

Практическое занятие № 4

РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ

Задание 1

Усс Л.В. Общая электротехника с основами электроники, 1990 (с.61)

3.3. РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ

В соответствии с положением (2) § 3.1 отдельные участки магнитной цепи оказывают противодействие созданию магнитного потока, т. е. обладают магнитным сопротивлением.

Какая среда оказывает большее магнитное сопротивление: а) воздух? б) ферромагнитный материал?

Магнитный поток Φ вызывает на участках магнитной цепи магнитные напряжения U_m , оказывающие противодействие потоку. По аналогии с электрическим сопротивлением (положение (2) § 2.2) магнитное сопротивление R_m численно равно магнитному напряжению, созданному магнитным потоком один вебер и оказывающему противодействие этому потоку (1). Магнитное напряжение, противодействующее Φ веберам потока:

$$U_m = \Phi R_m. \quad (3.8)$$

Эта формула отражает закон Ома для участка магнитной цепи и аналогична закону Ома для электрической цепи. Используя формулы (3.8), (3.4), (3.1), (3.7), получаем

$$R_m = l/S\mu_0, \quad (3.9)$$

где l — длина участка магнитной цепи; S — его поперечное сечение.

Выражение (3.9) аналогично формуле (2.8) для электрического сопротивления.

Так как у воздуха магнитная проницаемость равна единице, а у ферромагнитных материалов она составляет тысячи единиц, то по формуле (3.9) магнитное сопротивление воздуха значительно больше, чем у ферромагнитных материалов. Поэтому на практике в магнитных цепях стремятся избегать воздушных зазоров.

Сравним магнитный поток в сечениях S_1 и S_2 (рис. 3.10): в) $\Phi_1 > \Phi_2$? г) $\Phi_1 < \Phi_2$? д) $\Phi_1 = \Phi_2$?

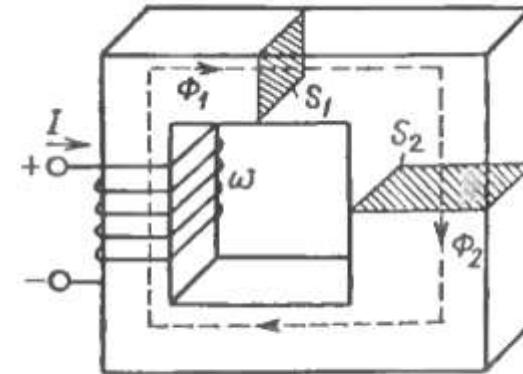


Рис. 3.10

Ввиду малого сопротивления ферромагнитных материалов в сравнении с воздухом практически весь магнитный поток замыкается по магнитной цепи. При этом магнитные линии потока непрерывны и их число одинаковое на всех участках цепи, т. е. на всех участках неразветвленной магнитной цепи магнитный поток один и тот же (2). Это положение аналогично положению (3) § 2.1 для электрического тока.

Следует ли из этого, что на всех участках магнитной цепи одинаковые напряженности поля? — е) да; ж) нет.

Обычно при расчетах неразветвленной магнитной цепи заданы геометрические размеры магнитопровода, материал его участков и магнитный поток, а задачей расчета является определение МДС (по которой затем выбирается число витков обмотки и находится значение тока в ней).

Расчет магнитной цепи начинают с определения магнитных индукций однородных (выполненных из одного материала и имеющих одинаковое сечение) участков цепи по формуле $B = \Phi/S$. Затем по кривым намагничивания (см. рис. 3.13), которые приводятся в справочниках, определяют разные по значению напряженности поля каждого участка. Напряженность в воздушном зазоре определяется по формуле (3.6): $H_0 = B_0/\mu_0$.

Далее составляют уравнение по второму закону Кирхгофа и определяют МДС F .

Какое уравнение для рис. 3.10 составлено правильно: а) $I\omega = B_1 + B_2 + \dots$? б) $I\omega = H_1l_1 + H_2l_2 + \dots$?

Замкнутый контур, ограниченный пунктирной линией, пронизывается током обмотки столько раз, сколько витков в обмотке, поэтому МДС $F = I\omega$. По второму закону Кирхгофа, эта МДС равна сумме магнитных напряжений $I\omega = H_1l_1 + H_2l_2 + \dots$

Нередко магнитные цепи бывают разветвленными.

Можно ли утверждать, что для разветвленной магнитной цепи (рис. 3.11) $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$? — к) да; л) нет.

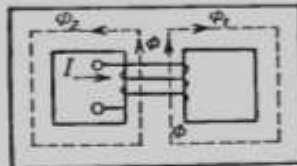


Рис. 3.11

Для разветвленной магнитной цепи справедлив первый закон Кирхгофа: *сумма магнитных потоков, направленных к узлу магнитной цепи, равна сумме потоков, направленных от узла*, что аналогично первому закону Кирхгофа для электрической цепи.

Расчет симметричных разветвленных магнитных цепей сводят к расчету одного контура в том порядке, в котором

рассчитывают неразветвленные цепи. Для этого условно разделяют разветвленную магнитную цепь на контуры так, чтобы на участках одного и того же контура магнитный поток был один и тот же.

Рассмотрим пример расчета неразветвленной магнитной цепи.

Пример 3.1. Сколько витков надо намотать на сердечник (рис. 3.12) для получения магнитного потока $47 \cdot 10^{-4}$ Вб при токе обмотки 25 А? Верхняя часть сердечника выполнена из электротехнической стали Э330, нижняя — из литой стали. Размеры сердечника даны в сантиметрах.

Решение. Определяем длины и площади поперечных сечений однородных участков магнитной цепи: $l_1 = 56$ см; $S_1 = 36$ см² = $36 \cdot 10^{-4}$ м²; $l_2 = 17$ см; $S_2 = 36 \cdot 10^{-4}$ м²; $l_0 = 0,5$ см; $S_0 = 36 \cdot 10^{-4}$ м².

Магнитные индукции участков: $B_1 = B_2 = B_0 = \Phi/S = 47 \times 10^{-4} / (36 \cdot 10^{-4}) = 1,3$ Тл.

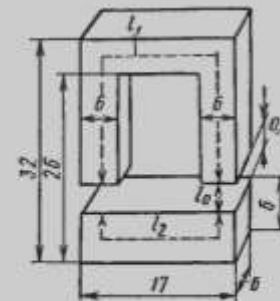


Рис. 3.12

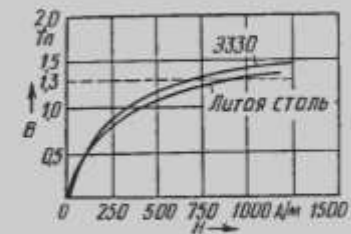


Рис. 3.13

По кривой намагничивания для стали Э330 (рис. 3.13) индукции 1,3 Тл соответствует напряженность поля $H_1 = 750$ А/м.

Магнитное напряжение на участке l_1

$$U_{m1} = 750 \cdot 0,56 = 420 \text{ А.}$$

Напряженность для участка l_2 (рис. 3.13) $H_2 = 1250$ А/м, а магнитное напряжение

$$U_{m2} = 1250 \cdot 0,17 = 212,5 \text{ А.}$$

Напряженность поля в воздушном зазоре

$$H_0 = B/\mu_0 = 1,3 / (4\pi \cdot 10^{-7}) = 1,04 \cdot 10^6 \text{ А/м.}$$

Магнитное напряжение в воздушном зазоре

$$U_{m0} = 1,04 \cdot 10^6 \cdot 0,005 = 5200 \text{ А.}$$

Намагничивающая сила

$$F = U_{m1} + U_{m2} + 2U_{m0} = 420 + 212,5 + 2 \cdot 5200 \approx 11\,032 \text{ А.}$$

Задание 2

!!!Герасимов В.Г. (ред) - Сборник задач по электротехнике и основам электроники (1987)

ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНА ПОЛНОГО ТОКА ДЛЯ АНАЛИЗА МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ. ВЛИЯНИЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛЮВ

7.1. На кольцевой замкнутый сердечник (рис. 7.1) равномерно нанесена обмотка с числом витков $w = 200$. Поперечное сечение кольца прямоугольное. Наружный диаметр кольца $D = 16$ см, внутренний диаметр $d = 10$ см, толщина $b = 4$ см. Определить ток в обмотке катушки, при котором магнитный поток в сердечнике $\Phi = 12 \cdot 10^{-4}$ Вб, если материал сердечника: а) дерево; б) литая сталь; в) листовая электротехническая сталь 1512.

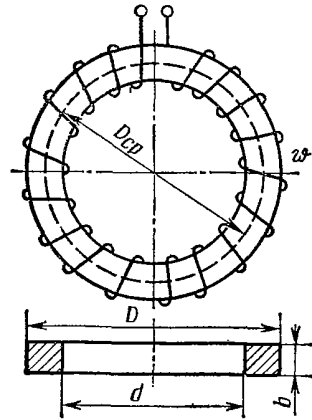


Рис. 7.1

Решение. Магнитная индукция в сердечнике из дерева и литой стали

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{\Phi}{\frac{D-d}{2}b} = \frac{12 \cdot 10^{-4}}{\frac{16-10}{2} \cdot 4 \cdot 10^{-4}} = 1 \text{ Тл.}$$

Магнитная индукция в сердечнике из листовой электротехнической стали 1512 (с учетом коэффициента заполнения стали $k_{з.с} = 0,9$)

$$B' = \frac{\Phi}{k_{з.с} S} = 1,11 \text{ Тл.}$$

а) Напряженность магнитного поля в сердечнике из дерева

$$H_0 = \frac{B}{\mu_0} = \frac{1 \text{ Тл}}{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}} = 8 \cdot 10^5 \text{ А/м.}$$

Ток в обмотке находим из уравнения $H = wI/l_{ср}$:

$$I = \frac{l_{ср} H_0}{w} = \frac{40,8 \cdot 10^{-2} \cdot 8 \cdot 10^5}{200} = 1632 \text{ А,}$$

где

$$l_{ср} = \pi D_{ср} = \pi \frac{D+d}{2} = 40,8 \text{ см.}$$

Обычно для катушек кольцевых сердечников плотность тока в обмотке с лаковой или хлопчатобумажной изоляцией допускается

не выше $J = 3 \text{ А/мм}^2$, поэтому для данного тока потребовался бы провод с лаковой изоляцией сечением $Q = I/J = 1632/3 = 544 \text{ мм}^2$.

В этом случае площадь окна катушки S_m при $w = 200$ должна быть равна (без учета коэффициента заполнения меди $k_{з.м}$)

$$S_m = 544 \cdot 10^{-2} \cdot 200 = 1088 \text{ см}^2.$$

Для данного размера сердечника площадь окна катушки (без учета $k_{з.м}$) составляет

$$S_m = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 10^2}{4} = 78,5 \text{ см}^2.$$

Следовательно, в этом сердечнике заданный поток получить невозможно.

б) Напряженность магнитного поля в сердечнике из литой стали определяется по кривой намагничивания (см. Приложение 7.1 в конце главы): при $B = 1 \text{ Тл}$, $H_c = 750 \text{ А/м}$ и ток в обмотке $I = 1,53 \text{ А}$.

в) Аналогично, для сердечника из стали 1512 при $B = 1,11 \text{ Тл}$, $H_c = 570 \text{ А/м}$ и ток в обмотке $I = 1,16 \text{ А}$.

Сопоставляя полученные результаты, видим, что один и тот же магнитный поток Φ можно получить при меньших магнитодвижущих силах, если материал сердечника легче намагничивается.

7.2. Определить относительные магнитные проницаемости и магнитные сопротивления ферромагнитных сердечников задачи 7.1 и индуктивности их катушек.

Указание и ответ. Значения заданных величин можно подсчитать, пользуясь следующими соотношениями:

для относительной магнитной проницаемости

$$\mu_r = \frac{B \text{ (Тл)}}{\mu_0 \text{ (Гн/м)} H \text{ (А/м)}};$$

для магнитного сопротивления магнитопровода

$$R_m = \frac{wl \text{ (А)}}{\Phi \text{ (Вб)}} = \frac{l \text{ (м)}}{\mu_0 \text{ (Гн/м)} \mu_r S \text{ (м}^2\text{)}}, \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{с}};$$

для индуктивности катушки

$$L = w\Phi/I = \mu_0 \mu_r w^2 S/l = w^2/R_m, \text{ Гн.}$$

Результаты вычислений приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Материал сердечника	Ток I , А	Индуктивность L , мГн	Относительная магнитная проницаемость μ_r	Магнитное сопротивление R_m , 1/(Ом·с)
Литая сталь	1,53	157	1065	$2,55 \cdot 10^5$
Сталь 1512	1,16	207	1560	$1,93 \cdot 10^5$

7.3. Как изменится индуктивность катушки в задаче 7.1, у которой материал сердечника выполнен из стали 1512, если ток в обмотке ($I = 1,16 \text{ А}$) увеличить в два раза?

Ответ: индуктивность катушки уменьшится и будет равной $L = 129 \text{ мГн}$, так как материал сердечника при заданном увеличении тока находится в состоянии насыщения, а относительная магнитная проницаемость уменьшается (см. задачу 7.2).

Вопрос. Как изменится магнитный поток катушки, если при той же магнитодвижущей силе (м.д.с.) удалить сердечник?

Ответ: уменьшится.

Вопрос. Как изменится в этом случае индуктивность катушки?

Ответ: уменьшится.

7.4. Кольцевой сердечник с числом витков $w = 128$ можно выполнить из стали 3411 или пермаллоя 79НМ (см. Приложение 7.1). Длина средней линии сердечника $l_{\text{ср}} = 12,8 \text{ см}$, сечение стали (с учетом $k_{\text{с.с.}}$) $S_{\text{с}} = 1,37 \text{ см}^2$. В каком из сердечников можно получить больший магнитный поток при двух значениях тока в обмотках: 0,01 и 0,4 А? Чему равны эти потоки?

Ответ: в первом случае (при токе $I = 0,01 \text{ А}$) напряженность магнитного поля в обоих сердечниках $H = 0,1 \text{ А/см}$, а потоки $\Phi_1 = 27,4 \cdot 10^{-6} \text{ Вб}$ (в стали) и $\Phi_2 = 76,3 \cdot 10^{-6} \text{ Вб}$ (в пермаллоев.) Во втором случае $H = 4 \text{ А/см}$, $\Phi_1 = 198 \cdot 10^{-6} \text{ Вб}$ и $\Phi_2 = 117,8 \cdot 10^{-6} \text{ Вб}$. Пермаллой предпочтительнее применять при малых напряженностях магнитного поля ($H < 1 \text{ А/см}$).

7.5. Определить магнитный поток в сердечнике и индуктивность катушки с числом витков $w = 100$. Кольцевой сердечник катушки выполнен из электротехнической стали 1512 (см. Приложение 7.1) с внешним диаметром $D = 28 \text{ мм}$, внутренним диаметром $d = 20 \text{ мм}$ и толщиной $b = 5 \text{ мм}$. Ток в обмотке $I = 0,09 \text{ А}$ (при $k_{\text{с.с.}} \approx 1$).

Ответ: $\Phi = 9,8 \cdot 10^{-6} \text{ Вб}$; $L = 1,09 \cdot 10^{-2} \text{ Гн}$.

7.6. Индуктивность катушки со стальным сердечником можно регулировать, изменяя значение тока в обмотке. Определить индуктивности катушки в задаче 7.5, если ток в обмотке увеличить: а) в два раза; б) в пять раз.

Ответ: а) $L = 0,845 \cdot 10^{-2} \text{ Гн}$; б) $L = 0,49 \cdot 10^{-2} \text{ Гн}$. Из-за нелинейности кривой намагничивания стали отсутствует пропорциональность между изменениями тока и индуктивности катушки.

МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ С ЗАЗОРОМ В МАГНИТОПРОВОДЕ.

СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ.

АНАЛОГИЯ МЕТОДОВ АНАЛИЗА

ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ

7.7. В сердечнике из литой стали (рис. 7.7) необходимо создать магнитную индукцию $B = 1 \text{ Тл}$. Число витков равномерно намотанной на сердечник обмотки $w = 200$, длина средней линии сердечника $l_{\text{ср}} = 69 \text{ см}$, сечение $S = 6 \text{ см}^2$. Как изменятся ток и магнитное сопротивление магнитопровода, если в сердечнике сделать воздушный зазор $\delta = 0,5 \text{ мм}$? Магнитный поток сердечника должен остаться без

изменения. При расчете рассеянием пренебречь и считать поле в воздушном зазоре однородным.

Решение. Пренебрегая потоком рассеяния, считаем, что магнитная индукция в воздушном зазоре и в стали одинакова: $B_0 = B_{\text{с}} = 1 \text{ Тл}$.

Напряженность магнитного поля в воздушном зазоре

$$H_0 = B_0 / \mu_0 = 8 \cdot 10^5 B_0 = 8 \cdot 10^5 \cdot 1,0 = 800 \cdot 10^3 \text{ А/м.}$$

Напряженность поля в сердечнике для $B = 1 \text{ Тл}$ по кривой намагничивания литой стали (см. Приложение 7.1) равна $H_{\text{с}} = 750 \text{ А/м}$.

Магнитодвижущая сила обмотки: при отсутствии в сердечнике воздушного зазора

$$\omega I_1 = l_{\text{ср}} H_{\text{с}} = 0,69 \cdot 750 = 517,5 \text{ А;}$$

при наличии в сердечнике воздушного зазора

$$\omega I_2 = l_{\text{ср}} H_{\text{с}} + \delta H_0 = 517,5 + 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 800 \cdot 10^3 = 917,5 \text{ А.}$$

Токи в обмотке

$$I_1 = \frac{\omega I_1}{w} = \frac{517,5}{200} = 2,58 \text{ А, } I_2 = \frac{\omega I_2}{w} = \frac{917,5}{200} = 4,58 \text{ А.}$$

Ток нужно увеличить на $\Delta I = 4,58 - 2,58 = 2 \text{ А}$, т. е. почти в два раза.

Магнитное сопротивление магнитопровода

$$R_{\text{м.с}} = \frac{l_{\text{ср}}}{\mu_0 \mu_r S} = \frac{l_{\text{ср}}}{BS} = 8,65 \cdot 10^5 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{с}};$$

магнитное сопротивление воздушного зазора

$$R_{\delta} = \frac{\delta}{\mu_0 S} = \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 6 \cdot 10^{-4}} = 6,63 \cdot 10^5 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{с}};$$

магнитное сопротивление магнитопровода с воздушным зазором

$$R_{\text{м}} = R_{\text{м.с}} + R_{\delta} = (8,65 + 6,63) \cdot 10^5 = 15,3 \cdot 10^5 \text{ 1/(\text{Ом} \cdot \text{с})}.$$

Этот же результат можно получить из соотношения

$$R_{\text{м}} = \omega I_2 / \Phi = \omega I_2 / (BS) = 917,5 / (1 \cdot 6 \cdot 10^{-4}) = 15,3 \cdot 10^5 \text{ 1/(\text{Ом} \cdot \text{с})}.$$

7.8. В воздушном зазоре магнитопровода катушки (рис. 7.8), набранного из пластин стали 1212, требуется получить индукцию $B_0 = 1 \text{ Тл}$. Определить ток в катушке с числом витков $w = 500$, если воздушный зазор равен: а) $\delta = 0,55 \text{ мм}$; б) $\delta = 2 \text{ мм}$. Как изменится индуктивность катушки с увеличением воздушного зазора, если магнитная индукция в зазоре должна оставаться при этом неиз-

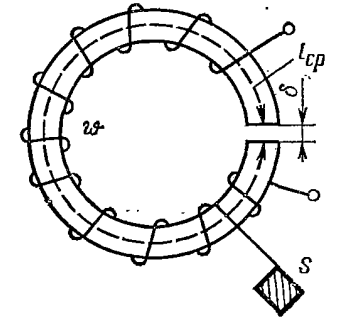


Рис. 7.7

менной? При расчете потоком рассеяния пренебречь. Коэффициент заполнения стали $k_{з.с} = 0,95$. Размеры даны в миллиметрах.

Ответ: а) $I = 1,78$ А; $L = 0,067$ Гн; б) $I = 4,10$ А; $L = 0,029$ Гн.

Индуктивность катушки с увеличением воздушного зазора уменьшается.

Вопрос. Как изменится мощность катушки в рассмотренных случаях?

Ответ: с увеличением зазора мощность катушки возрастает.

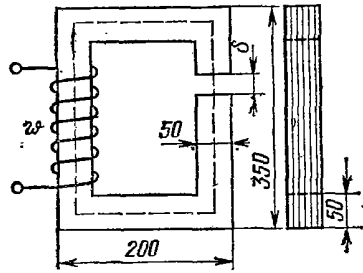


Рис. 7.8

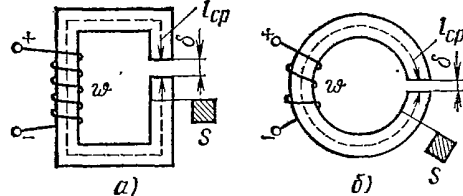


Рис. 7.9

7.9*. Определить ток в обмотке катушки с незамкнутым магнитопроводом (рис. 7.9, а, б), если заданы средняя длина l_{cp} и поперечное сечение сердечника S , длина воздушного зазора δ , число витков обмотки ω и магнитный поток в зазоре Φ_0 (табл. 7.9 а). При расчете полем рассеяния пренебречь, магнитное поле в зазоре считать равномерным. Сечение магнитопровода задано в $см^2$; средняя длина магнитопровода и длина воздушного зазора — в см, поток — в Вб.

Таблица 7.9 а

Вариант	l_{cp}	S	δ	ω	$\Phi_0 \cdot 10^{-4}$	Материал	Рис. 7.9
1	100	4	0,02	500	4	Листовая эл.техн. горячекатаная сталь	а
2	70	4	0,05	500	4	То же	а
3	86	25	0,1	400	30	»	б
4	86	25	0,1	400	30	Никелевый пермаллой 50 НП	б

Магнитные характеристики материалов заданы табл. 7.9 б.

Таблица 7.9 б

B , Тл	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	Материал
H , А/м	0	40	95	160	270	435	850	1512
	0	55	135	220	335	500	875	1212
	0	20	65	120	185	300	550	1410
	0	12	18	27	40	60	130	50 НП

Ответ: 1,19 А; 1,5 А; 3,60 А; 2,68 А.

7.10. Катушка с кольцевым сердечником, содержащим переменный воздушный зазор, подключена к сети постоянного тока напряжением $U = 12$ В. Обмотка катушки имеет сопротивление $R = 12$ Ом и число витков $\omega = 1000$. Сердечник выполнен из стали 1512 и имеет внешний диаметр $D = 22$ см, внутренний диаметр $d = 18$ см, толщину пакета $b = 1$ см, коэффициент заполнения стали $k_{з.с} \approx 1$. Определить магнитный поток и индуктивность катушки, если воздушный зазор сердечника $\delta_1 = 0,01$ см, и начертить схему замещения магнитной цепи.

Решение. Магнитодвижущая сила для заданного сердечника определяется уравнением $\omega I = I_c H_c + \delta H_b$, которое можно решить графическими методами: 1) построением суммарной вебер-амперной характеристики; 2) пересечением вебер-амперных характеристик (аналогично методам решения уравнений нелинейных электрических цепей постоянного тока). Рассмотрим оба метода решения.

1) Задаваясь произвольно несколькими значениями потока Φ в сердечнике и зная поперечное сечение сердечника $S = \frac{D+d}{2} b = 2$ $см^2$, вычисляем индукцию B для каждого из принятых потоков. Затем по кривой намагничивания (см. приложение 7.1) находим соответствующие значения H_c и вычисляем $I_c H_c$, где длина магнитной линии по стали $l_c = \pi \frac{D+d}{2} = 62,8$ см.

Полученные результаты расчетов сведены в табл. 7.10.

Таблица 7.10

$\Phi \cdot 10^{-4}$, Вб	0,84	1,0	1,5	2	2,2	2,4	2,48	2,68
B , Тл	0,42	0,5	0,75	1	1,1	1,2	1,24	1,34
H_c , А/м	100	125	240	440	575	850	1000	1650
$I_c H_c$, А	62,8	78,4	151	276	361	534	628	1035

На основании данных таблицы и схемы замещения рис. 7.10, а строим вебер-амперную характеристику $\Phi(I_c H_c)$ (рис. 7.10, б). Далее по одной точке строим на рис. 7.10, б вебер-амперную характеристику воздушного зазора $\Phi(\delta H_b)$; например, для $B = 0,5$ Тл и

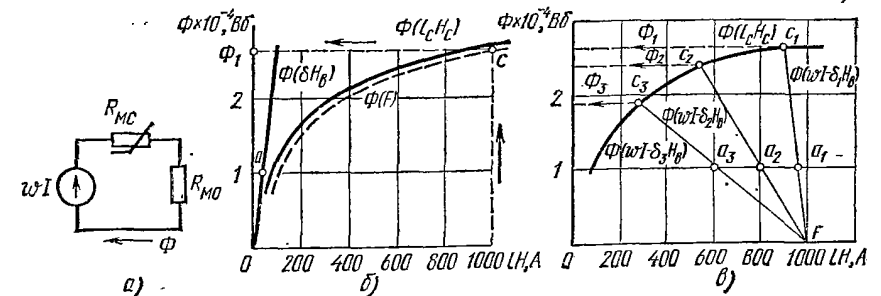


Рис. 7.10

$\delta_1 = 0,01$ см находим $\Phi_1 = BS = 1 \cdot 10^{-4}$ Вб, H_B (А/м) = $8 \cdot 10^5$ В (Тл) = $8 \cdot 10^5 \cdot 0,5 = 4 \cdot 10^5$ А/м и $H_B \delta = 40$ А. Откладываем на графике точку a с координатами $\Phi_1 = 1 \cdot 10^{-4}$ Вб и $IH = 40$ А. Проводим через начало координат и точку a искомую прямую $\Phi(\delta H_B)$. Затем в соответствии со схемой замещения рис. 7.10, a производим сложение абсцисс кривых $\Phi(l_c H_c)$, $\Phi(\delta H_B)$ и получаем суммарную кривую $\Phi(F)$, где $F = IH$ — м.д.с.

Заданная м.д.с. $F = \omega I = \omega \frac{U}{R} = 1000 \frac{12}{12} 1000$ А, откладываем это значение F на оси абсцисс, восстанавливаем перпендикуляр до пересечения в кривой $\Phi(F)$ в точке c . От этой точки проводим горизонтальную линию до пересечения с осью ординат. Получаем искомое значение магнитного потока $\Phi_1 = 2,62 \cdot 10^{-4}$ Вб.

2) В соответствии со вторым методом на графике с построенной вебер-амперной характеристикой $\Phi(l_c H_c)$ по двум точкам строим прямую $\Phi(\omega I - \delta_1 H_B)$, соответствующую заданному воздушному зазору δ_1 (рис. 7.10, b). Для этого нужно предварительно определить напряженность поля H_B для одного из значений индукции (или магнитного потока). Определим, например, H_B для индукции $B = 0,5$ Тл (что соответствует магнитному потоку $\Phi = 1 \cdot 10^{-4}$ Вб): H_B (А/м) = $8 \cdot 10^5 \cdot B$ (Тл) = $4 \cdot 10^5$ А/м.

Тогда

$$\delta H_B = 40 \text{ А}, \quad \omega I - \delta_1 H_B = 960 \text{ А}.$$

Находим на графике рис. 7.10, b точку a_1 с ординатой $\Phi = 1 \cdot 10^{-4}$ Вб, абсциссой $IH = 960$ А и проводим через нее и точку F прямую. Точка c_1 пересечения кривой $\Phi(l_c H_c)$ и прямой $\Phi(\omega I - \delta_1 H_B)$ определяет искомое значение потока $\Phi_1 = 2,62 \cdot 10^{-4}$ Вб.

Индуктивность катушки

$$L = \omega \Phi_1 / I = 262 \text{ мГн}.$$

7.11. Как изменятся магнитный поток и индуктивность катушки в задаче 7.10, если воздушный зазор в сердечнике увеличить до $\delta_2 = 0,05$ см и $\delta_3 = 0,1$ см?

Ответ: потоки и индуктивности соответственно уменьшатся и будут равны $\Phi_2 = 2,40 \cdot 10^{-4}$ Вб (точка c_2 на рис. 7.10, b); $\Phi_3 = 1,88 \cdot 10^{-4}$ Вб (точка c_3 на рис. 7.10, b), $L_2 = 240$ мГн и $L_3 = 188$ мГн.

7.12. Незамкнутый магнитопровод катушки состоит из двух различных по сечению участков 1 и 2 (рис. 7.12). Определить ток в обмотке катушки, если магнитная индукция в зазоре $B_0 = 1$ Тл, длина участка с сечением $S_1 = 1 \text{ см}^2$ $l_1 = 4$ см, длина участка с сечением $S_2 = 0,5 \text{ см}^2$ $l_2 = 7$ см, воздушный зазор $\delta = 0,01$ мм.

Число витков обмотки $\omega = 100$. Материал магнитопровода — сталь 1512. При расчете рассеянием пренебречь и магнитное поле в зазоре считать равномерным.

Ответ: $I = 1,15$ А.

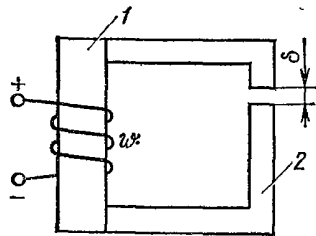


Рис. 7.12

Вопрос. Как изменится ток в обмотке катушки, если при неизменном значении магнитной индукции в зазоре $B_0 = 1$ Тл сечение первого участка S_1 изменить и сделать равным S_2 ?

Ответ: ток увеличится, $I = 1,27$ А.

7.13. Ш-образный магнитопровод выполнен из пластин стали 1212. На рис. 7.13 указаны размеры: $a = 16$ мм, $b = 20$ мм, $c = 16$ мм, $h = 40$ мм, $\delta = 0,5$ мм. Определить магнитодвижущую силу катушки, если индукция в воздушном зазоре $B_0 = 1,25$ Тл. При расчете потоком рассеяния пренебречь. Коэффициент заполнения стали принять равным $k_{a,c} = 0,9$.

Ответ: $\omega I = F = 1128$ А.

Ввиду полной симметрии разветвленной магнитной цепи относительно вертикальной оси AA , проходящей через середину магнитопровода, магнитный поток, создаваемый катушкой, разветвляется на два равных потока. Следовательно, расчет этой цепи можно вести по одной ее половине.

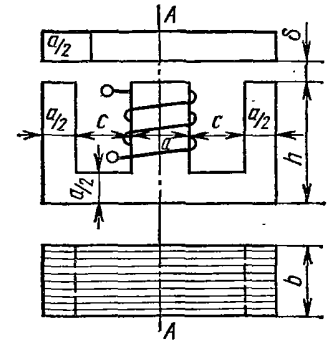


Рис. 7.13

7.14. Магнитопровод, показанный на рис. 7.14, a , выполнен из стали 1212. Какой ток нужно установить в намагничивающих катушках с числом витков 260 у каждой, чтобы создать в воздушном

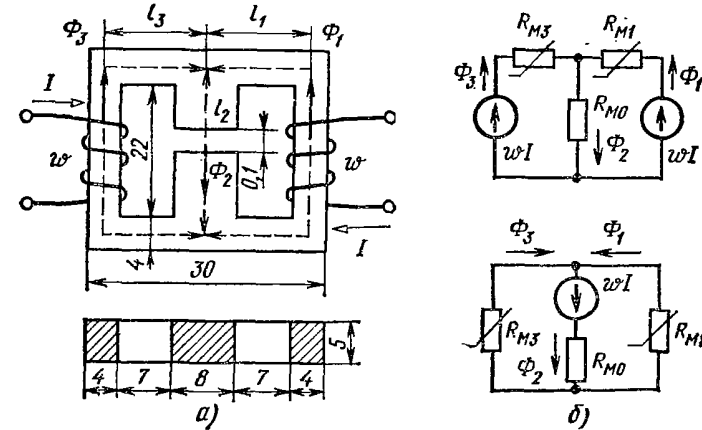


Рис. 7.14

зазоре магнитный поток $\Phi = 32,4 \cdot 10^{-4}$ Вб? При расчете потоками рассеяния пренебречь. Размеры сердечника (в сантиметрах) и направления токов в обмотках указаны на рисунке, коэффициент заполнения стали $k_{a,c} = 0,9$. Какой ток нужно иметь в катушке для сохранения того же потока в воздушном зазоре, если из двух катушек оставить одну и поместить ее на среднем стержне? Составить схемы замещения магнитной цепи для обоих случаев.

Ответ: в обоих случаях размещения катушек $I = 3,94$ А. Аналоговые схемы показаны на рис. 7.14, б.

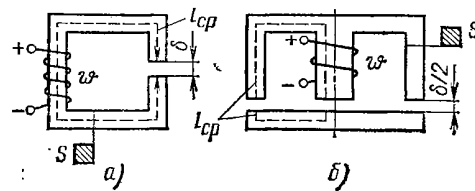


Рис. 7.15

7.15*. Определить магнитный поток в воздушном зазоре катушки с незамкнутым магнитопроводом (рис. 7.15), если заданы средняя длина l_{cp} и сечение S магнитопровода, длина воздушного зазора δ , ток в обмотке I , число витков w и материал сердечника (см. табл. 7.15).

Поле рассеяния пренебречь, поле воздушного зазора считать равномерным. Размеры заданы в сантиметрах, ток — в амперах. Задачу решить графически. Магнитные характеристики заданы табл. 7.9 (см. задачу 7.9).

Таблица 7.15

Вариант	l_{cp}	S	δ	w	I	Материал	Рис. 7.15
1	100	5	0,1875	500	3	1512	а
2	50	4	0,15	500	2	1212	а
3	20	1	0,0125	54	0,28	50НП	б
4	100	5	0,15	500	2	1411	б

Ответ: $4,15 \cdot 10^{-4}$ Вб;
 $2,95 \cdot 10^{-4}$ Вб; $0,26 \cdot 10^{-4}$ Вб;
 $3,5 \cdot 10^{-4}$ Вб.

7.16. На рис. 7.16, а приведен упрощенный эскиз магнитной цепи двухполюсной машины постоянного тока. Построить график зависимости магнитного потока Φ_0 в зазоре δ под полюсом машины от тока возбуждения I_B в обмотках полюсов: $\Phi_0(I_B)$. Индукция в зазоре $B_0 = 0,2 \div 0,8$ Тл, остаточный поток $\Phi_{ост} = 2 \cdot 10^{-4}$ Вб. Число витков обеих обмоток $w = 1900$. Статор 1 выполнен из электротехнической стали 1512, поперечное сечение $S_{ст} = 20$ см², длина магнитной линии по статору $l_{ст} = 22$ см. Якорь 2 и полюсы 3 выполнены из той же стали и име-

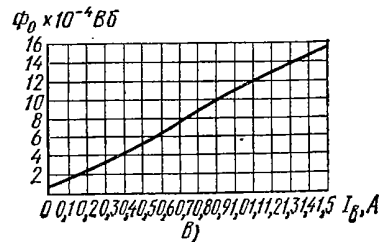
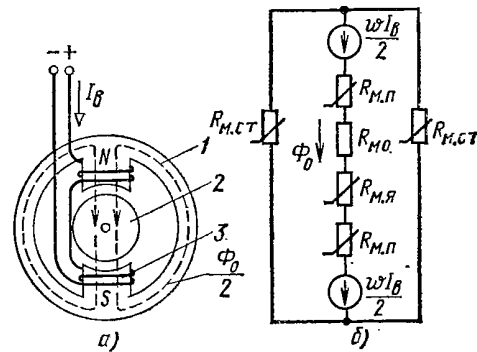


Рис. 7.16