,7 \times 10^3$ см/гн.

4. Число витков катушки находим по (18): $W = 1990$.

5. Намагничивающая сила катушки и средняя длина магнитопровода соответственно равны: $F = 39,8$ а, $l = 8,82$ см. Длина каркаса и размеры окна магнитопровода:

$$L = 0,93 \text{ см}, \quad l_0 = 1,23 \text{ см}, \quad c = 1,3 \text{ см}.$$

6. Активное и реактивное электрические сопротивления катушки без потерь в стали по формулам (19): $R_0 = 513 \text{ ом}$, $X_0 = 5,07 \times 10^3 \text{ ом}$.

Здесь значение $\rho_R = 3,53 \times 10^4 \text{ см/гн}$ получено из кривой рис. 1 при $B = 12,2 \times 10^{-5} \text{ вб/см}^2$.

С учетом потерь в стали сопротивления катушки будут $R = 1828 \text{ ом}$; $X = 4,7 \times 10^3$, $\text{tg } \varphi = 2,57$, откуда $\varphi = 68^\circ 45'$ [уравнения (21) и (23)].

Здесь угол потерь θ определяется из соотношения $\sin \theta = 0,27$, $\theta = 15^\circ 40'$.

Активные потери в катушке и стали $P_a = 0,732 \text{ вт}$.

Полное электрическое сопротивление $Z' \approx 5 \times 10^3$ почти точно равно сопротивлению, полученному по выражению $Z = U / I = 100 / 0,02 = 5 \times 10^3 \text{ ом}$. Эскиз магнитной системы приведен на рис. 3,а. Там же для сравнения дан эскиз магнитной системы на мощность $P = 20 \text{ ват}$ (рис. 3,б). Расчетная индукция $B = 15,8 \times 10^{-5} \text{ вб/см}^2$ (рис. 1).

Поступила в редакцию
14 января 1957 г.

Цитированная литература

1. Буль Б. К. Аналитический метод расчета индуктивности и активного сопротивления катушки электромагнитных механизмов. Автоматика и телемеханика, т. XIV, № 2, 1953.
2. Буль Б. К. Методы расчета магнитных цепей с учетом магнитного сопротивления стали. Электричество, № 11, 1952.
3. Лившиц Н. А., Спицын Д. В., Данилин А. В. Теория и расчет элементов автоматических систем. ГОИТИ, 1939.
4. Буль Б. К. Аналитическое определение магнитных сопротивлений и потерь в стали. Электричество, № 5, 1950.
5. Сютсков Б. С. Основы расчета и проектирования элементов автоматических и телемеханических устройств. Госэнергоиздат, 1953.
6. Буль Б. К. Метод расчета катушки со сталью на переменном токе. Электричество, № 8, 1954.
7. Ярославский Л. И. и Яблоновский Н. А. Многократное частотное телеграфирование. ОНТИ, 1935.
8. Цыкин Г. С. Трансформаторы низкой частоты. Связьиздат, 1950.
9. Рудкий А. И. Применение динамической кривой намагничивания для расчета реактивной катушки со сталью. Сб. научн. трудов Белорусского политехнического института, вып. 53, 1956.

CALCULATION OF MAGNETIC CIRCUIT AND A-C WINDING FOR GIVEN PARAMETERS

B. K. BOOL

(Moscow)

Summary

The considered way of calculation permits to determine electrical magnetic and design parameters of the circuit and the a-c winding. The calculation uses the non-linear magnetic characteristic and takes resistive reactance of the winding and steel losses into account. The above method is shown to be used for calculation of d-c circuits too.

The calculation of several cases with different given parameters is described. The numerical example is given.