

ГЛАВА 1. НАГРЕВАНИЕ И ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

1.1. Простейшие методы расчета нагрева и охлаждения электрических аппаратов и их частей

В данном параграфе приведены задачи по определению мощности источников теплоты: джоулева тепла, потерь от поверхностного эффекта, эффекта близости, тепловыделения в ферромагнитных нетоковедущих частях, находящихся в переменном магнитном поле, а также те задачи по расчету теплоотдачи с поверхностей нагретых тел, для решения которых необходимо использовать формулу Ньютона и эмпирические формулы коэффициентов теплоотдачи для простейших, наиболее распространенных в электрических аппаратах поверхностей охлаждения. При этом используются следующие расчетные формулы и соотношения.

Количество теплоты, выделяемое в неоднородном проводнике объемом V за отрезок времени $\Delta t = t_2 - t_1$ при неравномерном распределении плотности тока j в нем, равно

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \int_V j^2 \rho_0 (1 + \alpha \vartheta) dV dt, \quad (1.1)$$

где ρ_0 , α - удельное сопротивление, Ом·м, и температурный коэффициент сопротивления, $1/^\circ\text{C}$, материала проводника при 0°C соответственно; ϑ - температура проводника, $^\circ\text{C}$.

Мощность источников теплоты для однородных проводников при переменном токе можно определить по упрощенной формуле

$$P_{\sim} = k_n k_\delta j^2 \rho_0 (1 + \alpha \vartheta) l / S, \quad (1.2)$$

где k_n и k_δ - соответственно коэффициенты поверхностного эффекта и эффекта близости, которые для неферромагнитных проводников определяют по графикам, приведенным в приложении (см. рис. П.1- П.5); l и S - длина, м, и площадь поперечного сечения, м^2 , проводника соответственно.

Для проводников из ферромагнитного материала

$$k_n = S / (\Pi z_a), \quad (1.3)$$

где S , Π - площадь, м^2 , и периметр поперечного сечения, м, проводника соответственно; z_a - глубина проникновения электромагнитной волны, м

$$z_a = \sqrt{\rho / (\omega \mu_0 \mu_r)} \text{ если } H > H_{\mu_r \text{ макс}}; \quad (1.4)$$

$$z_a = \sqrt{2\rho / (\omega \mu_0 \mu_r)}, \text{ если } H \leq H_{\mu_r \text{ макс}}, \quad (1.5)$$

где ω - угловая частота переменного поля; μ_0 - магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м); μ_r - относительная магнитная проницаемость; H - напряженность магнитного поля, Гн/м; H_{μ_r}

$\mu_{\text{макс}}$ - амплитуда первой гармоники напряженности магнитного поля, Гн/м, соответствующая максимуму μ_r на кривой намагничивания материала [1].

4

Для упрощенных расчетов мощность источников теплоты в ферромагнитных проводниках при переменном токе определяют по формуле [1]

$$P = (2,9 \dots 3,25) 10^{-4} \left(\frac{I}{\Pi} \right)^{5/3} F \sqrt{f}, \quad (1.6)$$

где F и Π - соответственно боковая поверхность, м^2 , и периметр поперечного сечения, м, проводника; f - частота переменного тока, Гц.

Мощность источников теплоты в ферромагнитных нетоковедущих частях, находящихся в переменном магнитном поле, определяют:

- для замкнутого сплошного магнитопровода, на котором надета катушка,

$$P = (2,9 \dots 3,25) 10^{-4} (IN/l_{\text{ср}})^{5/3} F \sqrt{f}, \quad (1.7)$$

где IN - магнитодвижущая сила катушки, А; $l_{\text{ср}}$ - длина средней магнитной силовой линии, м; F - боковая поверхность магнитопровода, м^2 .

Для практических расчетов рекомендуется принимать среднее значение числового коэффициента:

- для замкнутого шихтованного магнитопровода

$$P = p_{\text{уд}} m, \quad (1.8)$$

где $p_{\text{уд}}$ - удельные потери, определяемые по графикам приложения (см. рис. П.6 и П.7); m - масса магнитопровода;

- для ферромагнитного кольца, охватывающего проводник с током I ,

$$P = (2,9 \dots 3,25) 10^{-4} (I/l_{\text{ср}})^{5/3} F \sqrt{f}, \quad (1.9)$$

где $l_{\text{ср}}$ - длина средней магнитной силовой линии, м; F - поверхность кольца, м^2 ;

- для единицы длины ферромагнитной полосы (балки), расположенной перпендикулярно проводнику с током I [2],

$$P = \frac{I^2 \Pi \rho \cos^4 \alpha}{4 z_a \pi^2 d^2}, \quad (1.10)$$

где α - угол между вектором напряженности магнитного поля в данной точке и его составляющей вдоль продольной оси полосы; Π - периметр поперечного сечения, м; ρ - удельное сопротивление материала полосы, Ом·м; a - минимальное расстояние между осями проводника с током I и полосы, м.

Мощность источников теплоты в электрической изоляции, находящейся в переменном электрическом поле [1],

$$P = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta, \quad (1.11)$$

где ω - угловая частота переменного поля; C - электрическая емкость изолятора, Ф; U - напряжение, приложенное к изолятору, В; $\operatorname{tg} \delta$ - тангенс угла диэлектрических потерь.

Количество теплоты, которое отводится с поверхности электрического аппарата в окружающую среду в стационарном режиме, можно определить по формуле Ньютона

$$P = k_r F (\vartheta - \vartheta_0), \quad (1.12)$$

где k_r - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К), F - охлаждающая поверхность, м²; ϑ и ϑ_0 - температуры поверхности и окружающей среды соответственно, °С.

Для приближенных расчетов коэффициент теплоотдачи определяют по эмпирическим формулам [1]:

- для окрашенной краской прямоугольной шины с размерами поперечного сечения 120×10 мм, находящейся в спокойном воздухе, большая сторона сечения которой расположена вертикально

$$k_r = 9,2 (1 + 0,9 \cdot 10^{-2} \Theta), \quad (1.13)$$

где $\Theta = \vartheta - \vartheta_0$ - перепад температур;

5

- для горизонтальных цилиндрических проводников, окрашенных краской и расположенных горизонтально в спокойном воздухе,

$$k_r = 10k_1 (1 + k_2 \cdot 10^{-2} \Theta), \quad (1.14)$$

где k_1 и k_2 определяют из табл. 1.1;

Т а б л и ц а 1 . 1

Диаметр проводника, мм	0,3	10	40	80	200
k_1 , Вт/(м ² ·К)	4,5	2,24	1,11	1,08	1,02
k_2 , К ⁻¹	1,7	1,14	0,88	0,75	0,68

- для круглой трубы диаметром d , внутри которой протекает вода со скоростью w [2],

$$k_r = 1710 w^{0,8} d^{0,2} (22 - \Theta)^{0,4}, \quad (1.15)$$

- для цилиндрических катушек в случае, когда охлаждающая поверхность $10^{-4} < F < 10^{-2}$ м²,

$$k_r = 2,1 [1 + 0,005 (\vartheta - \vartheta_0)] / \sqrt[3]{F}; \quad (1.16)$$

- для цилиндрических катушек, охлаждающая поверхность которых $10^{-2} < F < 0,5 \text{ м}^2$,

$$k_r = 3,6 [1 + 0,005 (\vartheta - \vartheta_0)] / \sqrt[5]{F}. \quad (1.17)$$

1.1.1. Определить коэффициент поверхностного эффекта для алюминиевого шинпровода, нагретого протекающим по нему переменным током промышленной частоты до температуры $\vartheta = 95^\circ\text{C}$, для следующих случаев: а) шинпровод круглый $d = 80$ мм; б) шинпровод трубчатый с наружным диаметром $d_{\text{нар}} = 80$ мм и с внутренним диаметром $d_{\text{вн}} = 50$ мм; в) шинпровод трубчатый с $d_{\text{нар}} = 80$ мм, $d_{\text{вн}} = 74$ мм.

Решение. Коэффициент поверхностного эффекта можно определить по графикам, изображенным на рис. П.1 и П.2 приложения. Для этого необходимо вычислить параметр $\sqrt{f/R_{100}}$ где f - частота переменного тока, Гц; R_{100} - активное сопротивление постоянному току проводника длиной $l = 100$ м, Ом.

Для условия (а) данной задачи

$$\begin{aligned} R_{100} &= \rho_0 (1 + \alpha\vartheta) l / S = 2,62 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0042 \cdot 95) \cdot 100 / (3,14 \cdot 40^2 \cdot 10^{-6}) = \\ &= 7,3 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}; \\ \sqrt{f/R_{100}} &= \sqrt{50 / (7,3 \cdot 10^{-4})} = 262 \text{ Гц}^{1/2} \text{ Ом}^{-1/2}. \end{aligned}$$

Из графика, изображенного на рис. П.1, $k_n = 1,75$.

Для условия (б) задачи

$$\sqrt{f/R_{100}} = 204 \text{ Гц}^{1/2} \text{ Ом}^{-1/2}.$$

Из графика, изображенного на рис. П.2, $k_n = 1,1$. Для условия (в) задачи

$$\sqrt{f/R_{100}} = 100 \text{ Гц}^{1/2} \text{ Ом}^{-1/2}.$$

Из графика, изображенного на рис. П.2, $k_n = 1,0$.

О т в е т : а) $k_n = 1,75$; б) $k_n = 1,1$; в) $k_n = 1,0$.

1.1.2. Определить количество теплоты, выделяющейся в одном метре длины медного шинпровода распределительного устройства, по которому протекает ток $I = 840$ А; шинпровод нагрет до температуры $\vartheta = 90^\circ\text{C}$, его диаметр $d = 20$ мм.

1.1.3. Определить коэффициент поверхностного эффекта и количество теплоты, выделяющейся в одном метре длины круглого шинпровода диаметром $d = 45$ мм, по которому протекает переменный ток $I = 2400$ А промышленной частоты $f = 50$ Гц. Задачу решить для случаев, когда шинпровод выполнен из алюминия и из меди.

1.1.4. Определить коэффициент поверхностного эффекта и потери электрической энергии в одном метре длины стальной трубчатой шины, имеющей наружный диаметр $d_{\text{нар}}=137$ мм, а внутренний $d_{\text{вн}}=5$ дюймов. По шине, температура которой 110°C , протекает ток $I=800$ А частоты $f=50$ Гц.

Решение. Для определения потерь энергии в стальной шине воспользуемся формулой Н.Е. Лысова (1.6), приняв в качестве числового коэффициента максимальную величину, т.е.

$$P_{\sim} = 3,25 \cdot 10^{-4} (I/\Pi)^{5/3} F \sqrt{f}.$$

Если охлаждающая поверхность шины (одного метра шины)

$$F = 3,14 d_{\text{нар}} = 3,14 \cdot 137 \cdot 10^{-3} = 0,43 \text{ м}^2,$$

то потери мощности при переменном токе

$$P_{\sim} = 3,25 \cdot 10^{-4} (800/3,14 \cdot 137 \cdot 10^{-3})^{5/3} \cdot 0,43 \cdot \sqrt{50} = 278 \text{ Вт/м}.$$

Коэффициент поверхностного эффекта $k_n = P_{\square}/P_{\sim}$. Здесь P_{\sim} - потери мощности при постоянном токе:

$$P_{\sim} = I^2 \rho_0 (1 + \alpha \theta) l / S = 800^2 \cdot 10 \cdot 10^{-8} (1 + 0,009 \cdot 110) \cdot 1 \times \\ \times 1,4 / [3,14(137^2 - 127^2) 10^{-6}] = 61,4 \text{ Вт/м}.$$

Тогда $k_n = 278/61,4 = 4,53$.

О т в е т : $k_n = 4,53$; $P_{\square} = 278$ Вт/м.

1.1.5. Решить задачу 1.1.4 при условии, что шина изготовлена в виде стальной трубы тех же поперечных размеров, но имеет продольный разрез шириной $\Delta = 2$ мм.

1.1.6. Определить коэффициент поверхностного эффекта и потери энергии в одном метре стальной прямоугольной шины размером 80×4 мм, если по ней протекает переменный ток $I=250$ А промышленной частоты $f=50$ Гц и температура шины $\theta=110^{\circ}\text{C}$.

1.1.7. Определить коэффициенты поверхностного эффекта и эффекта близости, а также количество теплоты, выделяющейся в одном метре длины шин размером 100×10 мм, если они расположены в одной плоскости на расстоянии 200 мм друг от друга и по ним протекает переменный ток $I=1800$ А частоты $f=50$ Гц. Шины выполнены из алюминия и после протекания по ним тока нагрелись до 95°C .

1.1.8. Определить тепловые потери в одном метре длины шины для условий задачи 1.1.7 с той лишь разницей, что шины расположены

не в одной плоскости, а в параллельных плоскостях на расстоянии 50 мм.

1.1.9. Определить тепловые потери в чугунном кольце, охватывающем проводник с током $I=2500$ А частоты $f=50$ Гц. Внутренний диаметр кольца $D_{\text{вн}}=100$ мм, наружный диаметр кольца $D_{\text{нар}}=150$ мм, его высота $h=150$ мм.

Решение. Воспользуемся формулой (1.9), приняв в качестве числового коэффициента величину 3,75. В данном случае средняя длина магнитной силовой линии

$$l_{\text{ср}} = 3,14 (D_{\text{нар}} + D_{\text{вн}})/2 = 3,14 (150 + 100) \cdot 10^{-3}/2 = 0,393 \text{ м.}$$

Охлаждающая поверхность

$$F = 2 [3,14 (D_{\text{нар}}^2 - D_{\text{вн}}^2)]/4 + 3,14 (D_{\text{нар}} + D_{\text{вн}}) h = 3,14 (150^2 - 100^2)/2 + 3,14 \cdot (150 + 100) \cdot 150 \cdot 10^{-6} = 0,128 \text{ м}^2.$$

Тогда тепловые потери

$$P = 3,25 \cdot 10^{-4} (2500/0,393)^{5/3} 0,128 \cdot \sqrt{50} = 642 \text{ Вт.}$$

Следует отметить, что полученное значение мощности, выделяемой во фланце, довольно значительно. Необходимо применить специальные меры по его охлаждению или уменьшению потерь во фланце.

О т в е т : $P = 642$ Вт.

1.1.10. Определить количество теплоты, выделяемое в стальном фланце (рис. 1.1), внутри которого проходит проводник с переменным током $I=1000$ А частоты $f=50$ Гц.

1.1.11. Определить количество теплоты, выделяющееся в катушке индуктивности переменного тока, которая намотана на замкнутый магнитопровод, выполненный из горячекатаной

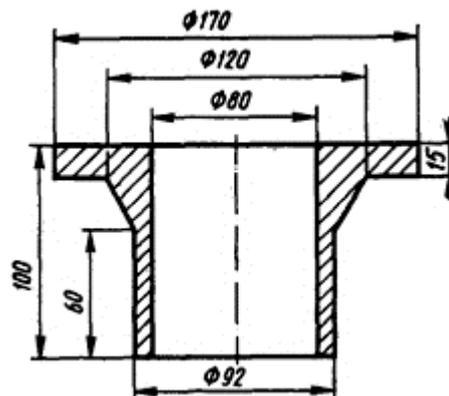


Рис. 1.1. Эскиз стального фланца

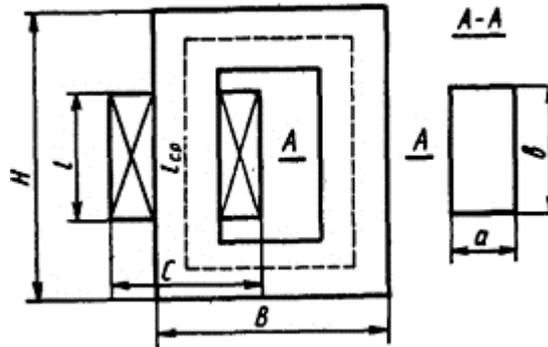


Рис. 1.2. Эскиз магнитопровода с катушкой

трансформаторной листовой стали марки 1511 с толщиной листа $\delta=0,35$ мм. По катушке, имеющей число витков $N=1250$, протекает переменный ток $I=0,6$ А частоты $f=50$ Гц, размеры магнитопровода приведены на рис. 1.2, где $a = b = 35$ мм, $H=130$ мм, $B = 80$ мм, $l_{cp}=280$ мм.

8

Решение. Определим массу m стали в сердечнике. Так как магнитопровод изготовлен из листовой стали, то необходимо учесть коэффициент заполнения поперечного сечения магнитопровода.

Примем $k_3=0,9$. Тогда $m = k_3\gamma V=0,9\cdot 7870\cdot 35\cdot 35\cdot 280\cdot 10^{-9} = 2,43$ кг. Здесь γ , V - плотность и объем стали соответственно.

По графику зависимости удельных потерь от магнитной индукции, марки стали и толщины листа определим значение удельных тепловых потерь (см, рис. П.6). Значение магнитной индукции в сердечнике определяем по табл. П.8.

Напряженность магнитного поля

$$H = IN/l_{cp} = 0,6\cdot 1250/(280\cdot 10^{-3}) = 2700 \text{ А/м,}$$

где l_{cp} - средняя длина магнитной силовой линии. Из табл. П.8 $B=1,57$ Тл.

В соответствии с рис. П.6 удельные тепловые потери $p_{уд}=2,75$ Вт/кг. Суммарные потери в сердечнике $P=p_{уд}m = 2,75\cdot 2,43=6,68$ Вт.

О т в е т : $P=6,68$ Вт.

1.1.12. Решить задачу 1.1.11 при условии, что стальной сердечник изготовлен из сплошного стального бруска. Все остальные данные без изменения.

Решение. Количество теплоты, выделяющееся в сердечнике, определим по формуле (1.7), где $F=4\cdot 35\cdot 10^{-3}l_{cp}=4\cdot 35\cdot 280\cdot 10^{-6}=0,0392$ м² - площадь охлаждающей поверхности магнитопровода. Тогда потери

$$P = 3,25\cdot 10^{-4}(0,6\cdot 1250/0,28)^{5/3}\cdot 0,0392\cdot \sqrt{50} = 46,5 \text{ Вт.}$$

1.1.13. Определить количество теплоты, выделяемое в магнитопроводе электромагнита, катушка которого намотана круглым медным проводом диаметром $d = 4$ мм и имеет 250 витков. Магнитопровод изготовлен из листовой трансформаторной стали марки 1512, толщина листов $\delta = 0,5$ мм. Коэффициент заполнения магнитопровода $k_3 = 0,9$. При подключении катушки к источнику переменного напряжения частоты $f = 50$ Гц плотность тока составляет $j = 1,0$ А/мм². Эскиз магнитопровода приведен на рис. 1.2, где $a = b = 70$ мм, $H = 320$ мм, $B = 180$ мм.

1.1.14. Решить задачу 1.1.13 при условии, что сердечник изготовлен из сплошного бруска стали, а остальные данные задачи 1.1.13 остались без изменения. Определить, во сколько раз потери в сплошном сердечнике больше потерь в шихтованном сердечнике при всех прочих равных условиях.

1.1.15. Определить длительно допустимую величину плотности переменного тока для бескаркасной цилиндрической катушки индуктивности, намотанной медным круглым проводом диаметром $d = 4$ мм. Изоляция провода хлопчатобумажная без пропитки, число витков катушки $N = 250$, высота катушки $H = 170$ мм, а ее внутренний и наружный диаметры соответственно равны $D_{\text{вн}} = 100$ мм, $D_{\text{нар}} = 155$ м. Катушка находится в спокойном воздухе при температуре $\vartheta = 35^\circ\text{C}$.

Р е ш е н и е. Согласно закону Джоуля - Ленца, потери энергии, выделяющиеся в катушке.

$$P = I^2 \rho_0 (1 + \alpha \vartheta) l_{\text{ср}} N / S. \quad (1.18)$$

9

В длительно режиме работы вся выделенная в катушке энергия должна быть отведена в окружающую среду. Мощность, отводимая в окружающую среду, определяется по формуле (1.12) $P = k_m F (\vartheta - \vartheta_0)$, где $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$ - температура окружающей среды; в качестве ϑ берем величину допустимой температуры для данного класса изоляции $\vartheta_{\text{доп}} = 90^\circ\text{C}$.

Коэффициент теплоотдачи определим из формулы (1.17).

Так как должно быть равенство между выделенной в катушке и отводимой с ее поверхности тепловыми мощностями, то исходным уравнением для нахождения допустимой плотности тока будет

$$I^2 \rho_0 (1 + \alpha \vartheta_{\text{доп}}) l_{\text{ср}} N / S = k_T (\vartheta_{\text{доп}} - \vartheta_0),$$

откуда

$$j = \frac{I}{S} = \frac{1}{S} \cdot \sqrt{\frac{k_T F (\vartheta_{\text{доп}} - \vartheta_0) S}{\rho_0 (1 + \alpha \vartheta_{\text{доп}}) l_{\text{ср}} N}},$$

где $S = \pi d^2 / 4 = 3,14 \cdot 4^2 \cdot 10^{-6} / 4 = 12,56 \cdot 10^{-6}$ м² - площадь поперечного сечения провода; $\rho_0 = 1,62 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; $\alpha = 0,0043$ К⁻¹; $F = 3,14(155 + 100) \cdot 170 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 3,14(155^2 - 100^2) 10^{-6} / 4 = 0,158$ м²; $l_{\text{ср}} = \pi(D_{\text{нар}} + D_{\text{вн}}) / 2 = 3,14(0,155 + 0,1) / 2 = 0,40$ м - длина среднего витка катушки. Тогда по (1.17)

$$k_T = 3,6 [1 + 0,005 (90 - 35)] / \sqrt[5]{0,158} = 6,65 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)},$$

а плотность переменного тока

$$j = \frac{2}{12,56 \cdot 10^{-6}} \sqrt{\frac{6,65 \cdot 0,158 (90 - 35) \cdot 12,56 \cdot 10^{-6}}{1,62 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0043 \cdot 90) \cdot 0,4 \cdot 250}} = 1,43 \cdot 10^{-6} \text{ А/мм}^2.$$

О т в е т : $j = 1,43 \text{ А/мм}^2$.

1.1.16. Определить допустимый ток для стальной трубы, имеющей наружный $d_{\text{нар}}=26,8$ мм и внутренний $d_{\text{вн}}=3/4$ дюйма диаметры, если по этой трубе протекает ток частоты $f=50$ Гц. Допустимая температура поверхности трубы $\vartheta_{\text{доп}}=95^\circ\text{C}$, а температура окружающей среды, которой является спокойный воздух, $\vartheta_0=35^\circ\text{C}$.

1.1.17. Определить длительно допустимое значение плотности переменного тока для цилиндрической катушки индуктивности, которая намотана проводом $d=2$ мм, имеет число витков $N=500$, наружный диаметр $D_{\text{нар}}=136$ мм, внутренний $D_{\text{вн}}=70$ мм, а ее высота $h=72$ мм.

1.1.18. Определить допустимое значение переменного тока круглой медной шины диаметром $d=40$ мм, установленной горизонтально в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0=35^\circ\text{C}$, если частота тока $f=50$ Гц, а допустимая температура поверхности шины $\vartheta_{\text{доп}}=85^\circ\text{C}$.

1.1.19. Определить допустимый ток для медной трубы с внутренним $d_{\text{вн}}=40$ мм и внешним $\vartheta_{\text{нар}}=45$ мм диаметрами, расположенной горизонтально в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0=35^\circ\text{C}$. Частота переменного тока $f=50$ Гц, допустимая температура внешней поверхности трубы $\vartheta_{\text{доп}}=85^\circ\text{C}$.

10

1.1.20. Определить допустимый ток для медной шины, поперечное сечение которой 120×10 мм. Шина установлена на ребро в спокойном воздухе горизонтально. Частота переменного тока $f=50$ Гц, допустимая температура шины $\vartheta_{\text{доп}}=85^\circ\text{C}$, температура окружающей среды $\vartheta_0=35^\circ\text{C}$. Полученный результат сравнить с результатом, который получился бы для круглой шины при условии, что площадь ее поперечного сечения равна площади поперечного сечения прямоугольной шины.

1.1.21. Определить температуру медного круглого окрашенного краской проводника диаметром $d=25$ мм, по которому протекает постоянный ток $I=1000$ А. Проводник находится в спокойном воздухе с температурой $\vartheta_0=35^\circ\text{C}$.

Р е ш е н и е . Исходным уравнением для решения задачи должно быть равенство теплоты, выделяемой в проводнике и отдаваемой в окружающую среду с его боковой поверхности:

$$I^2 \rho_0 (1 + \alpha \vartheta) l / S = k_T (\vartheta - \vartheta_0) F.$$

Коэффициент теплоотдачи из формулы (1.14)

$$k_T = 10k_1 [1 + k_2 \cdot 10^{-2} (\vartheta - \vartheta_0)] \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где $k_1=1,17 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $k_2=1,0 \text{ К}^{-1}$.

Подставляя числовые значения в исходное уравнение и произведя расчеты на длине шины в один метр, получим

Решая последнее квадратное уравнение, находим $\vartheta=70^\circ\text{С}$.

Ответ: $\vartheta = 70^\circ\text{С}$.

1.1.22. Определить коэффициент теплоотдачи с поверхности шины, если длительно допустимая нагрузка для стальных шин прямоугольного сечения 100×4 мм (установленных на ребро) при протекании по ним постоянного тока не должна превышать 535 А. Максимальная температура шины $\vartheta = 80^\circ\text{С}$ при температуре окружающего спокойного воздуха $\vartheta_0=35^\circ\text{С}$.

1.1.23. Определить температуру поверхности цилиндрической катушки без магнитопровода, через которую протекает постоянный ток $I=20$ А. Катушка с внутренним $D_{\text{вн}}=100$ мм и наружным $D_{\text{нар}}=160$ мм диаметрами, высотой $h=170$ мм, числом витков $N=250$ расположена в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0=35^\circ\text{С}$. Диаметр провода $d=4$ мм.

1.1.24. Определить температуру поверхности прямоугольной алюминиевой шины размером 120×10 мм, если ее поверхность окрашена краской и по ней протекает постоянный ток $I=2300$ А. Шина установлена горизонтально на ребро в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0 = 35^\circ\text{С}$.

1.1.25. Определить температуру круглого медного проводника, окрашенного краской, расположенного в спокойном воздухе,

11

температура которого $\vartheta_0=35^\circ\text{С}$; по проводнику диаметром $d=45$ мм протекает постоянный ток $I=2500$ А.

1.1.26. Определить температуру поверхности стальной трубы, по которой протекает переменный ток $I=450$ А частоты $f=50$ Гц. Труба окрашена масляной краской (внутренний диаметр $d_{\text{вн}} = 3$ дюйма, наружный $d_{\text{нар}}=88,5$ мм), расположена горизонтально в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0=35^\circ\text{С}$.

1.1.27. Определить количество теплоты, выделяющееся в чугунном кольце высотой $h=200$ мм, с внутренним диаметром $d = 100$ мм и толщиной стенки $\delta = 50$ мм, для случая, когда сквозь кольцо проходит шина с переменным током $I=2000$ А. Вычислить также температуру поверхности кольца, если частота переменного тока $f=50$ Гц, коэффициент теплоотдачи $k_T = 17$ Вт/(м²·К), а температура окружающей среды $\vartheta_0=35^\circ\text{C}$.

12

1.2. Неустановившиеся и квазистационарные процессы нагрева и охлаждения частей электрических аппаратов

В данном параграфе приведены задачи на вычисление постоянных времени нагрева и охлаждения электрических аппаратов, написание уравнений кривых нагрева, на расчет повторно-кратковременного режима нагрева и наиболее важного режима короткого замыкания (к.з.) с использованием кривых адиабатического нагрева и понятия фиктивного времени к.з. При этом используются следующие расчетные формулы и соотношения.

Зависимость температуры токоведущей части электрического аппарата от времени в процессе нагрева (кривая нагрева)

$$\vartheta = \vartheta_{уст} (1 - e^{-t/T}) + \vartheta_n e^{-t/T}, \quad (1.19)$$

где $\vartheta_{уст}$, ϑ_n - установившееся и начальное значения температуры, $^\circ\text{C}$.

$$\vartheta_{уст} = \frac{P_0 + k_T F \vartheta_0}{k_T F - P_0 \alpha}, \quad (1.20)$$

где P_0 - мощность источников теплоты при 0°C , Вт; k_T - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); F - охлаждающая поверхность, м²; ϑ_0 - температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$; α - температурный коэффициент сопротивления, 1/К; T - постоянная времени нагрева, с.

$$T = C / (k_T F - P_0 \alpha), \quad (1.21)$$

где C - теплоемкость электрического аппарата или его части, Дж/К.

В случае, когда $k_T F \gg P_0 \alpha$,

$$T = C / (k_T F); \quad (1.22)$$

$$\vartheta_{уст} = P / (k_T F) + \vartheta_0, \quad (1.23)$$

где P - мощность источников теплоты, Вт, при $\vartheta = \vartheta_{уст}$.

Зависимость температуры электрического аппарата от времени в процессе остывания (кривая охлаждения)

$$\Theta = \Theta_n e^{-t/T}, \quad (1.24)$$

где $\Theta = \vartheta - \vartheta_0$, $\Theta_n = \vartheta_n - \vartheta_0$; T - постоянная времени нагрева, определяемая по формуле (1.22).

Время адиабатического нагрева токоведущей части электрического

$$t_{ад} \leq 0,1T. \quad (1.25)$$

12

Коэффициент перегрузки по мощности при повторно-кратковременном процессе нагрева

$$k_P = P_{пк}/P_{дл} = \left(1 - e^{-\frac{t_p + t_n}{T}}\right) / \left(1 - e^{-\frac{t_p}{T}}\right), \quad (1.26)$$

где $P_{пк}$ и $P_{дл}$ - соответственно мощности источников теплоты при повторно-кратковременном и длительном процессах нагрева, Вт; t_p и t_n - соответственно время рабочего периода и паузы, с.

Коэффициент перегрузки по току при повторно-кратковременном процессе нагрева

$$k_I = \sqrt{k_P}. \quad (1.27)$$

Относительная продолжительность включения аппарата

$$ПВ\% = \frac{t_p}{t_p + t_n} 100\%. \quad (1.28)$$

Фиктивное время короткого замыкания

$$t_{\phi} = \frac{1}{I_{\infty}^2} \int_0^{t_k} i^2 dt, \quad (1.29)$$

где I_{∞} - установившееся значение тока к.з., А; i - ток короткого замыкания, А; t_k - действительное время, к.з., с.

Переходный процесс нагрева полубесконечного, стержня при наличии на его торце источника теплоты описывается выражением действительное значение

$$\vartheta(x, t) = \vartheta_{\max} \psi\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right), \quad (1.30)$$

где x - координата точки на стержне, м, t - время, с, ϑ_{\max} - максимальное значение температуры (при $x=0$), °С, a - температуропроводность материала стержня, м²/с, ,

$\psi\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right)$ - функция, график которой приведен на рис. 1.3.

Количество теплоты, передающееся в стержень за время t ,

$$Q = \frac{2}{\sqrt{\pi}} S \vartheta_{\text{макс}} \sqrt{\lambda c \gamma t}, \quad (1.31)$$

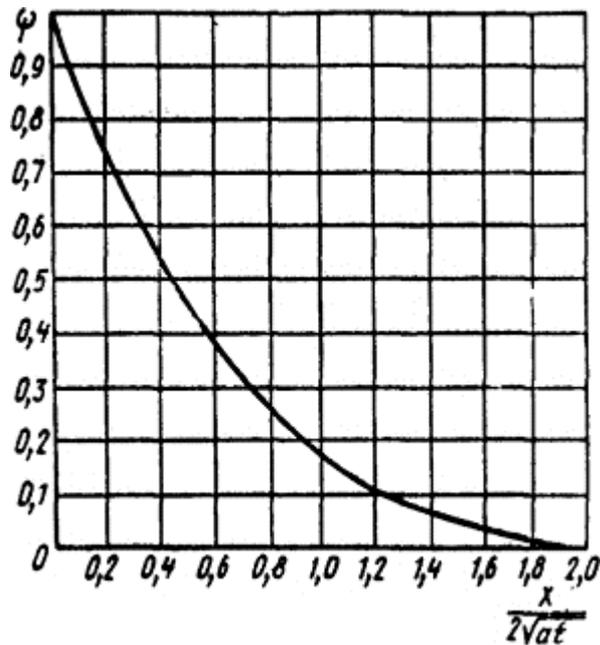


Рис. 1.3. График функции

$$\psi = \psi \left(\frac{x}{2\sqrt{at}} \right):$$

a - температуропроводность материала стержня, $\text{м}^2/\text{с}$; x - координата, м ; t - время

где S - площадь поперечного сечения стержня, м^2 ; λ - коэффициент теплопроводности материала стержня, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, c - удельная теплоемкость материала стержня, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, γ - плотность материала стержня, $\text{кг}/\text{м}^3$.

1.2.1. Написать уравнение кривой нагрева круглого медного проводника диаметром $d=10$ мм, по которому протекает постоянный

13

ток $I=400$ А. Известно, что коэффициент теплоотдачи < поверхности проводника $k_r = 10$ $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, температура окружающей среды, которой является спокойный воздух, $\vartheta_0=35^\circ\text{C}$ а значение удельного сопротивления меди за время нарастания температуры $\rho=1,75\cdot 10^{-8}$ Ом·м.

Решение. Уравнение кривой нагрева в простейшем случае при $\vartheta_n = \vartheta_0$ получаем из формулы (1.19)

$$\vartheta = \vartheta_{\text{уст}} (1 - e^{-t/T}),$$

где $\vartheta_{\text{уст}} = P/(k_r F)$ - установившееся превышение температуры. Расчет $\vartheta_{\text{уст}}$ и T произведем на единице длины проводника $l=1$ м по формулам (1.23 и (1.22) соответственно, т.е.

$$\Theta_{уст} = \frac{I^2 \rho l}{k_{\tau} F S} = \frac{400^2 \cdot 1,75 \cdot 10^{-8} \cdot 4 \cdot 1}{10 \cdot 3,14 \cdot 10^2 \cdot 10^{-6} \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 114^{\circ} \text{C}.$$

Постоянная времени нагрева

$$T = \frac{cm}{k_{\tau} F} = \frac{0,39 \cdot 10^3 \cdot 8700 \cdot 3,14 \cdot 10^2 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 4} = 850 \text{ с},$$

где c - удельная теплоемкость меди; $\gamma V = m$ - масса стержня длиной в 1 м; γ - плотность меди; V - объем проводника; F - охлаждающая поверхность

Таким образом, уравнение кривой нагрева $\Theta = 114 (1 - e^{-t/850})$.

О т в е т : $\Theta = 114 (1 - e^{-t/850})$.

1.2.2. Написать уравнение кривой охлаждения медного стержня для условий задачи 1.2.1, если известно, что ток был выключен через 40 мин после начала нагрева.

1.2.3. Определить постоянную времени нагрева и построить кривую нагрева стальной шины прямоугольного сечения 90×4 мм, если по ней протекает ток $I = 500$ А, шина расположена в спокойном воздухе, температура которого $\Theta_0 = 35^{\circ}\text{C}$, а коэффициент теплоотдачи с поверхности шины $k_{\tau} = 15$ Вт/(м²·К). Удельное сопротивление стали принять $\rho = 12 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

1.2.4. Определить постоянную времени нагрева цилиндрической катушки постоянного тока, которая намотана круглым медным проводом диаметром $d = 2$ мм, имеет 500 витков, ее внутренний диаметр $D_{вн} = 70$ мм, наружный $D_{нар} = 140$ мм, высота $h = 70$ мм. Теплоотдача в окружающую среду, которой является спокойный воздух, осуществляется с боковых поверхностей и с торцов, коэффициент теплоотдачи $k_{\tau} = 20$ Вт/(м²·К).

1.2.5. Написать уравнение кривой нагрева медного круглого проводника диаметром $d = 40$ мм с учетом изменения удельного сопротивления его от температуры, если в момент времени $t = 0$ он нагружается током $I = 2250$ А. Проводник расположен в спокойном воздухе, температура которого $\Theta_0 = 35^{\circ}\text{C}$, а коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности $k_{\tau} = 16$ Вт/(м²·К).

Р е ш е н и е . Постоянная времени нагрева определится из формулы (1.21). Для длины проводника $l = 1$ м, поскольку $C = c \cdot m$, где c - удельная теплоемкость материала, m - масса проводника, $m = \gamma S l = \gamma S$, S - поперечное сечение

14

проводника, γ - плотность, а $P_0 = I^2 \rho_0 / S$, где ρ_0 - удельное сопротивление материала проводника при 0°C , будем иметь

$$T = \frac{c \gamma S^2}{k_{\tau} F S - I^2 \rho_0 l} =$$

$$= \frac{390 \cdot 8700 (3,14 \cdot 40 \cdot 10^{-6})^2}{16 \cdot 3,14 \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot 3,14 \cdot 400 \cdot 10^{-6} - 2250^2 \cdot 1,62 \cdot 10^{-8} \cdot 0,0043} = 2470 \text{ с}.$$

Установившаяся температура с учетом указанных замечаний определится из формулы (1.20), т.е.

$$\vartheta_{уст} = \frac{I^2 \rho_0 + k_T F S \vartheta_0}{k_T F S - I^2 \rho_0 \alpha} =$$

$$= \frac{2250^2 \cdot 1,62 \cdot 10^{-8} + 16 \cdot 3,14 \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot 3,14 \cdot 400 \cdot 10^{-6} \cdot 35}{16 \cdot 3,14 \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot 3,14 \cdot 400 \cdot 10^{-6} - 2250^2 \cdot 1,62 \cdot 10^{-8} \cdot 0,0043} = 78^\circ \text{C},$$

где $\rho_0 = 1,62 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\alpha = 0,0043 \text{ К}^{-1}$.

Поскольку $\vartheta_n = \vartheta_0$, $\vartheta_{уст} = \Theta_{уст} + \vartheta_0$, $\vartheta = \Theta + \vartheta_0$, из формулы (1.19) уравнение кривой нагрева получаем в виде

$$\Theta = \Theta_{уст} (1 - e^{-t/T}) = 43 (1 - e^{-t/2470}).$$

О т в е т : $\Theta = 43 (1 - e^{-t/2470})$.

1.2.6. Составить уравнение кривой нагрева алюминиевой шины прямоугольного поперечного сечения $100 \times 10 \text{ мм}$, если в момент времени $t=0$ она нагружается постоянным током $I=2000 \text{ А}$. В начальный момент времени температура шины $\vartheta_n=50^\circ\text{C}$, температура окружающего воздуха $\vartheta_0=35^\circ\text{C}$, коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности шины $k_T=20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. При расчете учесть изменение удельного сопротивления алюминия от температуры.

1.2.7. Вычислить время, через которое медная труба с поперечными размерами $d_{вн}=25 \text{ мм}$, $d_{нар}=30 \text{ мм}$ нагреется до температуры $\vartheta=110^\circ\text{C}$ в результате протекания тока $I=9400 \text{ А}$. С целью охлаждения по трубе протекает вода, средняя температура которой $\vartheta_{ср}=40^\circ\text{C}$. Коэффициент теплоотдачи с внутренней поверхности трубы $k_T=1500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Удельное сопротивление меди $\rho=1,75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

1.2.8. Решить задачу 1.2.7 при условии, что шина охлаждается не водой, а находится в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0=40^\circ\text{C}$, коэффициент теплоотдачи с ее наружной поверхности $k_T=15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Остальные данные без изменения.

1.2.9. Определить время, через которое медная шина с размерами поперечного сечения $100 \times 6 \text{ мм}$ нагреется переменным током $I=5000 \text{ А}$ до температуры $\vartheta=100^\circ\text{C}$, если она находится в спокойном воздухе с температурой $\vartheta_0=35^\circ\text{C}$, коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности шины $k_T = 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а начальная температура шины $\vartheta_n=50^\circ\text{C}$.

1.2.10. Определить допустимое число включений в 1 ч катушки постоянного тока в повторно-кратковременном режиме нагрева, если время рабочего периода катушки $t_p=150 \text{ с}$ и по ней протекает

ток $I_{пк}=12 \text{ А}$. Катушка цилиндрическая, намотана круглым медным проводом диаметром $d=2 \text{ мм}$, имеет 500 витков, ее внутренний диаметр $D_{вн}=70 \text{ мм}$, наружный $D_{нар}=140 \text{ мм}$, высота катушки $h = 70 \text{ мм}$. Катушка находится в спокойном воздухе, температура

которого $\vartheta_0=35^\circ\text{C}$. С наружных поверхностей катушки коэффициент теплоотдачи $k_T = 20$ Вт/(м²·К). Изоляция провода хлопчатобумажная без пропитки.

Решение. Длительно допустимая величина тока определится из равенства

$$I_{\text{дл}}^2 \rho_0 (1 + \alpha \vartheta_{\text{доп}}) \omega \pi D_{\text{ср}}^4 / (\pi d^2) = k_T (\vartheta_{\text{доп}} - \vartheta_0) F.$$

Для хлопчатобумажной изоляции $\vartheta_{\text{доп}} = 90^\circ\text{C}$. Подставляя числовые значения и производя вычисления, получим $I_{\text{дл}}=8$ А. Тогда коэффициенты перегрузки по току $k_I=I_{\text{пк}}/I_{\text{дл}} = 12/8 = 1,5$ и мощности $k_P = k_I^2 = 2,25$.

Постоянную времени нагрева катушки определим, исходя из предположения, что способностью воспринимать теплоту обладают только ее токопроводящие элементы:

$$T = c \gamma \pi d^2 \omega \pi D_{\text{ср}} / (k_T F 4),$$

где c, γ - соответственно удельная теплоемкость вычисления получим $T=1400$ с.

Тогда из равенства и плотность меди. После

$$k_P = 2,25 = \frac{1 - e^{-(t_p+t_n)/1400}}{1 - e^{-150/1400}}$$

найдем время одного цикла $t_{\text{ц}}=t_p+t_n=372$ с.

Допустимое число включений катушки в час $n=3600/t_{\text{ц}}=3600/372 = 9,7 \approx 9$.

О т в е т : $n=9$.

1.2.11. Определить допустимое число включений электромагнита постоянного тока, который имеет цилиндрическую катушку, намотанную круглым медным проводом диаметром $d=4$ мм. Катушка

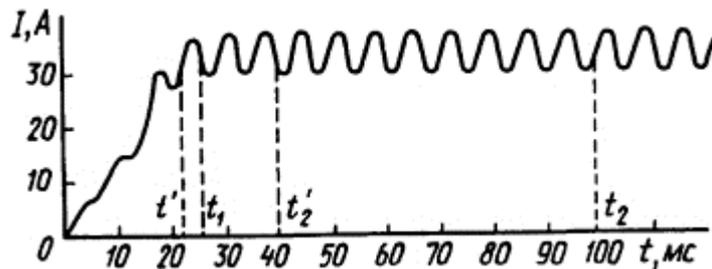


Рис. 1.4. Осциллограмма тока при включении электромагнита

имеет 250 витков, ее наружный диаметр $D_{\text{нар}}=160$ мм, внутренний $D_{\text{вн}}=100$ мм, высота $h=170$ мм; питается она выпрямленным током, нарастающим по закону, приведенному на рис. 1.4. Электромагнит включается в момент времени $t_1 = 25$ мс, а выключается автоматически в момент времени $t_2=t_1+75$ мс. Длительно допустимая температура нагрева катушки, витки которой

имеют хлопчатобумажную изоляцию, $\vartheta_{\text{доп}}=90^\circ\text{C}$. Катушка находится в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0=35^\circ\text{C}$, коэффициент теплоотдачи с поверхности катушки $k_T = 10 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. В теплоотдаче принимают участие наружная боковая поверхность и торцы катушки. Внутренняя поверхность катушки теплоизолирована.

Решение. Определим эквивалентный по теплоте ток:

$$I_p = \sqrt{\frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} i_p^2 dt},$$

где $t_p=t_2=100 \text{ мс}$ - время рабочего периода; i_p - мгновенное значение тока.

Если в пределах от 0 до $t'_1=22 \text{ мс}$ кривую тока представить в виде $i_{p1}=2t$, а от t'_1 до $t_2=100 \text{ мс}$ в виде $t_{p2}=44+4 \sin \omega t$, где $\omega=2\pi f$, то

$$I_p = \sqrt{\frac{1}{100} \left[\int_0^{22} (2t)^2 dt + \int_{22}^{100} (44 + 4 \sin \omega t)^2 dt \right]} = 39,2 \text{ А}.$$

Длительно допустимое значение тока через катушку определим из равенства

$$I_{\text{дл}}^2 \rho_0 (1 + \alpha \vartheta) N \pi D_{\text{ср}}^4 / (\pi d^2) = k_T F (\vartheta - \vartheta_0).$$

Подставив числовые значения, получим $I_{\text{дл}}=22 \text{ А}$. Коэффициент перегрузки по току $k_I=I_p/I_{\text{дл}}=39,2/22=1,78$. Очевидно, $t_p+t_n \ll T$ и, следовательно, справедливо соотношение $t_p + t_n = k_I^2 t_p = 1,78^2 \cdot 0,1 = 0,316 \text{ с}$, откуда

$$k_I = \sqrt{(t_p + t_n)/t_p}, \text{ откуда}$$

Тогда число допустимых включений в час $n=3600/0,316=11400$.

О т в е т : $n=11400$.

1.2.12. Определить значение коэффициентов перегрузки по мощности и току стальной шины прямоугольного сечения $100 \times 4 \text{ мм}$, нагреваемой прерывистым током $I=600 \text{ А}$ через установленные промежутки времени. Допустимая температура нагрева шины $\vartheta_{\text{доп}}=95^\circ\text{C}$. Шина находится в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0=35^\circ\text{C}$, коэффициент теплоотдачи с поверхности шины $k_T=12 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, температура шины в результате протекания прерывистого тока достигает $\vartheta=95^\circ\text{C}$.

1.2.13. Решить задачу 1.2.11 при условии, что автоматическое устройство выключает катушку в момент времени $t'_2 = 40 \text{ мс}$. Все остальные данные без изменения.

1.2.14. Найти конечную температуру медного круглого проводника диаметром $d=20,0 \text{ мм}$, который в течение $1,5 \text{ с}$ нагружается током $I=32000 \text{ А}$, если в начальный момент времени проводник находился в спокойном воздухе при температуре $\vartheta_n=0^\circ\text{C}$, а коэффициент теплоотдачи с его поверхности $k_T=17 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

Решение. Постоянная времени нагрева проводника длиной в 1 м из формулы (1.22) $T=c\gamma S/(k_r F) = 1000$ с. Поскольку $t/T=1,5 \cdot 10^{-5} < 0,1$, процесс

17

нагрева можно считать адиабатическим и температуру проводника определить по кривой адиабатического нагрева для меди (см. рис. П.8).

Для данного случая

$$j^2 t = [3200 / (3,14 \cdot 100 \cdot 10^{-6})^2] 1,5 = 1,56 \cdot 10^{16} \text{ А}^2 \cdot \text{с} / \text{м}^4$$

и, следовательно, $\vartheta_{\text{кон}} = 80^\circ\text{C}$.

О т в е т : $\vartheta_{\text{кон}} = 80^\circ\text{C}$.

1.2.15. Определить температуру алюминиевой шины прямоугольного сечения размером 40×5 мм после протекания по ней тока $I = 20000$ А в течение времени $t = 1$ с. Начальная температура шины $\vartheta_{\text{н}} = 0^\circ\text{C}$.

1.2.16. Решить задачу 1.2.14 при условии, что в начальный момент времени проводник был нагрет до температуры $\vartheta_{\text{н}} = 80^\circ\text{C}$, а все остальные данные оставлены без изменения.

Решение. Для температуры $\vartheta_{\text{н}} = 80^\circ\text{C}$ квадратичный импульс плотности тока (по кривой адиабатического нагрева для меди, см. рис. П.8) $[j^2 t]_{\text{н}} = 1,56 \cdot 10^{16} \text{ А}^2 \cdot \text{с} / \text{м}^4$. Следовательно, конечное значение импульса плотности тока $[j^2 t]_{\text{кон}} = [j^2 t]_{\text{нач}} + [j^2 t]_{\text{н}} = 1,56 \cdot 10^{16} + 1,56 \cdot 10^{16} = 3,12 \cdot 10^{16} \text{ А}^2 \cdot \text{с} / \text{м}^4$.

По кривой адиабатического нагрева (см. рис. П.8) для $[j^2 t]_{\text{кон}}$ находим $\vartheta_{\text{кон}} = 200^\circ\text{C}$.

О т в е т : $\vartheta_{\text{кон}} = 200^\circ\text{C}$.

1.2.17. Определить необходимый диаметр поперечного сечения круглой проволоки нихромового элемента сопротивления реостата, если известно, что в момент времени, когда элемент сопротивления нагрет до температуры $\vartheta = 100^\circ\text{C}$, через него в течение времени $t = 2$ с протекает ток $I = 100$ А. Допустимая температура нагрева нихрома в кратковременном режиме $\vartheta_{\text{доп}} = 450^\circ\text{C}$.

Решение. Суммарный квадратичный импульс плотности тока для нихрома при $\vartheta_{\text{доп}} = 450^\circ\text{C}$ (см. рис. П.9) будет $[j^2 t]_{\text{кон}} = 1,4 \cdot 10^{15} \text{ А}^2 \cdot \text{с} / \text{м}^4$; при $\vartheta_{\text{нач}} = 100^\circ\text{C}$ имеем $[j^2 t]_{\text{нач}} = 0,32 \cdot 10^{15} \text{ А}^2 \cdot \text{с} / \text{м}^4$.

Допустимый квадратичный импульс плотности тока $[j^2 t]_{\text{доп}} = [j^2 t]_{\text{кон}} - [j^2 t]_{\text{нач}} = 1,4 \cdot 10^{15} - 0,32 \cdot 10^{15} = 1,08 \cdot 10^{15} \text{ А}^2 \cdot \text{с} / \text{м}^4$.

Необходимый диаметр поперечного сечения

$$d = \sqrt[4]{\frac{16I^2t}{[j^2t]_{\text{доп}}\pi^2}} = \sqrt[4]{\frac{16 \cdot 100^2 \cdot 2}{1,08 \cdot 10^{15} \cdot 3,14^2}} = 0,74 \cdot 10^{-3} \text{ мм.}$$

О т в е т : $d=0,74$ мм.

1.2.18. Определить необходимый диаметр константановой проволоки элемента сопротивления пускового реостата, если известно, что при начальной температуре сопротивления $\vartheta_n=50^\circ\text{C}$ элемент сопротивления в течение одной секунды нагружается током $I=50$ А. Для константана допустимая температура в кратковременном режиме $\vartheta_{\text{доп}}=200^\circ\text{C}$.

1.2.19. Подобрать стандартную алюминиевую шину прямоугольного сечения для распределительного устройства, в котором возможные токи трехфазного к.з. имеют длительность $t_{\text{к.з.}}=10$ с. Шина должна выдерживать токи к.з., установившиеся значения которых $I_\infty = 30000$ А, а начальные пиковые $I_p = 75000$ А. Расчет произвести для случая, когда шина в результате протекания

18

номинального тока была нагрета до температуры $\vartheta_{\text{нач}}=80^\circ\text{C}$. Охлаждение шины естественное воздушное.

Р е ш е н и е. Определим фиктивное время к.з. по рис. П.10. Поскольку $t_{\text{к.з.}}>5$ с, будем считать, что после 5 с ток к.з. равен установившемуся току. Тогда полное фиктивное время к.з. $t_\phi = t'_\phi + (t_{\text{к.з.}}-5)$, где t'_ϕ - фиктивное время к.з. при $t_{\text{к.з.}} = 5$ с.

Для данной задачи при $\beta'' = I_p/I_\infty = 2,5$ и $t'_{\text{к.з.}} = 5$ с имеем $t'_\phi = 6$ с. Тогда $t_\phi = 6 + (10-5) = 11$ с.

Максимально допустимая температура за время к.з. для алюминия $\vartheta_{\text{доп}} = 200^\circ\text{C}$ При этой температуре $[j^2t]_{\text{кон}} = 1,35 \cdot 10^{16} \text{ А}^2 \cdot \text{с}/\text{м}^4$. Для $\vartheta_{\text{нач}} = 80^\circ\text{C}$ имеем $[j^2t]_{\text{нач}} = 0,75 \cdot 10^{16} \text{ А}^2 \cdot \text{с}/\text{м}^4$. Тогда

$$[j_\infty^2 t_\phi] = 1,35 \cdot 10^{16} - 0,75 \cdot 10^{16} = 0,6 \cdot 10^{16} \text{ А}^2 \cdot \text{с}/\text{м}^4.$$

Требуемое поперечное сечение шины определим из равенства

$$(I_\infty/S)^2 t_\phi = [j_\infty^2 t_\phi]_{\text{доп}},$$

откуда

$$S = \sqrt{\frac{I_\infty^2 t_\phi}{[j_\infty^2 t_\phi]_{\text{доп}}}} = \sqrt{\frac{32 \cdot 10^8 \cdot 11}{0,6 \cdot 10^{16}}} = 1,28 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 = 1280 \text{ мм}^2.$$

Этой площади будут соответствовать две шины с размерами поперечного сечения 80×8 мм.

О т в е т : две шины 80×8 мм.

1.2.20. Определить температуру нагрева медной прямоугольной шины с размерами поперечного сечения 80×10 мм в результате протекания по ней в течение 8 с тока к.з. с параметрами $I_{\approx p} = 90000$ А, $I_{\infty} = 40000$ А, если известно, что в начальный момент к.з. по Шине протекал номинальный ток и температура шины при этом составляла $\vartheta_{\text{нач}} = 90^\circ\text{C}$. Шина находится в спокойном воздухе.

1.2.21. Определить ток десятисекундной термической стойкости для стальной шины прямоугольного сечения размером 100×4 мм, находящейся в спокойном воздухе, для случая, когда начальная температура шины $\vartheta_{\text{нач}} = 80^\circ\text{C}$. Для стальной шины допустимая температура в кратковременном режиме нагрева $\vartheta_{\text{доп}} = 300^\circ\text{C}$.

19

1.3. Расчет теплоотдачи конвекцией с поверхностями электрических аппаратов

В данном параграфе приведены задачи на определение коэффициентов теплоотдачи с использованием известных критериальных уравнений для случаев свободной и вынужденной конвекции для различных частей электрических аппаратов, в которых применяются жидкости и газы в качестве охлаждающей среды.

Количество теплоты, отдающееся с поверхностями нагретых частей электрических аппаратов, в основном зависит от условий конвективного теплообмена, поэтому большое значение имеет умение правильно рассчитать количество

19

теплоты, отводимого конвекцией. Для этой цели используют критериальные уравнения, полученные на основе рассмотрения подобных явлений.

Для решения задач данного параграфа используются следующие расчетные формулы и соотношения.

Критериальное уравнение конвективной теплоотдачи в общем виде

$$\text{Nu} = f(\text{Gr}, \text{Pr}, \text{Re}, \text{Fo}), \quad (1.32)$$

где Nu, Gr, Pr, Re и Fo - соответственно критерии Нуссельта, Грасгофа, Прандтля, Рейнольдса и Фурье:

$$\text{Nu} = k_{\text{т.к}} L / \lambda; \quad (1.33)$$

$$\text{Gr} = \beta g L^3 (\vartheta - \vartheta_0) / \nu^2; \quad (1.34)$$

$$\text{Pr} = \mu g c_p / \lambda; \quad (1.35)$$

$$\text{Re} = w L / \nu; \quad (1.36)$$

$$\text{Fo} = a t / L^2, \quad (1.37)$$

где $k_{т.к}$ - коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·К); L - характерный геометрический размер, м; λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); β - коэффициент объемного расширения, К⁻¹; ϑ - температура поверхности, С; ϑ_0 - температура окружающей среды, °С; ν - кинематическая вязкость жидкости или газа, м²/с; μ - динамическая вязкость жидкости или газа, Н·с/м²; g - ускорение силы тяжести, м/с²; c_p - удельная теплоемкость жидкости или газа при постоянном давлении, Дж/(кг·К); w - скорость, м/с; a - коэффициент температуропроводности, м²/с; t - время, с.

Критериальное уравнение для свободной конвекции в неограниченном пространстве [1]

$$Nu_m = C [GrPr]_m^n (Pr_m/Pr_c)^{0,25} \quad (1.38)$$

Индекс у критерия подобия обозначает, что при вычислениях соответствующего критерия физические параметры необходимо вычислять при температуре с тем же индексом.

ϑ_c - температура поверхности тела.

$$\vartheta_m = (\vartheta + \vartheta_0)/2. \quad (1.39)$$

Величины C

и n определяются по табл. 1.2 [1].

Таблица 1.2

Таблица 1.3

$[Gr Pr]_m$	C	n	$[Gr Pr]_{cp}$	A	r
Меньше 10^{-3}	0,5	0,0	Меньше 10^3	1	0
$10^{-3} \dots 5 \cdot 10^3$	1,18	0,125	$10^3 \dots 10^6$	0,105	0,3
$5 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^7$	0,54	0,25	$10^6 \dots 10^{10}$	0,4	0,2
$2 \cdot 10^7 \dots 10^{13}$	0,135	0,33			

Примечание. При использовании формулы (1.38) для горизонтальных плит полученный коэффициент теплоотдачи необходимо увеличить на 30% для верхней плоскости плиты и уменьшить на 30% для нижней плоскости.

При расчете конвективного теплообмена в ограниченном пространстве (стесненная конвекция) тепловой поток теплоотдачи [1]

$$P = \lambda_{жк} (\vartheta_1 - \vartheta_2)/b, \quad (1.39)$$

где ϑ_1, ϑ_2 - температуры поверхностей, принимающих участие в теплообмене,

°С; δ - характерный линейный размер (расстояние между поверхностями), м; $\lambda_{\text{эк}}$ - эквивалентный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

$$\lambda_{\text{вк}} = \epsilon_{\text{к}} \lambda, \quad (1.40)$$

где λ - коэффициент теплопроводности при определенной температуре, Вт/(м·К); $\epsilon_{\text{к}}$ - коэффициент конвекции.

$$\epsilon_{\text{к}} = A [\text{GrPr}]_{\text{ср}}^r; \quad (1.41)$$

$$\vartheta_{\text{ср}} = (\vartheta_1 + \vartheta_2)/2. \quad (1.42)$$

Величины A и r определяются из табл. 1.3.

Критериальные уравнения вынужденной конвекции теплоотдачи при поперечном обтекании одиночного цилиндра [11]:

для $\text{Re}_{\text{ж}} = 5 \dots 10^3$

$$\text{Nu}_{\text{ж}} = 0,5 \text{Re}_{\text{ж}}^{0,5} \text{Pr}_{\text{ж}}^{0,38} (\text{Pr}_{\text{ж}}/\text{Pr}_{\text{с}})^{0,25}, \quad (1.43)$$

для $\text{Re}_{\text{ж}} = 10^3 \dots 2 \cdot 10^5$

$$\text{Nu}_{\text{ж}} = 0,25 \text{Re}_{\text{ж}}^{0,6} \text{Pr}_{\text{ж}}^{0,38} (\text{Pr}_{\text{ж}}/\text{Pr}_{\text{с}})^{0,25}. \quad (1.44)$$

Величины $\vartheta_{\text{ж}}$ - средняя температура жидкости или газа, °С, $\vartheta_{\text{с}}$ - температура поверхности цилиндра, °С.

Критериальные уравнения вынужденной конвекции при движении жидкости вдоль плоской стенки [11]:

для $\text{Re}_{\text{ж}} < 10^5$

$$\text{Nu}_{\text{ж}} = 0,76 \text{Re}_{\text{ж}}^{0,25} \text{Pr}_{\text{ж}}^{0,43} (\text{Pr}_{\text{ж}}/\text{Pr}_{\text{с}})^{0,25}, \quad (1.45)$$

для $\text{Re}_{\text{ж}} \geq 10^5$

$$\text{Nu}_{\text{ж}} = 0,037 \text{Re}_{\text{ж}}^{0,8} \text{Pr}_{\text{ж}}^{0,43} (\text{Pr}_{\text{ж}}/\text{Pr}_{\text{с}})^{0,25}, \quad (1.46)$$

где $\vartheta_{\text{ж}}$ - температура в начале стенки по отношению к набегающему потоку, °С; $\vartheta_{\text{с}}$ - средняя температура поверхности стенки, определяющим размером является длина стенки.

Критериальные уравнения конвективной теплоотдачи при протекании жидкости или газа в гладких трубах (кроме жидких металлов) [11]:

для $\text{Re}_{\text{ж}} \leq 2200$ (ламинарное движение)

$$\text{Nu}_{\text{ж}} = 0,15 \text{Re}_{\text{ж}}^{0,33} \text{Pr}_{\text{ж}}^{0,43} \text{Gr}_{\text{ж}}^{0,1} (\text{Pr}_{\text{ж}}/\text{Pr}_{\text{с}})^{0,25} \epsilon_{\text{л}}. \quad (1.47)$$

$\vartheta_{ж}$ и $\vartheta_{с}$ - соответственно средние значения температур жидкости или газа и поверхности трубы, °С;

$$\vartheta_{ж} = (\vartheta_{вх} + \vartheta_{вых})/2, \quad (1.48)$$

где $\vartheta_{вх}$ и $\vartheta_{вых}$ - соответственно температуры жидкости или газа на входе в трубу и на выходе из нее, °С.

Таблица 1.4

l/d	1	2	5	10	15	20	30	40	50
ε_l	1,90	1,7	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1

Определяющим размером является внутренний диаметр трубы, а коэффициент ε_l определяется из табл. 1.4, в которой l/d - отношение длины трубы к ее внутреннему диаметру.

21

Для $Re > 10000$ (турбулентное движение)

$$Nu_{ж} = 0,021 Re_{ж}^{0,8} Pr_{ж}^{0,43} (Pr_{ср}/Pr_{с})^{0,25} \varepsilon_l \varepsilon_R. \quad (1.49)$$

Величины $\vartheta_{ж}$, $\vartheta_{с}$ и определяющий размер те же, что и для выражения (1.47)

$$\varepsilon_R = 1 + 1,8d/R, \quad (1.50)$$

где d - внутренний диаметр трубы, м; R - радиус закругления трубы.

Значение ε_l определяется из табл. 1.5.

Таблица 1.5

$R_{ж}$	Значения ε_l при отношении l/d								
	1	2	5	10	15	20	30	40	50
10^4	1,65	1,50	1,34	1,23	1,17	1,13	1,07	1,03	1
$2 \cdot 10^4$	1,51	1,40	1,27	1,18	1,13	1,10	1,05	1,02	1
$5 \cdot 10^4$	1,34	1,27	1,18	1,13	1,10	1,08	1,04	1,02	1
10^5	1,28	1,22	1,15	1,10	1,08	1,06	1,03	1,02	1
10^6	1,14	1,11	1,08	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01	1

1.3.1. Определить коэффициент теплоотдачи конвекцией с боковой наружной поверхности цилиндрической катушки индуктивности высотой $h = 200$ мм, расположенной вертикально в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0 = 35^\circ\text{С}$.

Катушка достаточно удалена от других аппаратов и устройств В результате протекания по ней тока температура ее поверхности $\vartheta=105^{\circ}\text{C}$.

Р е ш е н и е . Из условий задачи следует, что имеет место свободная конвекция в неограниченном пространстве и, следовательно, для определения коэффициента теплоотдачи конвекцией можно воспользоваться формулой. (1.38). Так как для воздуха $Pr_m \approx Pr_c$, то

$$Nu_m = C [GrPr]_m^n$$

Для определения коэффициентов C и n необходимо вычислить произведение $[GrPr]$ при $\vartheta_m = (\vartheta_n - \vartheta_0)/2 = (105+35)/2 = 70^{\circ}\text{C}$.

Значение физических параметров воздуха при температуре $\vartheta_m = 70^{\circ}\text{C}$ (см. табл. П.9): $\nu_m = 20,02 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $\lambda_m = 2,96 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $Pr_m = 0,694$; $Gr_m = \beta_m g (\vartheta - \vartheta_0) L^3 / \nu_m^2$; для воздуха $\beta_m = 1/(273 + \vartheta_m) = (1/(273+70)) = 1/343 \text{ К}^{-1}$; $g=9,81 \text{ м}/\text{с}$.

В качестве определяющего размера примем высоту катушки $h=L=0,2 \text{ м}$. Таким образом, используя формулу (1.34),

$$[GrPr]_m = 9,81 \cdot 0,2^3 (105 - 35) 0,694 / [343 (20,2 \cdot 10^{-6})^2]$$

Из табл. 1.2 определяем $C=0,135$; $n=1/3$. Тогда $Nu_m = 0,135 (2,77 \cdot 10^7)^{1/3} = 40,8$, откуда из формулы (1.33) $k_{т.к} = 40,7 \cdot 2,96 \cdot 10^{-2} / 0,2 = 6,04 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

О т в е т : $k_{т.к}=6,04 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

1.3.2. Решить задачу 1.3.1 при условии, что высота катушки $h = 300 \text{ мм}$.

1.3.3. Определить коэффициент теплоотдачи от вертикальной стенки высотой $h = 2 \text{ м}$ окружающему воздуху, если температура стенки $\vartheta=80^{\circ}\text{C}$. Стенка находится в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0 = 35^{\circ}\text{C}$.

22

1.3.4. Определить коэффициент теплоотдачи с поверхности цилиндрического проводника, расположенного горизонтально в спокойном трансформаторном масле, температура которого $\vartheta_0 = 20^{\circ}\text{C}$. Температура поверхности проводника $\vartheta_c = 75^{\circ}\text{C}$, диаметр $d=45,0 \text{ мм}$.

1.3.5. Вычислить коэффициент теплоотдачи от трансформаторного масла, нагретого до температуры $\vartheta_0=75^{\circ}\text{C}$, в который поместили горизонтально круглую шину. Диаметр шины $d = 45 \text{ мм}$, начальная температура $\vartheta_c=20^{\circ}\text{C}$.

1.3.6. Определить, во сколько раз изменится коэффициент теплоотдачи конвекцией с поверхности круглого проводника диаметром $d=10 \text{ мм}$ воде и трансформаторному маслу

по сравнению со спокойным воздухом, если температура поверхности 90°C , а охлаждающей среды 35°C для всех случаев.

1.3.7. Определить эквивалентный коэффициент теплопроводности и плотность теплового потока между двумя вертикальными плоскими стенками, находящимися друг от друга на расстоянии $\delta=10$ мм, если известно, что температуры стенок соответственно $\vartheta_1 = 150^{\circ}\text{C}$, $\vartheta_2=35^{\circ}\text{C}$, а между стенками находится спокойный воздух.

Решение. Воспользуемся для стесненной конвекции уравнением (1.40), в котором определяющая температура из формулы (1.42) будет равна

$$\vartheta_{\text{ср}} = (\vartheta_1 + \vartheta_2)/2 = (150 + 35)/2 = 92,5^{\circ}\text{C}.$$

При этой температуре параметры воздуха будут следующие (см. табл. П.9): $\beta_{\text{ср}} = 1/366$ K^{-1} ; $\nu_{\text{ср}} = 22,4 \cdot 10^{-6}$ $\text{м}^2/\text{с}$; $\lambda_{\text{ср}} = 3,15 \cdot 10^{-2}$ $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; $\text{Pr}_{\text{ср}} = 0,690$. Тогда, используя формулу (1.34),

$$[\text{GrPr}]_{\text{ср}} = \frac{1}{366} 9,81 \frac{(10-2)^3}{(22,4 \cdot 10^{-6})^2} 115 \cdot 0,690 = 4237.$$

В этом случае справедливо критериальное уравнение (1.41), где $A = 0,105$ и $r=0,3$ (см. табл. 1.3), т.е. $\varepsilon_{\text{к}} = 0,105 \cdot 4237^{0,3} = 1,29$. Эквивалентный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{эк}} = \varepsilon_{\text{к}} \lambda = 1,29 \cdot 3,15 \cdot 10^{-2} = 4,05 \cdot 10^{-2}$ $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Из закона теплопроводности Фурье определим плотность теплового потока:

$$p = \lambda_{\text{эк}} \Delta \vartheta / \delta = 4,05 \cdot 10^{-2} \cdot 115 / 10^{-2} = 466 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Ответ: $\lambda_{\text{эк}} = 4,05 \cdot 10^{-2}$ $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; $p=466$ $\text{Вт}/\text{м}^2$.

1.3.8. Определить значение теплового потока в зазоре $\delta = 3$ мм между двумя трубами длиной $l=1$ м, если диаметр внутренней трубы равен $d=30$ мм, между трубами находится трансформаторное масло, а температуры поверхностей труб равны соответственно $\vartheta_1=80^{\circ}\text{C}$, $\vartheta_2=35^{\circ}\text{C}$.

1.3.9. Вычислить коэффициент теплоотдачи с поверхности медного круглого шинпровода диаметром $d=15$ мм, а также допустимую силу постоянного тока, если известно, что шинпровод охлаждается поперечным потоком сухого воздуха при скорости обдува $w = 1$ м/с. Температура поверхности шинпровода $\vartheta_{\text{ш}}=80^{\circ}\text{C}$, а температура воздуха $\vartheta_0=20^{\circ}\text{C}$.

Решение. Приняв для воздуха $\text{Pr} \approx 0,7$, можно упростить формулы (1.43) и (1.44), при этом

$$\text{Nu}_{\text{ж}} = 0,44 \text{Re}_{\text{ж}}^{0,5} \text{ при } 10 \leq \text{Re}_{\text{ж}} < 10^3;$$

$$\text{Nu}_{\text{ж}} = 0,22 \text{Re}_{\text{ж}}^{0,6} \text{ при } 10^3 \leq \text{Re}_{\text{ж}} < 2 \cdot 10^5.$$

В качестве определяющей температуры принимаем среднюю температуру потока воздуха, а в качестве характерного размера - диаметр шинпровода. Для $\vartheta_{ж}=20^{\circ}\text{C}$ из табл. П.9 и формулы (1.36) получаем

$$Re_{ж} = wd/\nu_{ж} = 1 \cdot 0,015 / (15,06 \cdot 10^{-6}) = 996.$$

Тогда $Nu_{ж} = 0,44 \cdot 996^{0,5} = 13,9$ и, следовательно, из формулы (1.33) получаем

$$k_{т.к} = \frac{Nu_{ж}\lambda}{a} = 13,9 \cdot 2,59 \cdot 10^{-2} / (1,5 \cdot 10^{-2}) = 24 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Из соотношения $4I^2\rho_0(1 + \alpha\vartheta)/(\pi d^2) = k_{т.к}(\vartheta_{ш} - \vartheta_0)\pi dl$ получаем

$$I = \sqrt{\frac{k_{т.к}(\vartheta_{ш} - \vartheta_0)\pi^2 d^3}{4\rho_0(1 + \alpha\vartheta_{ш})}} = \sqrt{\frac{24(80 - 20)3,14^2 \cdot 15^3 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot 1,62 \cdot 10^{-8}(1 + 0,043 \cdot 80)}} = 742 \text{ А.}$$

О т в е т : $I=742 \text{ А.}$

1.3.10. Определить наибольшую силу тока, пропущенного через электрический нагреватель из нихромовой проволоки диаметром $d=1,0 \text{ мм}$, допустимая температура нагрева которой $\vartheta_{доп}=1000^{\circ}\text{C}$. Нагреватель находится в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0=10^{\circ}\text{C}$, а конструкция нагревателя такова, что его можно рассчитывать как одиночный цилиндр. Теплоотдачей излучением пренебречь.

1.3.11. Решить задачу 1.3.10 при условии, что нагреватель обдувается воздухом, температура которого $\vartheta_0=10^{\circ}\text{C}$, скорость потока $w = 1 \text{ м/с}$.

1.3.12. Определить температуру поверхности и значение коэффициента теплоотдачи круглой медной шины диаметром $d=25 \text{ мм}$, если по ней пропускается постоянный ток $I=2900 \text{ А}$. Шина охлаждается поперечным потоком трансформаторного масла, скорость которого $w=1 \text{ м/с}$, температура $\vartheta_{ж}=20^{\circ}\text{C}$.

Р е ш е н и е . Для данной задачи из формулы (1.36)

$$Re_{ж} = w_{ж}d/\nu_{ж} = 1 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} / (22,5 \cdot 10^{-6}) = 1,11 \cdot 10^6.$$

Так как $10^3 \leq Re_{ж} < 2 \cdot 10^5$, то для нахождения коэффициента теплоотдачи воспользуемся формулой (1.44)

Так как Pr_c и потери в шинпроводе зависят от его температуры, то задачу решают подбором. Из равенства

$$Nu_{ж} = 0,25 Re_{ж}^{0,6} Pr_{ж}^{0,38} (Pr_{ж} Pr_c)^{0,25}.$$

Задаваясь различными температурами ϑ_c , определим коэффициенты теплоотдачи из формул (1.33) и (1.44) и токи для этих температур:

$\vartheta_c, ^\circ\text{C}$	40	60	80
$k_T, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	775	882	1000
$I, \text{А}$	1620	2600	3300

По этим данным строим график (рис. 1.5) и для $I=2900 \text{ А}$ находим температуру $\vartheta_c=68,5^\circ\text{C}$; $k_T=925 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

О т в е т : $\vartheta_c = 68,5^\circ\text{C}$; $k_T=925 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

1.3.13. Определить температуру поверхности и значение коэффициента теплоотдачи для условий задачи 1.3.12, если по шине пропускается ток (переменный) $I=5 \text{ кА}$ частоты $f=50 \text{ Гц}$ и шина охлаждается потоком воды.

1.3.14. Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток с внутренней поверхности трубы из нержавеющей стали, по которой протекает постоянный ток, в результате чего температура внутренней поверхности $\vartheta=75^\circ\text{C}$. Внутри трубы протекает вода со скоростью $w = 0,1 \text{ м/с}$, внутренний диаметр трубы $d_{\text{вн}}=7,6 \text{ мм}$, длина трубы $l=1 \text{ м}$, температура воды на входе $\vartheta_{\text{вх}} = 20^\circ$, на выходе $\vartheta_{\text{вых}}=65^\circ\text{C}$.

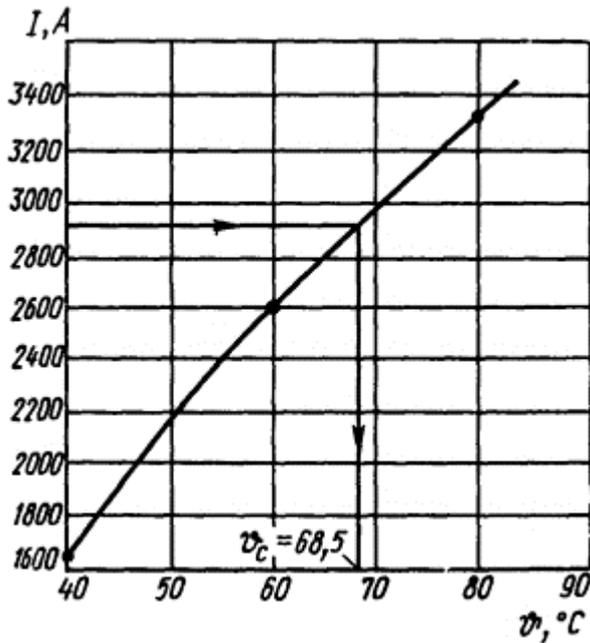


Рис. 1.5. Построение графика к задаче 1.3.13 и определение температуры поверхности шин

Р е ш е н и е . Воспользуемся критериальными уравнениями для вынужденной конвекции при протекании жидкостей в трубах. При этом необходимо выяснить характер течения, для чего следует вычислить критерий Рейнольдса

При определяющей температуре $\vartheta_{\text{ж}}=(\vartheta_{\text{вх}} + \vartheta_{\text{вых}})/2=42,5^\circ\text{C}$ определим значения физических параметров воды:

$$\nu_{\text{ж}} = 0,64 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \lambda_{\text{ж}} = 63,7 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

$$\text{Pr}_{\text{ж}} = 4,1; \beta_{\text{ж}} = 4,0 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}.$$

Кроме того, $\text{Pr}_c = 2,39$ при $\vartheta_c = 75^\circ\text{C}$. Тогда в соответствии с формулой (1.36)

$$Re_{ж} = wd/v_{ж} = 0,1 \cdot 7,6 \cdot 10^{-3} / (0,63 \cdot 10^{-6}) = 1206.$$

Так как $Re_{ж} = 1206 < 2200$, то движение воды в трубе будет ламинарным, поэтому следует воспользоваться формулой (1.47)

$$Nu_{ж} = 0,15 Re_{ж}^{0,33} Pr_{ж}^{0,43} Gr_{ж}^{0,1} (Pr_{ж}/Pr_{с})^{0,25} \epsilon_I,$$

где

$$Gr_{ж} = \beta g (\theta - \theta_{ж}) d^3 / \nu^2 = 4 \cdot 10^{-4} \cdot 9,81 \cdot 7,6^3 \cdot 10^{-9} \cdot 32,5 / (0,642 \cdot 10^{-12}) = 1,40 \cdot 10^5.$$

25

Так как $l/d = 1000/7,6 > 50$, то из табл. 1.4 $\epsilon_I = 1$. Подставляя числовые значения, вычисляем

$$Nu_{ж} = 0,15 \cdot 1206^{0,33} \cdot 4,1^{0,43} (1,4 \cdot 10^5)^{0,1} (4,1/2,39)^{0,25} = 10,9.$$

Тогда коэффициент теплоотдачи из формулы (1.33)

$$k_{т} = Nu_{ж} \lambda_{ж} / d = 10,9 \cdot 63,7 \cdot 10^{-2} / (7,6 \cdot 10^{-3}) = 912 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Тепловой поток с внутренней поверхности трубы в соответствии с формулой (1.12)

$$P = k_{т} F (\theta_{с} - \theta_{ж}) = 912 \cdot 3,14 \cdot 7,6 \cdot 10^{-3} \cdot 32,5 = 707 \text{ Вт}.$$

О т в е т: $k_{т} = 912 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); P = 707 \text{ Вт}.$

1.3.15. Определить коэффициент теплоотдачи с горизонтальной крышки масляного бака, обдуваемой потоком воздуха со скоростью $w=2$ м/с. Продольный размер крышки $a=1,0$ м, поперечный $b=0,5$ м, температура поверхности $\theta_{с} = 50^{\circ}\text{C}$, температура набегающего потока воздуха $\theta_0=20^{\circ}\text{C}$.

1.3.16. Определить длительно допустимый переменный ток для условий задачи 1.3.14. При $\theta=75^{\circ}\text{C}$ удельное сопротивление нержавеющей стали $\rho=0,85 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, а наружный диаметр трубы $d_{нар}=8$ мм.

1.3.17. Определить температуру внутренней поверхности трубы из нержавеющей стали, которая включена в электрическую цепь переменного тока. Длина трубы $l=2600$ мм, наружный диаметр $d_{нар}=12,4$ мм, внутренний $d_{вн}=12,0$ мм. По трубе протекает вода со скоростью $w=1$ м/с и пропускается ток $I=260$ А, а температура воды на входе и выходе соответственно равна 20 и 60°C . Удельное сопротивление нержавеющей стали принять не зависящим от температуры $\rho=0,85 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

Р е ш е н и е. Задачу будем решать подбором, поскольку в критериальное уравнение входит величина $Pr_{с}$, а значение Прандтля зависит от температуры (см. табл. П. 10).

Для $\theta_{ж} = (\theta_{вх} + \theta_{вых})/2 = (20+60)/2 = 40^{\circ}\text{C}$ критерий Рейнольдса в соответствии с формулой (1.36) $Re_{ж} = wd/v_{ж} = 1 \cdot 12 \cdot 10^{-3} / (0,659 \cdot 10^{-6}) = 18200$. Так как $Re_{ж} = 18200 > 10000$, то движение жидкости в трубе будет турбулентным и для решения задачи можно воспользоваться критериальным уравнением из формулы (1.49)

$$Nu_{ж} = 0,021 Re_{ж}^{0,8} Pr_{ж}^{0,43} (Pr_{ж}/Pr_{с})^{0,25} \varepsilon_I \varepsilon_R,$$

где в соответствии с табл. 1.5 и формулой (1.50) $\varepsilon_I=1$ и $\varepsilon_R = 1$.

Подставив известные величины в написанное уравнение и произведя возможные сокращения, получим $Nu_{ж}=143/Pr_{с}^{0,25}$. Коэффициент теплоотдач определим по формуле (1.33) $k_T = Nu_{ж}\lambda_{ж}/d$, где $\lambda_{ж}= 63,5 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К).

Из формулы $I^2 \rho_0 l / S = k^T F (\vartheta_0 - \vartheta_{ж})$ определим перепад температур:

$$\vartheta_{с} - \vartheta_{ж} = I^2 0,85 \cdot 10^{-6} \cdot 4 Pr_{с}^{0,25} 12 \cdot 10^{-3} / [143 \cdot 63,5 \cdot 10^{-2} \cdot 3,14 \cdot 12 \cdot 10^{-3} \times \\ \times 3,14 (12,4^2 - 12^2) 10^{-6}].$$

После возможных сокращений получаем функциональную связь между ($\vartheta_{с}- \vartheta_{ж}$), I и $Pr_{с}$, т.е.

$$I = 51,3 \sqrt{(\vartheta_{с} - \vartheta_{ж}) / Pr_{с}^{0,25}},$$

26

представленную ниже:

I, A	220	247	272
$Pr_{с}^{0,25}$	1,34	1,26	1,23
$\vartheta_{с} - \vartheta_{ж}$	65	70	75

По этим данным строим график $I=\varphi(\vartheta_{с})$ (рис. 1.6) и по заданному значению тока $I=260$ А определяем температуру внутренней стенки трубы $\vartheta_{с} = 72,5^{\circ}C$.

О т в е т : $\vartheta_{с} = 72,5^{\circ}C$.

1.3.18. Вычислить допустимый ток катушки индуктивности, выполненной из медной трубы, намотанной на цилиндрическую оправку радиуса $R = 120$ мм. Труба имеет внутренний диаметр $d=12$ мм, толщину стенки $\delta=2$ мм и по ней с целью охлаждения пропускают воду со скоростью $w=1$ м/с. Температуры воды на входе $\vartheta_{вх} = 25^{\circ}C$, на выходе $\vartheta_{вых} = 55^{\circ}C$. Катушка имеет четыре витка. Температура внутренней поверхности трубы не должна превышать $\vartheta_{доп} = 65^{\circ}C$. Определить также количество теплоты, отводимое водой от катушки.

1.3.19. Определить требуемую скорость воды и температуру внутренней стенки медной трубы, длина которой $l=1$ м, внутренний диаметр $d_{вн} = 20$ мм, наружный $d_{нар} = 30$ мм. По трубе протекает ток $I=15000$ А.

Температура воды водопроводной сети $\vartheta_{вх}=25^{\circ}C$, а допустимая температура воды на выходе из трубы $\vartheta_{вых} = 45^{\circ}C$.

Р е ш е н и е . Средняя температура воды в трубе в соответствии с (1.48)

$$\vartheta_{ж} = (\vartheta_{вх} + \vartheta_{вых})/2 = (25 + 45)/2 = 35^{\circ}\text{C}.$$

Если средняя температура внутренней стенки трубы будет выше средней температуры жидкости, то только в этом случае будет иметь место теплоотдача от стенки трубы к воде. Зададимся средней температурой стенки трубы $\vartheta_c = 50^{\circ}\text{C}$. Тогда мощность, выделяемая в трубе при протекании по ней тока,

$$P = I^2 \rho_0 (1 + \alpha \vartheta_c) l / S = 15000^2 \cdot 1,62 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0043 \cdot 50) 1 \times \\ \times 4 / [3,14 (30^2 - 20^2) 10^{-6}] = 11\,300 \text{ Вт}.$$

Зная температуру воды на входе в трубу и выходе из нее, определим необходимую скорость движения воды, исходя из условия, что мощность, выделяемая в трубе, должна восприниматься и уноситься водой. Мощность, уносимая водой,

$$P_{ж} = S w_1 \gamma c_p (\vartheta_{вых} - \vartheta_{вх}),$$

где S - площадь поперечного сечения трубы; w_1 - скорость воды; $\gamma = 993 \text{ кг/м}^3$ - плотность воды; $c_p = 4174 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ - удельная теплоемкость воды при $\vartheta_{ж}$ и постоянном давлении p . Тогда $11300 = 3,14 \cdot 20^2 \cdot 10^{-6} w_1 \cdot 993 \cdot 4174 (45 - 25) / 4$, откуда $w_1 = 0,436 \text{ м/с}$.

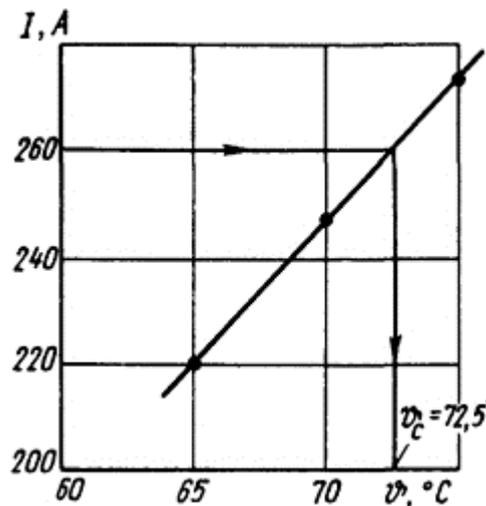


Рис. 1.6. Построение графика к задаче 1.3.17 и определение температуры поверхности трубы

27

Для воды при $\vartheta_{ж} = 35^{\circ}\text{C}$ из формулы (1.36)

$$Re_{ж} = \frac{w_1 d}{\nu_{ж}} = \frac{0,436 \cdot 20 \cdot 10^{-3}}{0,726 \cdot 10^{-6}} = 12\,000.$$

В соответствии с (1.49) критериальное уравнение будет иметь вид

$$Nu_{ж} = 0,021 Re_{ж}^{0,8} Pr_{ж}^{0,43} (Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25} \epsilon_I \epsilon_R = 0,021 (12\,000)^{0,8} \cdot 4,86^{0,43} \times \\ \times (4,86/3,54)^{0,25} = 82.$$

Здесь $\epsilon_I = 1$, $\epsilon_R = 1$.

Коэффициент теплоотдачи определим по формуле (1.33) [см. табл. 1.5 и формулу (1.50)]

$$k_{T1} = Nu_{ж} \lambda_{ж} / d = 82 \cdot 62,6 \cdot 10^{-2} / (20 \cdot 10^{-3}) = 2580 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Из формулы (1.12) $P_1 = k_{T1} F (\vartheta_{c1} - \vartheta_{ж})$, температура поверхности трубы

$$\vartheta_{c1} = 11300 / (2580 \cdot 3,14 \cdot 20 \cdot 10^{-3}) + 35 = 105^\circ \text{С}.$$

Первоначально заданная температура стенки была 50°С . Поскольку получилось большое расхождение, проведем второе приближение. Зададимся $\vartheta_{c2} = (50 + 105) / 2 \approx 80^\circ\text{С}$, тогда $P_2 = 12500 \text{ Вт}$; $w_2 = 0,485 \text{ м/с}$; $k_{T2} = 3150 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $\vartheta_{c2} = 98^\circ\text{С}$.

Третье приближение $\vartheta_{c3} = (80 + 98) / 2 \approx 90^\circ\text{С}$ дает $P_3 = 12900 \text{ Вт}$; $w_3 = 0,5 \text{ м/с}$; $k_{T3} = 3360 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $\vartheta_{c3} = 94^\circ\text{С}$. Эту точность можно считать удовлетворительной.

О т в е т : $w = 0,5 \text{ м/с}$; $\vartheta_c = 94^\circ\text{С}$.

1.3.20. Решить задачу 1.3.19 при условии, что по трубе протекает ток $I = 10000 \text{ А}$; все остальные данные без изменения.

1.3.21. Определить необходимый расход воды и температуру внутренней поверхности стальной трубчатой шины, по которой протекает переменный ток $I = 6000 \text{ А}$ частоты $f = 50 \text{ Гц}$. Шина охлаждается проточной водой, имеет длину $l = 1 \text{ м}$, внутренний диаметр $d_{вн} = 2 \text{ дюйма}$, наружный $d_{нар} = 60 \text{ мм}$. Температура воды на входе в трубу $\vartheta_{вх} = 20^\circ\text{С}$, на выходе из нее $\vartheta_{вых} = 25^\circ\text{С}$.

1.3.22. Вычислить расход воды и значение тока, который можно пропустить через отрезок алюминиевой круглой шины длиной 1 м . Температура воды на входе шины $\vartheta_{вх} = 25^\circ\text{С}$, а на выходе - $\vartheta_{вых} = 55^\circ\text{С}$. Допустимая температура внутренней поверхности Шины $\vartheta_c = 95^\circ\text{С}$, внутренний диаметр шины $d_{вн} = 45 \text{ мм}$, наружный $d_{нар} = 50 \text{ мм}$.

Р е ш е н и е . Скорость охлаждающей воды определим из уравнения

$$w = P(\vartheta_c) / [c_p \gamma S (\vartheta_{вых} - \vartheta_{вх})],$$

Тогда критерий Рейнольдса из уравнения (1.36)

$$Re = P(\vartheta_c) d / [c_p \gamma S (\vartheta_{вых} - \vartheta_{вх}) \nu].$$

Для ламинарного режима движения жидкости из формулы (1.47)

$$Nu_{ж} = 0,15 \left[\frac{P(\vartheta_c) d}{c_p \gamma S (\vartheta_{вых} - \vartheta_{вх}) \nu} \right]^{0,33} Pr_{ж}^{0,43} Gr_{ж}^{0,1} \cdot (Pr_{ж} / Pr_c)^{0,25}.$$

Так как из формулы (1.33) коэффициент теплоотдачи $k_T = Nu_{ж} \lambda_{ж} / d$, а $\vartheta_c - \vartheta_{ж} = P(\vartheta_c) / (k_T F)$, то, подставляя в последнее равенство все необходимые

значения и произведя вычисления, получим $P(\vartheta_c)=485$ Вт. В данном случае $Re_{ж}=188 < 2200$, следовательно, движение будет ламинарным и, следовательно, примененная формула справедлива. Допустимый ток

$$I_{доп} = \sqrt{\frac{P(\vartheta_c) S}{\rho_0 (1 + \alpha \vartheta_c) l}} = \sqrt{\frac{485 \cdot 3,14 (50^2 - 45^2) 10^{-6}}{2,62 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0042 \cdot 95) 4 \cdot 1}} = 2200 \text{ А.}$$

При этом необходимый расход воды

$$Q = \frac{Re \cdot \nu \pi d^2}{4d} = \frac{188 \cdot 0,659 \cdot 10^{-6} \cdot 45 \cdot 10^{-3} \cdot 3,14}{4} = 0,435 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с} = \\ = 0,156 \text{ л/ч.}$$

Такой расход воды можно обеспечить за счет автономной водовоздушной системы [3].

О т в е т : $I=2200$ А; $Q = 0,156$ л/ч.

1.3.23. Определить допустимую силу тока и необходимый расход воды для медной круглой шины длиной $l=5$ м, если известно, что внутренний диаметр шины $d_{вн}=45$ мм, наружный $d_{нар}=50$ мм, температура воды на входе $\vartheta_{вх}=25^\circ\text{C}$, а допустимая температура воды на выходе $\vartheta_{вых}=55^\circ\text{C}$. Температура внутренней стенки шины не должна превышать $\vartheta_{доп}=90^\circ\text{C}$.

1.3.24. Определить допустимую силу тока и температуру воды на выходе из алюминиевой трубы длиной $l=3$ м. Расход охлаждающей воды $Q=14,5$ л/с. Максимальная температура внутренней стенки не выше $\vartheta_{доп}=90^\circ\text{C}$, температура воды на входе $\vartheta_{вх}=35^\circ\text{C}$, внутренний диаметр трубы $d_{вн}=45$ мм, внешний $d_{нар} = 50$ мм.

1.3.25. Определить допустимый ток и температуру воды на выходе для трубчатой медной шины, охлаждаемой водой, протекающей внутри шины со скоростью $w = 0,285$ м/с. Температура внутренней поверхности трубы не должна превышать $\vartheta_{доп}=85^\circ\text{C}$, температура воды на входе $\vartheta_{вх}=25^\circ\text{C}$, внутренний диаметр шины $d_{вн}=95$ мм, наружный $d_{нар}=150$ мм, длина шины $l=4$ м.

1.4. Расчет теплоотдачи излучением и конвекцией

В данном параграфе приведены задачи по расчету теплоотдачи излучением для случаев теплообмена между двумя телами по формулам, вытекающим из закона Стефана - Больцмана, а также задачи, в которых теплоотдача происходит совместно излучением и конвекцией. В ряде случаев, встречающихся в электрических аппаратах, теплоотдача излучением может быть равна или даже больше теплоотдачи конвекцией.

При решении задач данного параграфа используются следующие расчетные формулы и соотношения.

Количество теплоты, которое отдается излучением с 1 м^2 поверхности (тепловой поток) более нагретого тела менее нагретому телу, в случае, когда одно тело заключено внутри другого,

$$\rho_n = \frac{5,67 (T_1/100)^4 - (T_2/100)^4}{(1/\epsilon_1) + (F_1/F_2)(1/\epsilon_2 - 1)}, \quad (1.51)$$

где T_1 и T_2 - соответственно температуры тел, К; ϵ_1 и ϵ_2 - степень черноты полного излучения тел; F_1 и F_2 - поверхность тел, м^2 .

29

Для случая, когда тело находится на достаточном удалении от других тел (в окружающей среде с температурой T_0 , К) тепловой поток излучением с его поверхности

$$\rho_n = 5,67 \epsilon (T/100)^4 - (T_0/100)^4, \quad (1.52)$$

Для двух ограниченных поверхностей, находящихся на близком расстоянии (т.е. когда $F_1 \approx F_2$), тепловой поток

$$\rho_n = \frac{5,67 (T_1/100)^4 - (T_2/100)^4}{(1/\epsilon_1) + (1/\epsilon_2) - 1}, \quad (1.53)$$

В случае теплообмена между двумя телами, находящихся на некотором расстоянии друг от друга, тепловой поток с поверхности более нагретого тела; передаваемый излучением менее нагретому телу [11],

$$\rho_n = \frac{5,67 \epsilon_{12} \epsilon_{21} (T_1/100)^4 - \epsilon_{21} F_2 (T_2/100)^4}{1 + \epsilon_{12} [(1/\epsilon_1) - 1] + \epsilon_{21} [(1/\epsilon_2) - 1]}, \quad (1.54)$$

где ϕ_{12} и ϕ_{21} - средние значения угловых коэффициентов лучистого теплообмена между первым - вторым и вторым - первым телами соответственно, причем

$$\epsilon_{12} F_1 = \epsilon_{21} F_2, \quad (1.55)$$

где F_1 и F_2 - поверхность первого и второго тел соответственно, между которыми происходит теплообмен излучением.

1.4.1. Рассчитать наибольший ток, который можно пропустить по катушке электромагнита переменного тока промышленной частоты. Катушка имеет $N=1500$ витков и намотана на магнитопровод, выполненный из листовой электротехнической стали марки 1511 толщиной листов $\delta = 0,35$ мм. Сталь магнитопровода имеет плотный блестящий слой окиси, электромагнит расположен в камере с глубоким вакуумом. Стенки камеры находятся на достаточном удалении от электромагнита и имеют температуру $\vartheta_0=35^\circ\text{C}$. По техническим условиям температура поверхности магнитопровода не может быть выше $\vartheta=100^\circ\text{C}$. Размеры магнитопровода приведены на рис. 1.2, где $H=150$ мм, $l=60$ мм, $l_{cp} = 360$ мм, $c=75$ мм, $B=100$ мм, $a = 35$ мм, $b = 70$ мм.

Решение. Так как электромагнит находится в вакууме, то теплоотдача от его поверхности к поверхности вакуумной камеры осуществляется излучением. Так как стенки вакуумной камеры достаточно удалены от электромагнита, то можно

предположить, что поверхность камеры значительно больше поверхности магнитопровода. Определим, какое количество теплоты передается с поверхности F магнитопровода, не занятой катушкой, к стенкам камеры, используя формулу (1.52)

$$P = p_0 F = 5,67 \cdot 0,7 \cdot 100^4 - (T_0/100)^4 F.$$

При вычислении поверхности магнитопровода, принимающей участие в теплообмене, поверхность магнитопровода, не занятую катушкой, уменьшим примерно на 40%, поскольку часть тепловых лучей, исходящих из поверхности магнитопровода, будет падать на катушку, поглощаться в ней и не достигнет поверхности стенок камеры:

$$F = 2(35 + 70)(360 - 60) \cdot 10^{-4} \cdot 0,6 = 0,0368 \text{ м}^2.$$

30

Для условия задачи $\varepsilon = 0,82$ (см. табл. П.12). Тогда

$$P = 5,67 \cdot 0,82 \left[\left(\frac{273 + 100}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + 35}{100} \right)^4 \right] 0,0368 = 17,7 \text{ Вт}.$$

Таким образом, в каждом килограмме магнитопровода может быть выделено теплоты

$$p = P/m = 17,7 / [35 \cdot 70 \cdot 360 \cdot 10^{-9} \cdot 7800] = 2,57 \text{ Вт/кг},$$

где m - масса магнитопровода.

Для данных задачи потери $p = 2,57$ Вт/кг будут иметь место при $B = 1,3$ Тл (см. табл. П.8). Для стали 1511 индукция $B=1,3$ Тл будет иметь место при напряженности магнитного поля $H=1000$ А/м. Тогда из уравнения $IN=Hl_{cp}$ определяем максимально допустимый ток

$$\text{О т в е т: } I_{\text{доп}} = 0,24 \text{ А}.$$

1.4.2. Определить количество теплоты, которое передается излучением с поверхности одного метра алюминиевой шины круглого поперечного сечения диаметром $d=25$ мм. Шина расположена в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0=35^\circ\text{C}$, на большом удалении от других тел. Поверхность шины шероховата, а ее температура в результате протекания переменного тока $\vartheta=95^\circ\text{C}$.

1.4.3. Решить задачу 1.4.2 при условии, что шина в одном случае полирована, а в другом случае окрашена масляной краской.

1.4.4. Для условий задачи 1.4.1 определить максимально допустимый ток в катушке, если магнитопровод выполнен из сплошного бруска вальцованной стали. Для решения задачи использовать формулу (1.7).

1.4.5. Определить коэффициент теплоотдачи излучением с поверхности медной окисленной шины, если поверхность шины в результате протекания по ней тока нагрета до температуры $\vartheta=95^\circ\text{C}$ и находится в воздухе, температура которого $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$, на достаточном удалении от других тел.

1.4.6. Найти коэффициент теплоотдачи излучением с поверхности медной круглой шины диаметром $d=40$ мм, если она заключена в стальную трубу, внутренний диаметр которой $d_{\text{вн}} = 2$ дюйма, наружный $d_{\text{нар}}=60$ мм. Поверхности шины и трубы окислены и нагреты соответственно до температур $\vartheta_{\text{ш}} = 95^\circ\text{C}$, $\vartheta_{\text{тр}}=35^\circ\text{C}$.

1.4.7. Определить допустимую плотность тока в медной круглой шине диаметром $d=20$ мм, расположенной концентрично в стальной трубе, размеры которой $d_{\text{вн}} = 1$ дюйм и $d_{\text{нар}}=33,5$ мм. Между поверхностью шины и трубы - глубокий вакуум. Максимальная температура поверхности шины по техническим условиям не должна быть выше $\vartheta=100^\circ\text{C}$, а температура внутренней поверхности "стальной трубы" $\vartheta_{\text{тр}} = 35^\circ\text{C}$. Поверхность трубы покрыта белым лаком, поверхность шины - черным матовым.

31

1.4.8. Методом подбора определить температуру поверхности медной круглой шины, которая находится в стальной трубе и по ней протекает переменный ток $I=1000$ А частоты $f=50$ Гц. Температура внутренней поверхности трубы $\vartheta_{\text{тр}} = 35^\circ\text{C}$, а между шиной и трубой глубокий вакуум. Поверхность шины окислена, а внутренняя поверхность трубы окрашена белым эмалевым лаком. Диаметр шины $d=30$ мм, внутренний диаметр трубы $\vartheta_{\text{тр}} = 1,5$ дюйма.

1.4.9. Определить количество теплоты, передаваемое излучением с поверхности цилиндрической катушки индуктивности, имеющей наружный диаметр $D_{\text{нар}}=160$ мм, внутренний $D_{\text{вн}} = 100$ мм, высоту $h=170$ мм. В результате протекания по катушке тока ее поверхность нагрелась до температуры $\vartheta=100^\circ\text{C}$. Катушка заключена в стальную кубическую коробку, высота ребра которой 200 мм. Поверхность катушки покрыта масляной краской. Сталь, из которой изготовлена коробка, оцинкованная блестящая; температура поверхности коробки $\vartheta_{\text{кор}}=65^\circ\text{C}$.

1.4.10. Вычислить методом подбора температуру поверхности цилиндрической катушки индуктивности, геометрические размеры которой приведены в задаче 1.4.9. Катушка помещена в замкнутый герметический кубический корпус, высота ребра которого $h=250$ мм. В корпусе поддерживается глубокий вакуум. Катушка имеет 250 витков из медного круглого провода диаметром $d=4$ мм, ток, протекающий через катушку, $I=10$ А. Поверхность катушки покрыта алюминиевой краской, а корпус изготовлен из листовой оцинкованной окисленной стали и его температура $\vartheta_{\text{кор}}=35^\circ\text{C}$. Степень черноты излучения для алюминиевой краски $\epsilon=0,5$.

1.4.11. Определить, какое количество теплоты передается излучением в установившемся режиме теплообмена от нагретой шины к холодной, если шины размером 120×10 мм расположены параллельно друг другу на расстоянии $\delta = 20$ мм. Шина, по которой протекает переменный ток, нагревается до температуры $\vartheta_1 = 120^\circ\text{C}$. Температура другой шины $\vartheta_2=35^\circ\text{C}$. Обе шины медные и окрашены масляной краской.

Решение. Количество теплоты, передающееся излучением от нагретой шины к холодной, определим по формуле (1.54). Рассчитаем теплообмен на длине шин $l=1$ м. Учитывая, что $F_1\varphi_{12}=F_2\varphi_{21}$ [см. формулу (1.55)], имеем

$$P_{\text{н}} = \frac{5,67\varphi_{12}F_1 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4]}{1 + \varphi_{12} [(1/\varepsilon_1) - 1] + \varphi_{21} [(1/\varepsilon_2) - 1]},$$

где F_1 - теплоотдающая поверхность нагретой шины.

Коэффициент [11]

$$\begin{aligned} \varphi_{12} &= (F_{AD} + F_{BC'C} - F_{BD} - F_{AC}) / (2F_{AB}) = \\ &= (2\sqrt{a^2 + s^2} - 2s) / (2a) = \sqrt{1 + s^2/a^2} - s/a = 0,82. \end{aligned}$$

Обозначения показаны на рис. 1.7: $F_{AD} = \sqrt{a^2 + s^2}$; $F_{BC'C} = F_{BC} = F_{AC}$; $F_{AC} = F_{BD} = s$; $F_{AB} = F_1 = F_2 = F_{CD} = a$.

32

Так как $F_1 = F_2 = 120 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, то $\varphi_{12} = \varphi_{21} = 0,82$.

Для масляной краски $\varepsilon = 0,95$.

Тогда

$$P_{\text{н}} = \frac{5,67 \cdot 0,82 \cdot 120 \cdot 10^{-3} [(393/100)^4 - (308/100)^4]}{1 + 2 \cdot 0,82 (1/0,95 - 1)} = 76,7 \text{ Вт/м.}$$

О т в е т : $P_{\text{н}} = 76,7 \text{ Вт/м.}$

1.4.12. Определить количество теплоты, передаваемое излучением от медной шины размером $100 \times 8 \text{ мм}$ к параллельно расположенной двутавровой балке шириной 120 мм . По шине протекает ток, в результате чего она нагревается до температуры $\vartheta = 95^\circ\text{C}$, температура балки $\vartheta_6 = 35^\circ\text{C}$. Балка окрашена черной масляной краской и находится на расстоянии 10 мм от шины, поверхность которой окислена.

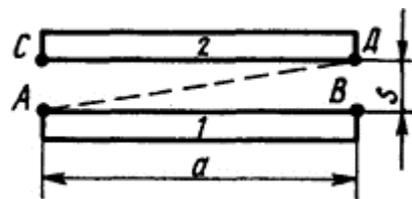


Рис. 1.7. Эскиз расположения шин

1.4.13. Определить коэффициент теплоотдачи конвекцией и излучением с поверхности круглой медной шины, окрашенной масляной краской и имеющей диаметр $d=45 \text{ мм}$. Шина находится на достаточном удалении от других частей электроустановки и расположена горизонтально в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$. Температура шины $\vartheta_{\text{ш}}=105^\circ\text{C}$.

Решение. Общий коэффициент теплоотдачи равен сумме коэффициентов теплоотдачи конвекцией и излучением. Для определения коэффициента теплоотдачи

конвекцией воспользуемся формулой (1.38) $Nu_m = C[GrPr]_m^n$, в которой определяющая температура $\vartheta_m = (\vartheta_{ш} + \vartheta_0)/2 = (105 + 35)/2 = 70^\circ\text{C}$ и $Pr_m = Pr_c$.

При этой температуре для воздуха [см. табл. П.9 и формулу (1.34)]

$$[GrPr]_m = \beta_m g \frac{L^3}{\nu_m^2} (\vartheta - \vartheta_0) Pr_m = \frac{9,81 \cdot 45^3 \cdot 10^{-9} (105 - 35) 0,694}{343 (20,02)^2 \cdot 10^{-12}} = 316\,000.$$

В соответствии с табл. 1.2 $C=0,54$; $n=1/4$, следовательно, из формулы (1.33),

$$k_{т.к} = Nu_m \lambda_m / L = 0,54 (316\,000)^{1/4} 2,96 \cdot 10^{-2} / (45 \cdot 10^{-3}) = 8,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Так как шина находится на достаточном удалении от других частей, то коэффициент теплоотдачи излучением определим с помощью формулы (1.52)

$$k_{т.и} = 5,67 \varepsilon [(T/100)^4 - (T_0/100)^4] / (\vartheta - \vartheta_0) = 5,67 \cdot 0,85 [(378/100)^4 - (308/100)^4] / (105 - 35) = 9,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Для масляной краски $\varepsilon = 0,95$. Тогда

$$k_{т} = k_{т.к} + k_{т.и} = 8,4 + 8,8 = 17,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

О т в е т : $k_{т}=17,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$

33

1.4.14. Определить суммарный коэффициент теплоотдачи с поверхности токопровода, изготовленного в виде стальной окрашенной масляной краской трубы, расположенной горизонтально в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$. Температура поверхности шины $\vartheta = 95^\circ\text{C}$, а ее наружный диаметр $d = 60 \text{ мм}$.

1.4.15. Определить допустимый ток, протекающий через низкоомный жидкометаллический реостат, изготовленный в виде двух концентрических труб (рис. 1.8). Внутренняя труба изготовлена из нержавеющей стали, а наружная - из меди. Изменение сопротивления осуществляется изменением уровня жидкого металла между этими трубами. Между трубами поддерживается глубокий вакуум, а внутри внутренней трубы с целью охлаждения пропускают воду со скоростью $w = 1 \text{ м/с}$. Температура воды на входе трубы $\vartheta_{вх} = 20^\circ\text{C}$, на выходе $\vartheta_{вых} = 60^\circ\text{C}$, а температура внутренней и наружной труб соответственно 65 и 40°C . Значения степени черноты внутренней трубы $\varepsilon_1=0,9$, наружной $\varepsilon_2=0,95$, удельное сопротивление нержавеющей стали $\rho = 0,9 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Р е ш е н и е . Определим мощности, которые будут передаваться от нагретой внутренней трубы воде и окружающему воздуху.

Средняя температура воды в трубе

$$\vartheta_{ж} = (\vartheta_{вх} + \vartheta_{вых})/2 = (20 + 60)/2 = 40^\circ\text{C}.$$

При этом параметры жидкости следующие:

$$\begin{aligned} \nu_{\text{ж}} &= 0,659 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \lambda_{\text{ж}} = 63,5 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \\ \beta_{\text{ж}} &= 3,87 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}; \quad \text{Pr}_{\text{ж}} = 4,31. \quad \text{Тогда } \text{Re}_{\text{ж}} = wd_1/\nu_{\text{ж}} = \\ &= 1 \cdot 12 \cdot 10^{-3}/(0,659 \cdot 10^{-6}) = 18 \ 200. \end{aligned}$$

Так как для $\text{Re} > 10000$ движение в трубе турбулентно, то используем критериальное уравнение (1.49):

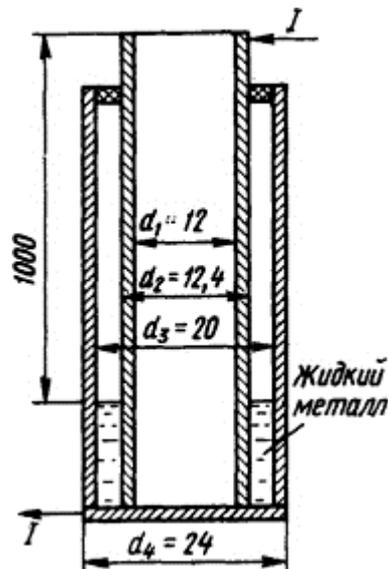


Рис. 1.8. Эскиз низкоомного реостата

$$\begin{aligned} \text{Nu}_{\text{ж}} &= 0,021 \text{ Re}_{\text{ж}}^{0,8} \text{Pr}_{\text{ж}}^{0,43} (\text{Pr}_{\text{ж}}/\text{Pr}_{\text{с}})^{0,25} \varepsilon_l \varepsilon_R = 0,021 \cdot 18 \ 200^{0,8} \cdot 4,31^{0,43} \times \\ &\times (4,31/2,71)^{0,25} = 113, \end{aligned}$$

где $\text{Pr}_{\text{с}} = 2,71$ - значение Прандтля при $\vartheta_{\text{с}} = 65^\circ\text{C}$, а $\varepsilon_l = \varepsilon_R = 1$.

Коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности трубы воде определим по формуле (1.33)

$$k_{\tau 1} = \text{Nu}_{\text{ж}} \lambda_{\text{ж}} / d_1 = 113 \cdot 63,5 \cdot 10^{-2} / (12 \cdot 10^{-3}) = 5980 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Таким образом, с внутренней поверхности трубы отдается количество теплоты

$$P_1 = k_{\tau 1} (\vartheta_{\text{с}1} - \vartheta_{\text{ж}}) F_1 = 5980 (65 - 40) 3,14 \cdot 12 \cdot 10^{-3} \cdot l = 5633 \text{ Вт}.$$

Количество теплоты, отдаваемое трубой из нержавеющей стали медной трубе, определим из формулы (1.51)

$$P_2 = P_n = \frac{5,67 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] F_2}{(1/\epsilon_1) + (F_2/F_3) [(1/\epsilon_2) - 1]} =$$

$$= \frac{5,67 [(338/100)^4 - (313/100)^4] 3,14 \cdot 12,4 \cdot 10^{-3}}{\frac{1}{0,9} + \frac{3,14 \cdot 12,4}{3,14 \cdot 20} \left(\frac{1}{0,95} - 1 \right)} = 6,6 \text{ Вт.}$$

Здесь $F_1 = 3,14 \cdot 12 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \text{ м}^2$; $F_2 = 3,14 \cdot 12,4 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \text{ м}^2$; $F_3 = 3,14 \cdot 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$. Полная мощность, которая может быть отведена от трубы из нержавеющей стали, $P = P_1 + P_2 = 5633 + 6,6 = 5639,6 \text{ Вт}$. Допустимый ток, который можно пропустить через реостат

$$I = \sqrt{\frac{PS}{\rho l}} = \sqrt{\frac{5639,6 \cdot 3,14 (12,4^2 - 12^2) 10^{-6}}{4 \cdot 0,9 \cdot 10^{-6} \cdot 1}} = 219 \text{ А,}$$

где $S = 3,14(12,4^2 - 12^2) 10^{-6} / 4 \text{ м}^2$.

О т в е т : $I = 219 \text{ А}$.

1.4.16. Определить длительно допустимый переменный ток частоты $f = 50 \text{ Гц}$ для медной окисленной шины, расположенной горизонтально на ребро в спокойном воздухе. Размеры поперечного сечения шины $60 \times 6 \text{ мм}$, допустимая температура для этой шины $\vartheta_{\text{доп}} = 80^\circ\text{C}$, а температура окружающей среды $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$.

1.4.17. Определить длительно допустимый ток для условий задачи 1.4.16, считая, что шина окрашена масляной краской.

1.4.18. Определить силу тока электрического нагревателя, предназначенного для обогрева комнаты, в которой температура воздуха $\vartheta_0 = 10^\circ\text{C}$. Нагреватель изготовлен из нихромовой проволоки диаметром $d = 1 \text{ мм}$, допустимая температура его $\vartheta_{\text{доп}} = 1000^\circ\text{C}$. Конструкция нагревателя такова, что для его расчета можно воспользоваться критериальным уравнением одиночного цилиндра. Расчет произвести с учетом теплоотдачи конвекцией и излучением. Степень черноты излучения нихрома $\epsilon = 0,75$.

1.4.19. Определить температуру наружной поверхности цилиндрической катушки индуктивности, имеющей 500 витков, намотанной круглым медным проводом, диаметр которого $d = 2 \text{ мм}$. Провод катушки имеет бумажную изоляцию. Внутренний диаметр катушки $D_{\text{вн}} = 70 \text{ мм}$, наружный $D_{\text{нар}} = 140 \text{ мм}$, высота $h = 70 \text{ мм}$. По ней протекает ток $I = 5 \text{ А}$. Теплоотдача происходит только с наружной боковой поверхности, а торцы и внутренняя поверхность теплоизолированы. Катушка достаточно удалена от других тел и находится в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$.

Решение. Будем считать, что средняя температура провода катушки равна температуре поверхности катушки. Тогда последняя определится из равенства

$$4I^2 \rho_0 (1 + \alpha \vartheta) l_{\text{ср}} N / \pi d^2 = (k_{\text{т.к}} + k_{\text{т.н}}) (\vartheta - \vartheta_0) F, \quad (\text{А})$$

Поскольку коэффициенты теплоотдачи $k_{\text{т.к}}$ и $k_{\text{т.н}}$ нелинейно зависят от температуры, задачу будем решать методом подбора. Зададимся некоторой

температурой поверхности катушки, например $\vartheta_1 = 95^\circ\text{C}$, и определим ток в катушке, при которой ее поверхность будет иметь эту температуру. В качестве определяющего размера возьмем высоту катушки $L = h = 70$ мм. Для определяющей температуры $\vartheta_m = (95+35)/2=65^\circ\text{C}$ из табл. П.9 находим: $\text{Pr}_m=0,695$; $\nu_m = 19,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\lambda_m = 2,93 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К); $\beta_m = 1/338$ К⁻¹. Тогда, используя формулу (1.34), получим

$$[\text{GrPr}]_m = \frac{0,695 \cdot 9,81 \cdot 70^3 \cdot 10^{-9} (95 - 35)}{338 \cdot 19,5^2 \cdot 10^{-12}} = 1,09 \cdot 10^6.$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией в соответствии с (1.33) и (1.38), поскольку $\text{Pr}_m \approx \text{Pr}_c$, для воздуха будет равен

$$k_{\text{т.к}} = \frac{0,54 (1,09 \cdot 10^6)^{1/4} 2,93 \cdot 10^{-2}}{70 \cdot 10^{-3}} = 7,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Коэффициент теплоотдачи излучением определим по формуле (1.52)

$$\begin{aligned} k_{\text{т.и}} &= \frac{5,67 \varepsilon [(T_1/100)^4 - (T_0/100)^4]}{\vartheta_1 - \vartheta_0} = \\ &= \frac{5,67 \cdot 0,95 [(368/100)^4 - (308/100)^4]}{95 - 35} = 8,38 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \end{aligned}$$

Для бумаги $\varepsilon=0,95$ (см. табл. П.12). Общий коэффициент теплоотдачи $k_t = 7,3+8,38 = 15,68$ Вт/(м²·К).

Из уравнения (А) и при $\vartheta_1 = 95^\circ\text{C}$ после некоторых вычислений

$$I = \sqrt{\frac{0,0362 k_t (\vartheta_1 - 35)}{1 + 0,0043 \vartheta_1}} = \sqrt{\frac{0,0362 \cdot 15,68 (95 - 35)}{1 + 0,0043 \cdot 95}} = 4,93 \text{ А.}$$

В условии задачи был задан ток $I=5$ А, Полученная $\Delta=(5-4,93) \cdot 100\%/5=1,4\%$ вполне достаточна. Если бы было получено значительное расхождение, то пришлось бы задаться новыми значениями ϑ_2 , ϑ_3 и т.д. до получения удовлетворительного совпадения.

О т в е т : $\vartheta=95^\circ\text{C}$.

1.4.20. Рассчитать температуру поверхности круглой медной шины диаметром $d=20$ мм, обдуваемой поперечным потоком воздуха, скорость которого $w = 0,5$ м/с. Температура воздуха $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$. Шина окислена и по ней протекает переменный ток $I = 1100$ А частоты $f=50$ Гц.

1.5. Расчет распространения теплоты путем теплопроводности в частях электрических аппаратов

В данном параграфе рассмотрены задачи стационарного и переходной режимов теплопроводности для случаев одномерных тепловых потоков. Задачи на стационарную теплопередачу составлены с учетом использования понятия теплового сопротивления, что существенно облегчает их решение. Приведены задачи для частей аппаратов как с внутренними источниками теплоты, так и без них.

В твердых частях электрических аппаратов теплота распространяется теплопроводностью, причем разнообразие конструктивных форм частей, по которым распространяется теплота, накладывает определенные трудности на расчет этих частей.

При решении задач используются следующие расчетные формулы и соотношения.

Закон Ома для теплопроводности

$$q_1 - q_2 = PR, \quad (1.56)$$

где $(\vartheta_1 - \vartheta_2)$ - перепад температур, К; P - тепловой поток, Вт; R_T - тепловое сопротивление, К/Вт (см. табл. П. 13).

Координата наиболее нагретого слоя в плоской стенке с внутренними равномерно распределенными источниками теплоты и двусторонней изоляцией (рис. 1.9) (формула А.Г. Сливинской)

$$r_{max} = \delta \frac{(R_2) + (\lambda_2/\lambda_1) + (1/k_2)}{(R_1) + (\lambda_1/\lambda_1) + (\lambda_2/\lambda_1) + (1/k_2) + (1/k_1)}, \quad (1.57)$$

где δ и λ - толщина, м, и теплопроводность стенки, Вт/(м·К), с источниками теплоты; Δ_1 и λ_1 - толщина, м, и теплопроводность, Вт/(м·К), левой изоляционной стенки без источников теплоты; Δ_2 и λ_2 - толщина, м, и теплопроводность, Вт/(м·К), правой изоляционной стенки без источников теплоты; k_{T1} и k_{T2} - коэффициенты теплоотдачи, Вт/(м²·К), с левой и правой изоляционных стенок в окружающую среду.

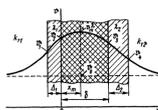


Рис. 1.9. Плоская стенка с равномерно распределенными источниками теплоты



Рис. 1.10. Цилиндрическая стенка с равномерно распределенными источниками теплоты

Для цилиндрической стенки с равномерно распределенными источниками теплоты (рис. 1.10) радиус наиболее нагретого слоя

$$r_{max} = \sqrt{\frac{(R - r_1)^2 + (R/k_2) + (R_2/k_2)}{\ln(R/r_2) + \lambda_1/(k_{T2}R) + \lambda_1/(k_{T1}r_1)}}, \quad (1.58)$$

где k_{T1} и k_{T2} - коэффициенты теплоотдачи, Вт/(м²·К), с внутренней и наружной поверхностей цилиндрической стенки в окружающую среду, а λ - коэффициент теплопроводности стенки.

Объемная плотность источников теплоты в катушке

$$q = \frac{UNP_2}{S_{\Sigma}^2 k_3} \quad (1.59)$$

где IN - магнитодвижущая сила, А; ρ - удельное сопротивление материала проводника катушки, Ом·м; $S_{ок}$ - площадь обмоточного окна, м²; k_3 - коэффициент заполнения обмоточного окна (см. табл. П.24).

37

Диаметр проводника катушки постоянного тока

$$d = \sqrt{\frac{4(IN)l_{cp}}{\pi U}} \quad (1.60)$$

где l_{cp} - длина среднего витка катушки, м; U - напряжение, на которое включена катушка, В.

Приведенный к внутренней поверхности катушки коэффициент теплоотдачи для катушки постоянного тока с ферромагнитным сердечником при условии плотного прилегания катушки к сердечнику [1]

$$\frac{1}{k_{ввн}} = \frac{f_{\Sigma} d_{\Sigma} m_{\Sigma}}{2k_{\Sigma} f_{\Sigma} l_{\Sigma} m_{\Sigma}} \quad (1.61)$$

где k_{Σ} - коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности магнитопровода, Вт/(м²·К); f_{Σ} - охлаждающая поверхность единицы длины наружной части магнитопровода, м²; S_m , λ_m - площадь поперечного сечения магнитопровода, м², и теплопроводность, Вт/(м·К), соответственно материала наружной части магнитопровода; $2l_m$ - длина наружной части магнитопровода, м; f_k - охлаждающая поверхность единицы длины внутренней части катушки, м²; l_k - длина катушки, м; $n = \sqrt{\frac{k_{\Sigma} f_{\Sigma}}{\lambda_{\Sigma} S_m}}$.

Приведенный к внутренней поверхности коэффициент теплоотдачи для катушки постоянного тока в случае наличия слоя изоляции и воздушного промежутка между магнитопроводом и катушкой

$$\frac{1}{k_{ввн}} = \frac{f_{\Sigma} d_{\Sigma} m_{\Sigma}}{2k_{\Sigma} f_{\Sigma} l_{\Sigma} m_{\Sigma}} + \frac{\delta_{\Sigma}}{\lambda_{\Sigma}} + \frac{\delta_{\Sigma}}{\lambda_{\Sigma}} \quad (1.62)$$

где δ_{Σ} , λ_{Σ} - толщина, м, и теплопроводность, Вт/(м·К), воздушного промежутка; λ_{Σ} , λ_{Σ} - то же, для слоя изоляции.

Теплопроводность замещающего тела для [1] непропитанных катушек, намотанных круглым медным проводом при рядовой намотке,

$$\lambda_{\Sigma} = 1,45 \sqrt{\lambda_{\Sigma} [(d/\delta) + 1]} - 1,37 \lambda_{\Sigma} \quad (1.63)$$

где λ_{Σ} и λ_{Σ} - соответственно теплопроводность изоляции обмоточного провода и воздуха, Вт/(м·К); d - диаметр голого провода, м; δ - толщина изоляции на проводе, м.

Коэффициент теплопроводности замещающего тела для пропитанных катушек [1] при рядовой намотке

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma} (d/\delta)^2 \quad (1.64)$$

где $\lambda_{\Sigma,л}$ - средняя теплопроводность изоляции проводника и пропиточного лака, Вт/(м·К).

Теплопроводность замещающего тела непитанных катушек, намотанных круглым медным проводом при шахматной намотке,

$$\lambda_1 = 2,18 \sqrt{\lambda_2 \lambda_3 \left(\frac{d}{r} + 1\right)} - 1,33 \lambda_0, \quad (1.63)$$

где обозначения те же, что и в (1.63).

Теплопроводность замещающего тела питанных катушек, намотанных круглым медным проводом при шахматной намотке,

$$\lambda_1 = 1,45 \lambda_0 \left(\frac{d}{r}\right)^{0,75}, \quad (1.64)$$

где обозначения те же, что и в (1.64).

Распределение температуры вдоль бесконечно длинного стержня, в торец которого входит тепловой поток P (Вт), а с наружной поверхности

38

теплоотдача происходит в окружающую среду с коэффициентом теплоотдачи k_T , Вт/(м²·К) [2],

$$\vartheta = \vartheta_0 + (\vartheta_{\text{макс}} - \vartheta_0) e^{-a_1 x}, \quad (1.65)$$

где ϑ - температура поверхности стержня, °С; $\vartheta_{\text{макс}}$ - максимальная температура в торце стержня, °С,

$$\vartheta_{\text{макс}} - \vartheta_0 = \frac{P}{\sqrt{2,35} f_c}, \quad (1.66)$$

S - площадь поперечного сечения стержня, м²; f_c - периметр поперечного сечения длины стержня, м:

$$a_1 = \sqrt{k_T / (\lambda S)},$$

x - координата длины, м, k_T - коэффициент теплоотдачи с поверхности стержня, Вт/(м²·К); λ - теплопроводность материала стержня, Вт/(м·К).

Длина стержня, с которой отводится в окружающую среду тепловой поток ΔP ,

$$x_1 = \frac{1}{a_1} \ln \frac{1}{1 - (\Delta P / P_{x=0})}, \quad (1.67)$$

где $P_{x=0}$ - тепловой поток, проходящий через сечение $x=0$, Вт.

Тепловой поток, который отводится с поверхности стержня длиной l в окружающую среду,

$$\Delta P = (\vartheta_{\text{макс}} - \vartheta_0) \sqrt{k_T f_c \lambda S} (1 - e^{-a_1 l}), \quad (1.70)$$

Распределение температуры вдоль стержня ограниченной длины [2]

$$\vartheta - \vartheta_0 = (\vartheta_{\max} - \vartheta_0) \frac{pe^{-a_1(l-x)} + e^{a_1(l-x)}}{pe^{-a_1x} + e^{a_1x}}, \quad (1.71)$$

где ϑ_{\max} - максимальная температура стержня при $x=0$, °C,

$$p = (a_1 - m)/(a_1 + m);$$

l - длина стержня, м, $m=k_T/\lambda$.

Суммарный тепловой поток, который отдается в окружающую среду со всей поверхности стержня (тепловой поток, проходящий через поперечное сечение стержня при $x=0$),

$$P = (\vartheta_{\max} - \vartheta_0) \sqrt{k_T f_c \lambda S} (1 - pe^{-2a_1 l}) / (1 + pe^{-2a_1 l}). \quad (1.72)$$

Для полуограниченного стержня неизменного сечения с равномерно распределенными источниками теплоты в нем при наличии внешнего источника теплоты на его торце зависимость температуры стержня от его длины [2]

$$\vartheta = (\vartheta_{\max} - \vartheta_{\infty}) e^{-a_1 x} + \vartheta_{\infty}; \quad (1.73)$$

$$\vartheta_{\max} - \vartheta_{\infty} = P_{0x} / \sqrt{k_T f \lambda S}, \quad (1.74)$$

где ϑ_{\max} - максимальная температура стержня, °C; P_{0x} - тепловой поток, входящий в торец стержня, Вт;

$$\vartheta_{\infty} - \vartheta_0 = qs / (k_T F), \quad (1.75)$$

ϑ_{∞} - температура поверхности стержня на удалении от торца, °C. q - объемная плотность источников теплоты, Вт/м³.

39

Распределение температур в стержне, имеющем ступенчато-изменяющееся сечение при условии наличия внутренних источников теплоты (рис. 1.11) [2]:

$$\vartheta_1 = (\vartheta_c - \vartheta_{1\infty}) e^{-a_1 x} + \vartheta_{1\infty}; \quad (1.76)$$

$$\vartheta_2 = (\vartheta_c - \vartheta_{2\infty}) e^{-b_1 x} + \vartheta_{2\infty}; \quad (1.77)$$

$$\vartheta_c = \frac{a_1 \vartheta_{1\infty} + b_1 \vartheta_{2\infty}}{a_1 + b_1}, \quad (1.78)$$

где

$$a_1 = \sqrt{k_{T1} f_1 / (\lambda S_1)}, \quad b_1 = \sqrt{k_{T2} f_2 / (\lambda S_2)};$$

$$\vartheta_{1\infty} = q_1 S_1 / (k_{T1} f_1) + \vartheta_0; \quad (1.79)$$

$$\vartheta_{2\infty} = q_2 S_2 / (k_{T2} f_2) + \vartheta_0. \quad (1.80)$$

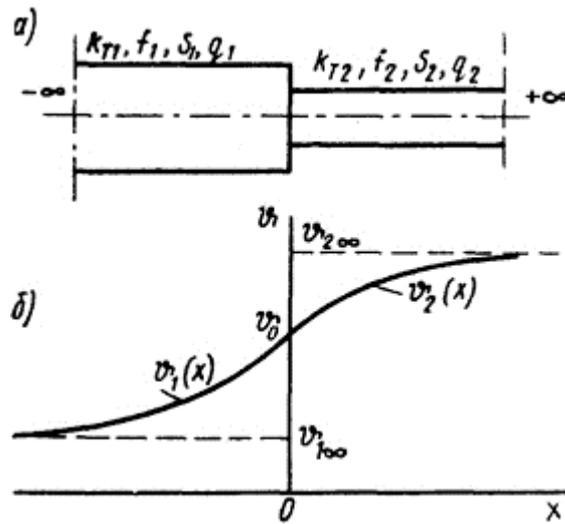


Рис. 1.11. Стержень с внутренними источниками теплоты со ступенчато изменяющимся поперечным сечением (а) и распределение температуры вдоль его длины (б)

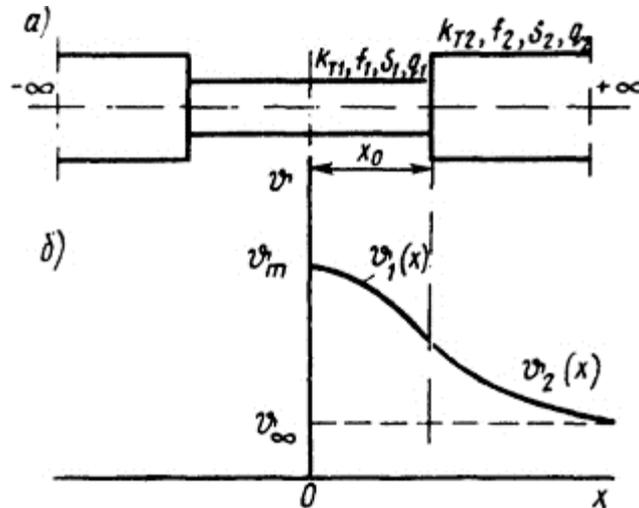


Рис. 1.12. Стержень с внутренними источниками теплоты с утоньшением (а) и распределение температуры вдоль его длины (б)

Распределение температур в стержне с внутренними источниками теплоты при наличии участка уменьшенного сечения в средней части стержня в установившемся режиме нагрева [2] (рис. 1.12):

$$\vartheta_1 = (\vartheta_{\text{макс}} - \vartheta_{1\infty}) \operatorname{ch} a_1 x + \vartheta_{0\infty}; \quad (1.81)$$

$$\vartheta_2 = \frac{a_1}{b_1} (\vartheta_{1\infty} - \vartheta_{\text{макс}}) e^{-b_1(x-x_0)} \operatorname{sh} a_1 x_0 + \vartheta_{2\infty}; \quad (1.82)$$

$$\vartheta_{\text{макс}} = \vartheta_{1\infty} - \frac{\vartheta_{1\infty} - \vartheta_{2\infty}}{\operatorname{ch} a_1 x_0 + \frac{a_1}{b_1} \operatorname{sh} a_1 x_0}. \quad (1.83)$$

Значения параметров a_1 и b_1 , а также температур $\vartheta_{1\infty}$ и $\vartheta_{2\infty}$ те же, что и в формулах (1.76), (1.77) и (1.78). Распределение температур в стержне с равномерно распределенными источниками теплоты при наличии участка увеличенного сечения [2] (рис. 1.13):

$$\vartheta_1 = (\vartheta_{\text{мин}} - \vartheta_{1\infty}) \operatorname{ch} a_1 x + \vartheta_{1\infty}; \quad (1.84)$$

$$\vartheta_2 = \vartheta_{2\infty} - \frac{a_1}{b_1} (\vartheta_{\text{мин}} - \vartheta_{1\infty}) e^{-b_1(x-x_0)} \operatorname{sh} a_1 x_0; \quad (1.85)$$

$$\vartheta_{\text{мин}} = \vartheta_{1\infty} + \frac{\vartheta_{2\infty} - \vartheta_{1\infty}}{\frac{a_1}{b_1} \operatorname{sh} a_1 x_0 + \operatorname{ch} a_1 x_0}. \quad (1.86)$$

Значения параметров a_1 , b_1 и температур $\vartheta_{1\infty}$ и $\vartheta_{2\infty}$ те же, что и в формулах (1.76), (1.77) и (1.78).

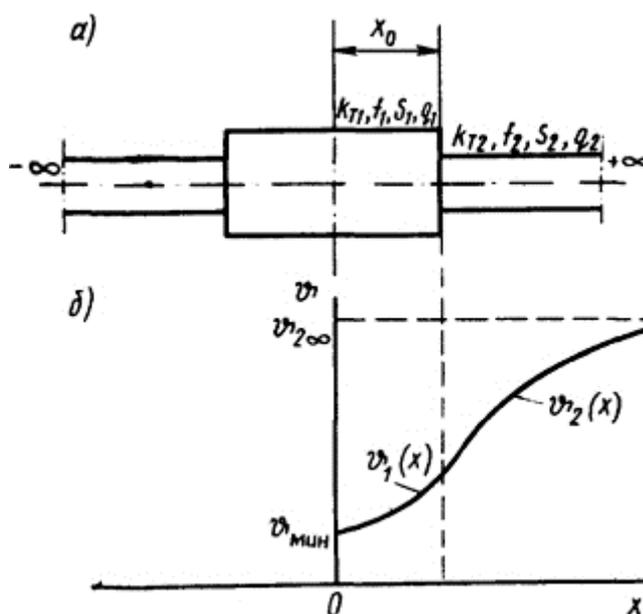


Рис. 1.13. Стержень с внутренними источниками теплоты с утолщением (а) и распределение температуры вдоль его длины (б)

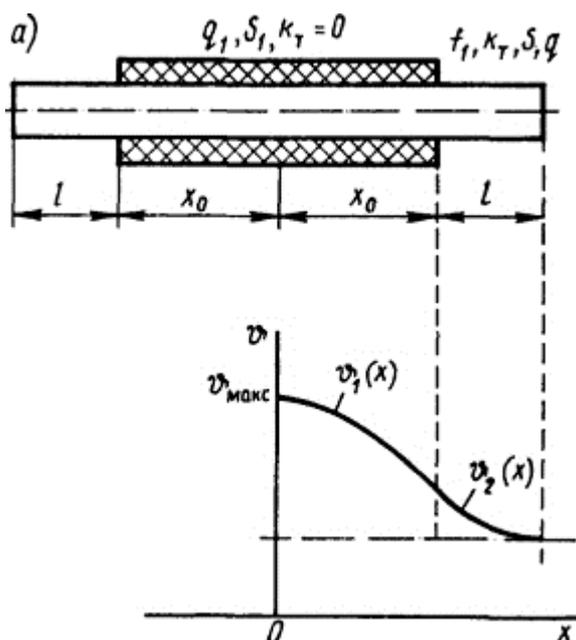


Рис. 1.14. Стержень с внутренними источниками теплоты с тепловой изоляцией в средней части его (а) и распределение температур вдоль его длины (б)

Распределения температур в однородном конечной длины стержне с равномерным распределением источников теплоты, в средней части покрытого слоем теплоизоляции с граничными условиями [2] (рис. 1.14):

$$\vartheta_2 - \vartheta_0 = \frac{qS}{k_{\tau}f} + \frac{qx_0 \operatorname{ch} a_1 [x - (x_0 + l)]}{a_1 \lambda \operatorname{sh} a_1 l}; \quad (1.87)$$

$$\vartheta_1 - \vartheta_0 = \frac{qS}{k_{\tau}f} + \frac{qx_0}{a_1 \lambda \operatorname{th} a_1 l} + \frac{q}{2\lambda} (x_0^2 - x^2), \quad (1.88)$$

$$\vartheta_{\max} = \vartheta_1 \text{ при } x = x_0.$$

1.5.1. Определить количество теплоты, передаваемое через 1 м² текстолитовой плоской стенки толщиной $\delta = 20$ мм. Разность температур на поверхностях стенки $\Delta \vartheta = 30^\circ\text{C}$.

Решение. Воспользуемся аналогом закона Ома для теплопроводности [см. формулу (1.56)]:

$$\Delta \vartheta = \vartheta_1 - \vartheta_2 = PR_{\tau}.$$

41

Тепловое сопротивление плоской стенки без источников теплоты (см. табл. П.13):

$$R_{\tau} = \delta / (\lambda S) = 20 \cdot 10^{-3} / (17 \cdot 10^{-2} \cdot 1) = 1,18 \cdot 10^{-1} \text{ К/Вт}.$$

Теплопроводность λ определим из табл. П. 14.

Тогда тепловой поток

$$P = \Delta \vartheta / R_{\tau} = 30 / (1,18 \cdot 10^{-1}) = 254 \text{ Вт}.$$

О т в е т : $P = 254$ Вт.

1.5.2. Определить перепады температур в слоях плоской стенки площадью $S=2$ м², которая выполнена из углеродистой стали толщиной $\delta_1=2$ мм и пенопласта толщиной $\delta_2=10$ мм, если количество теплоты, проходящее через стенку за 1 ч, составляет 1,9 кВт·ч. Теплопроводность стали $\lambda_1 = 54$ Вт/(м·К), пенопласта $\lambda_2=0,1$ Вт/(м·К).

1.5.3. Определить перепад температур в слое изоляции прямоугольной медной шины размером 100×10мм, покрытой слоем бумажной изоляции толщиной $\delta=2$ мм. В результате протекания по шине тока в каждом ее метре выделяется теплота $P=60$ Вт/м, которая отводится через слой изоляции к окружающему воздуху.

1.5.4. Рассчитать перепад температур в толще изоляции для условий задачи 1.5.3, если шина кроме бумажной изоляции покрыта еще слоем лакоткани толщиной $\delta = 1$ мм. Теплопроводность лакоткани $\lambda=0,15$ Вт/(м·К).

1.5.5. Определить максимальный ток для круглой алюминиевой шины диаметром $d = 38$ мм. Шина находится в трубе диаметром $d_{\text{тр}} = 40$ мм, температура поверхности шины

$\vartheta_{\text{ш}}=50^{\circ}\text{C}$, внутренней поверхности трубы $\vartheta_{\text{тр}}=35^{\circ}\text{C}$. Между шиной и трубой, которые расположены концентрично, находится спокойный сухой воздух.

1.5.6. Определить тепловое сопротивление и тепловой поток через чугунную стенку толщиной $\delta=10$ мм, которая является стенкой масляного бака и имеет площадь $S=2$ м², если известно, что температура масла в баке равна 85°C , а температура наружной поверхности бака - 45°C . Теплопроводность чугуна $\lambda = 47$ Вт/(м·К) при 0°C , температурный коэффициент теплопроводности $\beta = - 4 \cdot 10^{-4}$ К⁻¹.

1.5.7. Вычислить температуру поверхности токоведущего медного стержня диаметром $d = 38$ мм, заключенного внутри металлической трубы с внутренним диаметром $d_{\text{вн}}=40$ мм. По стержню протекает постоянный ток $I = 1800$ А, температура внутренней поверхности трубы $\vartheta_{\text{вн}}=30^{\circ}\text{C}$, между стержнем и трубой находится сухой воздух. Считать, что передача теплоты от поверхности стержня осуществляется только теплопроводностью. Учесть зависимость теплопроводности воздуха от температуры.

Решение. Для решения задачи воспользуемся законом Ома для теплопроводности по формуле (1.56) $\vartheta_{\text{ст}} - \vartheta_{\text{тр}} = PR_{\text{т}}$. Здесь $P = I^2 \rho_0 (1 + \alpha \vartheta_{\text{ст}}) / S$ -

42

тепловой поток, выделяемый в стержне и проходящий через воздушную прослойку в единицу времени, т.е. тепловая мощность;

$$R_{\text{т}} = \frac{\ln(d_{\text{вн}}/d)}{2\pi l \lambda(\vartheta)}$$

тепловое сопротивление цилиндрической воздушной прослойки: $\rho_0 = 1,62 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; $\alpha = 0,0043$.

Окончательно исходное уравнение получаем в виде

$$\vartheta_{\text{ст}} - \vartheta_{\text{тр}} = I^2 \rho_0 (1 + \alpha \vartheta_{\text{ст}}) \frac{l}{S} \frac{(\ln d_{\text{вн}}/d)}{2\pi l \lambda(\vartheta_{\text{ст}})}.$$

Решим данное уравнение относительно тока I и подставим в него числовые значения. После преобразования получим

$$I = \sqrt{9,25 \cdot 10^{-6} \frac{\vartheta_{\text{ст}} - 30}{1 + 0,0043 \vartheta_{\text{ст}}} \lambda [(\vartheta_{\text{ст}} + 30)/2]},$$

где $\lambda [(\vartheta_{\text{ст}}+30)/2]$ -зависимость теплопроводности от средней температуры воздуха $\vartheta_{\text{ст}} = (\vartheta_{\text{ст}}+30)/2$.

Зададимся несколькими значениями $\vartheta_{\text{ст}}$:

$\vartheta_{\text{ст}}, ^{\circ}\text{C}$	40	45	50
I, A	1470	1790	2050

и по этим данным построим график $I=I(\vartheta_{ст})$ (рис. 1.15), по которому для $I=1800$ А определяем $\vartheta_{ст}=45,2^{\circ}\text{C}$.

О т в е т : $\vartheta_{ст}=45,2^{\circ}\text{C}$.

1.5.8. Определить температуру прямоугольной алюминиевой шины с размерами поперечного сечения 100×10 мм, покрытой слоем бумажной изоляции толщиной $\delta=3$ мм, если известно, что по шине протекает постоянный ток $I=2000$ А. Температура наружной поверхности изоляции $\vartheta_{из}=40^{\circ}\text{C}$.

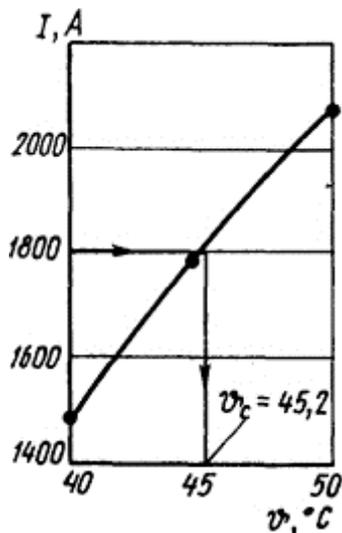


Рис. 1.15. Построение графика к задаче 1.5.7 и определение температуры стержня

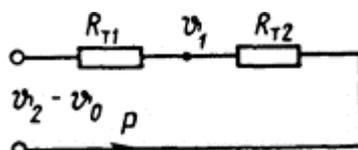


Рис. 1.16. Схема замещения

1.5.9. Определить перепад температур в толще изоляции $\Delta\vartheta$ и температуру медного бесконечно длинного стержня диаметром $d=20$ мм, покрытого слоем бакелизированной бумаги толщиной $\delta=5,0$ мм, если по нему протекает переменный ток $I=600$ А частоты $f=50$ Гц. Стержень находится в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0=35^{\circ}\text{C}$. Теплопроводность бакелизированной бумаги $\lambda=0,2$ Вт/(м·град).

Решение. Составим электрическую схему замещения (рис. 1.16) и запишем уравнение, аналогичное закону Ома для электрической цепи:

43

Тепловой поток, выделяющийся в стержне, определим из формулы (1.2); при $k_6=1$ $P=k_n I^2 \rho_0 (1+\alpha \vartheta_2)/S$. Он равен тепловому потоку через толщу изоляции на единице длины стержня; $R_{T1} = 1/k_r F$ - тепловое сопротивление потоку P от наружной поверхности изоляции воздуху;

$$R_{T2} = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d+2\delta}{d} -$$

тепловое сопротивление толщ изоляции; ϑ_2 - температура стержня; $k_{\text{п}}$ - коэффициент поверхностного эффекта, зависящий от $\sqrt{f/R_{100}}$; $S = \pi d^2/4$ - площадь поперечного сечения стержня; $k_{\text{т}} = 12[1 + 10^{-2}(\vartheta_1 - \vartheta_0)]$, Вт/(м²·К) - коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности к спокойному воздуху [см. формулу (1.14) и табл. 1.1]; $F = \pi(d+2\delta)$ - боковая поверхность единицы длины изолированного стержня; ϑ_1 - температура наружной поверхности изоляции.

Для условий данной задачи $k_{\text{п}} \approx 1$; $\rho_0 = 1,62 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; $\alpha = 0,0043$ К⁻¹.

Таким образом, закон Ома запишется в виде

$$\frac{4I^2\rho_0(1+\alpha\vartheta_2)}{\pi d^2} \left[\frac{1}{12[1+10^2(\vartheta_1-\vartheta_0)]\pi(d+2\delta)} + \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d+2\delta}{d} \right] = \vartheta_2 - \vartheta_0.$$

Для нахождения ϑ_2 и ϑ_1 составим еще одно уравнение, исходя из схемы замещения, а именно: $PR_{\text{т}2} = \vartheta_2 - \vartheta_1$, тогда

$$\frac{4I^2\rho_0(1+\alpha\vartheta_2)}{\pi d^2} = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d+2\delta}{d} = \vartheta_1 - \vartheta_0.$$

После подстановки и преобразований получим систему уравнений

$$\frac{16,4 + 0,066\vartheta_2}{1 + 10^{-2}(\vartheta_1 - 35)} = 0,98\vartheta_2 - 41; \quad 0,98\vartheta_2 - \vartheta_1 = 6,1,$$

решая которую найдем: $\vartheta_2 = 60^\circ\text{C}$; $\vartheta_1 = 52,8^\circ\text{C}$; $\Delta\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1 = 7,2^\circ\text{C}$.

О т в е т : $\Delta\vartheta = 7,2^\circ\text{C}$; $\vartheta_2 = 60^\circ\text{C}$.

1.5.10. Определить температуру наружной поверхности изоляции круглого медного проводника диаметром $d=40$ мм, по которому протекает ток $I=2250$ А, в результате чего поверхность оказывается нагретой до температуры $\vartheta=60^\circ\text{C}$. Проводник покрыт двумя изоляционными слоями: слоем бумаги с теплопроводностью $\lambda_1=0,1$ Вт/(м·К) и слоем лакоткани с теплопроводностью $\lambda_2=0,2$ Вт/(м·К). Толщина бумажной изоляции $\delta_1=4$ мм; толщина изоляции из лакоткани $\delta_2=6$ мм.

1.5.11. Вычислить допустимую силу тока алюминиевого проводника круглого поперечного сечения диаметром $d=40$ мм, покрытого двумя слоями изоляции: слоем бумаги, толщина которого $\delta_1=4$ мм, и слоем лакоткани, толщина которого $\delta_2=6$ мм. Допустимая температура наружной поверхности изоляции $\vartheta_2=70^\circ\text{C}$, внутренней поверхности $\vartheta_1=80^\circ\text{C}$. Теплопроводность для бумаги $\lambda_1=0,1$ Вт/(м·К), для лакоткани $\lambda_2=0,2$ Вт/(м·К).

1.5.12. Определить критический диаметр изоляции и допустимую силу тока для круглой медной шины диаметром $d=22$ мм, которая изолирована слоем стеклоткани, изготовленной на кремнийорганике.

44

Максимально допустимая температура изоляции $\vartheta_{\text{доп}}=180^\circ\text{C}$. Шина находится в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0=35^\circ\text{C}$, коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности стеклоткани к окружающей среде $k_{\text{т}}=10$ Вт/(м²·К). Теплопроводность изоляции $\lambda_{\text{из}}=0,25$ Вт/(м·К).

1.5.13. Определить допустимую плотность тока медного круглого проводника диаметром $d=2$ мм, если толщина резиновой изоляции на нем такова, что наружный ее диаметр равен критическому. Допустимая температура для резиновой- изоляции $\vartheta_{\text{доп}}=60^\circ\text{C}$, теплопроводность $\lambda=0,16$ Вт/(м·К); проводник находится в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0=35^\circ\text{C}$, коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности изоляции воздуху $k_{\text{т}}=0,9$ Вт/(м²·К).

1.5.14. Определить полное тепловое сопротивление алюминиевой шины, поперечное сечение которой 120×10 мм. Шина расположена горизонтально в спокойном воздухе. В результате протекания по ней тока она нагрелась до температуры $\vartheta=90^\circ\text{C}$.

Тепловое сопротивление шины определять как тепловое сопротивление плоской стенки с равномерно распределенными в ней источниками теплоты. Учесть зависимость теплопроводности от температуры и предположить, что теплота равномерно отводится от широких сторон, шины, а шина находится в спокойном воздухе с температурой $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$. Коэффициент теплоотдачи с поверхности шины $k_{\text{т}} = 5$ Вт/(м²·К).

1.5.15. Вычислить наибольшую температуру в стальной шине размером 100×10 мм, по которой протекает постоянный ток $I=1000$ А, шина расположена в спокойном воздухе таким образом, что теплоотдача с ее поверхности в окружающее пространство происходит с одной широкой ее плоскости. Коэффициент теплоотдачи с поверхности шины окружающему воздуху $k_{\text{т}}=10$ Вт/(м²·К), а температура окружающего воздуха $\vartheta_0=35^\circ\text{C}$. Удельное сопротивление стали $\rho=13\cdot 10^{-8}$ Ом·м и теплопроводность $\lambda =40$ Вт/(м·К) принять не зависящими от температуры.

Р е ш е н и е . Воспользуемся выражением закона Ома для теплопроводности типа (1.56)

$$\vartheta_{\text{ш}} - \vartheta_0 = P(R_{\text{т1}} + R_{\text{т2}}).$$

Мощность, выделяемую в единице длины шины, определим из (1.2). Так как $k_{\text{н}}=k_{\text{в}}=1$, то

$$P = I^2\rho/S = 10^6 \cdot 13 \cdot 10^{-8} / (100 \cdot 10 \cdot 10^{-6}) = 130 \text{ Вт/м}.$$

Тепловые сопротивления в соответствии с табл. П.13.

$$R_{\tau 1} = \vartheta / (2\lambda S) = 10 \cdot 10^{-3} / (2 \cdot 40 \cdot 100 \cdot 10^{-3} \cdot 1) = 0,00125 \text{ К/Вт};$$

$$R_{\tau 2} = 1 / (k_{\tau} F) = 1 / (10 \cdot 100 \cdot 10^{-3} \cdot 1) = 1 \text{ К/Вт}.$$

Здесь $F=S=100 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$.

Тогда $\vartheta_{\text{ш}} = 130 (0,00125 + 1) + 35 = 165^{\circ}\text{С}$.

О т в е т: $\vartheta_{\text{ш}} = 165^{\circ}\text{С}$.

45

1.5.16. Решить задачу 1.5.15 при условии, что теплоотдача происходит равномерно с двух сторон полосы, а остальные данные остались без изменения.

1.5.17. Определить наибольшую температуру в шине, поперечные размеры которой $100 \times 10 \text{ мм}$, обтекаемой потоком сухого воздуха с такой скоростью, что коэффициент теплоотдачи с боковых широких ее сторон $k_{\tau} = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. По шине протекает постоянный ток $I=4000 \text{ А}$. Удельное сопротивление материала шины $\rho = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, теплопроводность $\lambda = 400 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, температура воздуха $\vartheta_0 = 20^{\circ}\text{С}$.

1.5.18. Определить наибольшую температуру и температуру наружной поверхности трубы, по которой протекает переменный ток $I=450 \text{ А}$ частоты $f=50 \text{ Гц}$. Вся теплота, выделяющаяся в трубе, отдается с ее наружной поверхности спокойному окружающему воздуху. Коэффициент теплоотдачи с поверхности трубы $k_{\tau}=25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, температура воздуха $\vartheta_0=35^{\circ}\text{С}$, наружный диаметр трубы $d_{\text{нар}}=88,5 \text{ мм}$, внутренний $d_{\text{вн}}=3 \text{ дюйма}$.

Р е ш е н и е. Исходными уравнениями при решении задачи будут $\vartheta_{\text{макс}} - \vartheta_0 = P(R_{\tau 1} + R_{\tau 2})$ и $\vartheta_{\text{макс}} - \vartheta_{\text{нар}} = PR_{\tau 1}$. Тепловые сопротивления на длине $l=1 \text{ м}$ определим на основании табл. П. 13.

$$\begin{aligned} R_{\tau 1} &= 1 / (4\pi\lambda) - r^2 \ln(R/r) / [2\pi\lambda (R^2 - r^2)] = \\ &= 1 / (4 \cdot 3,14 \cdot 40) - 37^2 \cdot 10^{-6} \ln(44,25/37) / [2 \cdot 3,14 \cdot 40 \times \\ &\quad \times (44,25^2 \cdot 10^{-6} - 37^2 \cdot 10^{-6})] = 0,0003 \text{ К} \cdot \text{м} / \text{Вт}; \\ R_{\tau 2} &= 1 / (k_{\tau} F) = 1 / (25 \cdot 3,14 \cdot 88,5 \cdot 10^{-3}) = 0,144 \text{ К} \cdot \text{м} / \text{Вт}, \end{aligned}$$

где $r = 37 \text{ мм}$ и $R = 44,25 \text{ мм}$ - соответственно внутренний и наружный радиусы трубы, а $\lambda=40 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ - теплопроводность стали.

Мощность P , выделяемую в единице длины стальной трубы, определяем из формулы (1.6), приняв в качестве числового коэффициента максимальное значение

$$P = 3,25 \cdot 10^{-4} [450 / (3,14 \cdot 88,5 \cdot 10^{-3})]^{5/3} \cdot 3,14 \cdot 88,5 \cdot 10^{-3} \sqrt{50} = 143 \text{ Вт}/\text{м}.$$

$$\text{Тогда } \vartheta_{\text{макс}} = 143 (0,0003 + 0,144) + 35 = 55,63^{\circ}\text{С}; \vartheta_{\text{макс}} - \vartheta_{\text{нар}} = 143 \cdot 0,0003 = 0,04^{\circ}\text{С}; \vartheta_{\text{нар}} = 55,59^{\circ}\text{С}.$$

О т в е т: $\vartheta_{\text{макс}} = 55,63^{\circ}\text{С}; \vartheta_{\text{нар}} = 55,59^{\circ}\text{С}$.

Тогда $\vartheta_{\text{макс}}=143(0,0003+0,0144)+35=55,63^{\circ}\text{C}$; $\vartheta_{\text{макс}}-\vartheta_{\text{нар}}=143\cdot 0,0003=0,04^{\circ}\text{C}$;
 $\vartheta_{\text{нар}}=55,59^{\circ}\text{C}$.

О т в е т : $\vartheta_{\text{макс}}=55,63^{\circ}\text{C}$; $\vartheta_{\text{нар}}=55,59^{\circ}\text{C}$.

1.5.19. Определить температуру оси круглой шины диаметром $d=15$ мм. По шине протекает ток $I=6000$ А. Температура потока воды, который ее обтекает, $\vartheta_0=25^{\circ}\text{C}$. Коэффициент теплоотдачи с поверхности шины $k_{\tau}=1000$ Вт/(м²·К). Удельное сопротивление материала шины $\rho=2,2\cdot 10^{-8}$ Ом·м, теплопроводность $\lambda=400$ Вт/(м·К).

1.5.20. Найти температуру наиболее нагретого слоя, его координату и температуры поверхностей изоляции плоской алюминиевой шины размером 120×10 мм, по которой протекает постоянный ток $I=2000$ А. Шина с одной широкой стороны изолирована пластиной текстолита толщиной $\Delta_1=10$ мм, а другой стороной прилегает к стенке из асбоцемента, толщина которой $\Delta_2=20$ мм. Шина находится в спокойном воздухе, температура которого

46

$\vartheta_0=35^{\circ}\text{C}$. Коэффициенты теплоотдачи с поверхности текстолита $k_{\tau 1}=20$ Вт/(м²·К), а с поверхности асбоцемента $k_{\tau 2}=15$ Вт/(м²·К). Удельное сопротивление алюминия принять независимым от температуры и равным $\rho=2,9\cdot 10^{-8}$ Ом·м, его теплопроводность $\lambda=210$ Вт/(м·К), теплопроводность текстолита $\lambda_1=0,15$ Вт/(м·К), асбоцемента $\lambda_2=0,6$ Вт/(м·К).

Р е ш е н и е . Определим координату наиболее нагретого слоя в шине по формуле (1.57)

$$\begin{aligned} x_{\text{макс}} &= \delta \frac{\delta/(2\lambda) + \Delta_2/\lambda_2 + 1/k_{\tau 2}}{\delta/\lambda + \Delta_1/\lambda_1 + \Delta_2/\lambda_2 + 1/k_{\tau 1} + 1/k_{\tau 2}} = \\ &= \frac{10\cdot 10^{-3}/(2\cdot 210) + 20\cdot 10^{-3}/0,6 + 1/15}{\frac{10\cdot 10^{-3}}{210} + \frac{10\cdot 10^{-3}}{0,15} + \frac{20\cdot 10^{-3}}{0,6} + \frac{1}{20} + \frac{1}{15}} 10\cdot 10^{-3} = 6,15\cdot 10^{-3} \text{ м}. \end{aligned}$$

Объемная плотность источников теплоты, выделяющейся в шине,

$$q = j^2\rho = [2000/(1200\cdot 10^{-6})]^2 2,9\cdot 10^{-8} = 8\cdot 10^4 \text{ Вт/м}^3,$$

где $j=I/S$; $S=1200\cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

где $j=I/S$, $S=1200\cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

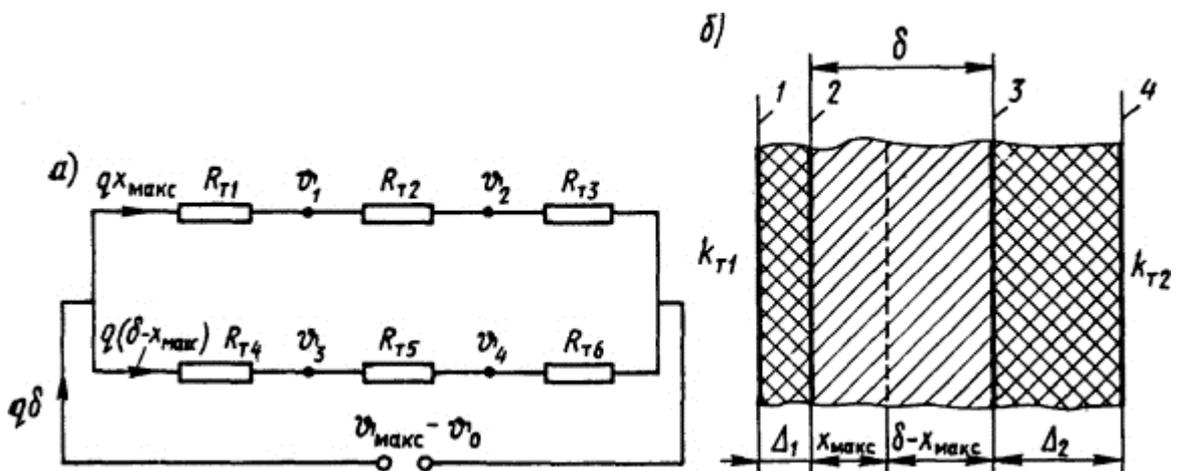


Рис. 1.17. Схема замещения (а) и эскиз плоской стенки с равномерно распределенными источниками теплоты (б)

Эквивалентная схема замещения представлена на рис. 1.17, а. Здесь ϑ_1 , ϑ_2 , ϑ_3 и ϑ_4 - температуры стенок 1, 2, 3 и 4 соответственно (рис. 1.17, б):

$$R_{T1} = x_{\max}/(2\lambda) = 6,15 \cdot 10^{-3}/2 \cdot 210 = 1,46 \cdot 10^{-5} \text{ К} \cdot \text{м}^2/\text{Вт};$$

$$R_{T2} = \Delta_1/\lambda_1 = 10 \cdot 10^{-3}/0,15 = 66,7 \cdot 10^{-3} \text{ К} \cdot \text{м}^2/\text{Вт};$$

$$R_{T3} = 1/k_{T1} = 1/20 = 50 \cdot 10^{-3} \text{ К} \cdot \text{м}^2/\text{Вт};$$

$$R_{T4} = (\delta - x_{\max})/(2\lambda) = 3,85 \cdot 10^{-3}/(2 \cdot 210) = 0,92 \cdot 10^{-5} \text{ К} \cdot \text{м}^2/\text{Вт};$$

$$R_{T5} = \Delta_2/\lambda_2 = 20 \cdot 10^{-3}/0,6 = 33,4 \cdot 10^{-3} \text{ К} \cdot \text{м}^2/\text{Вт};$$

$$R_{T6} = 1/k_{T2} = 1/15 = 66,7 \cdot 10^{-3} \text{ К} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}.$$

Из уравнения $\vartheta_{\max} - \vartheta_0 = qx_{\max}(R_{T1} + R_{T2} + R_{T3}) = 8 \cdot 10^4 \cdot 6,15 \cdot 10^{-3} \cdot (1,46 \cdot 10^{-5} + 66,7 \cdot 10^{-3} + 50 \cdot 10^{-3}) = 57^\circ\text{C}$ температура наиболее нагретого слоя $\vartheta_{\max} = 92^\circ\text{C}$.

47

Исходя из закона Ома (1.56) и рис. 1.17, а, $\vartheta_{\max} - \vartheta_0 = qx_{\max}R_{T1} = 8 \cdot 10^4 \cdot 6,15 \cdot 10^{-3} \cdot 1,46 \cdot 10^{-5} = 0,0072^\circ\text{C}$, откуда $\vartheta_1 = 91,9928 \approx 92^\circ\text{C} = \vartheta_{\max}$.

Аналогично определяем: $\vartheta_2 = 59,5^\circ\text{C}$; $\vartheta_3 \approx \vartheta_{\max} = 92^\circ\text{C}$; $\vartheta_4 = 55,6^\circ\text{C}$.

О т в е т : $\vartheta_{\max} = 92^\circ\text{C}$; $\vartheta_{\max} = 6,15 \text{ мм}$; $\vartheta_1 = 92^\circ\text{C}$; $\vartheta_2 = 59,5^\circ\text{C}$; $\vartheta_3 = 55,6^\circ\text{C}$.

1.5.21. Найти координату наиболее нагретого слоя, значение наибольшей температуры и температуру на поверхностях стальной шины с поперечными размерами $100 \times 10 \text{ мм}$, расположенной горизонтально в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$. По шине протекает постоянный ток $I = 1000 \text{ А}$. Шина находится между двумя пластинами из изоляционного материала, которые изолируют ее широкие стороны. С одной стороны изоляционная пластина имеет толщину $\Delta_1 = 10 \text{ мм}$ и изготовлена из фторопласта-4, с другой стороны имеет толщину $\Delta_2 = 20 \text{ мм}$ и изготовлена из электрокартона. Коэффициент теплоотдачи с поверхностей фторопласта $k_{T1} = 8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, электрокартона $k_{T2} = 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Удельное сопротивление стали $\rho = 14 \cdot 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$,

теплопроводность стали $\lambda=45$ Вт/(м·К), фторопласта $\lambda_1 = 0,3$ Вт/(м·К), электрокартона $\lambda_2=0,2$ Вт/(м·К).

1.5.22. Определить температуры поверхностей стальной трубчатой шины, охлаждаемой с наружной стороны потоком воздуха, с внутренней - потоком воды. По шине протекает постоянный ток $I=1250$ А. Внутренний диаметр шины $d_{вн}=3/8$ дюйма, наружный $d_{нар}=17$ мм. Коэффициенты теплоотдачи воде $k_{т1} = 1000$ Вт/(м²·К), воздуху $k_{т2}=100$ Вт/(м²·К), температура воды и воздуха $\vartheta_{01} = \vartheta_{02} = \vartheta = 20^\circ\text{C}$. Удельное сопротивление стали принять равным $\rho=15 \cdot 10^{-8}$ Ом·м и не зависящим от температуры, теплопроводность $\lambda = 45$ Вт/(м·К).

Р е ш е н и е . Радиус наиболее нагретого слоя определим по формуле

$$r_{\text{макс}} = \sqrt{\frac{0,5(R^2 - r^2) + \frac{\lambda R}{k_{т2}} + \frac{\lambda r}{k_{т1}}}{\ln \frac{R}{r} + \frac{\lambda}{k_{т2}R} + \frac{\lambda}{k_{т1}r}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{0,5\left(\frac{17^2}{4} - \frac{9,5^2}{4}\right) 10^{-6} + \frac{45 \cdot 17 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 100} + \frac{45 \cdot 9,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1000}}{\ln \frac{17}{9,5} + \frac{45}{100 \cdot 0,5 \cdot 17 \cdot 10^{-3}} + \frac{45}{1000 \cdot 0,5 \cdot 9,5 \cdot 10^{-3}}}} =$$

$$= 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Объемная плотность источников теплоты в стенке трубы

$$q = j^2 \rho = \left(\frac{1250 \cdot 4}{3,14 (17^2 - 9,5^2) 10^{-6}} \right)^2 15 \cdot 10^{-8} = 960 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^3.$$

48

Весь расчет будем вести для длины трубы $l=1$ м. Тепловое сопротивление от наиболее нагретого слоя к наружной поверхности определим из табл. П.13:

$$R_{т2} = \frac{1}{4\pi\lambda} - \frac{r_{\text{макс}} \ln(R/r_{\text{макс}})}{2\pi\lambda(R^2 - r_{\text{макс}}^2)} = \frac{1}{4 \cdot 3,14 \cdot 45} -$$

$$- \frac{8^2 \cdot 10^{-6} \ln(17/16)}{2 \cdot 3,14 \cdot 45 (17^2/4 - 8^2) 10^{-6}} = 0,12 \cdot 10^{-3} \text{ К} \cdot \text{м/Вт}.$$

Тепловое сопротивление от наружной поверхности трубы к охлаждающему воздуху (см. табл. П.13)

$$R_{т3} = 1/(\pi d_{нар} k_{т2}) = 1/(3,14 \cdot 17 \cdot 10^{-3} \cdot 100) = 0,188 \text{ К} \cdot \text{м/Вт}.$$

Из равенства, аналогичного формуле (1.56),

$$\begin{aligned} \vartheta_{\text{макс}} - \vartheta_0 &= q\pi (R^2 - r_{\text{макс}}^2) (R_{T2} + R_{T1}) = \\ &= 960 \cdot 10^4 \cdot 3,14 (17^2/4 - 8^2) 10^{-6} (0,12 \cdot 10^{-3} + 0,188) = 45^\circ\text{C} \end{aligned}$$

наибольшая температура $\vartheta_{\text{макс}}=65^\circ\text{C}$.

Температура наружной поверхности стенки трубы в соответствии с законом Ома вида (1.56)

$$\begin{aligned} \vartheta_{\text{нар}} &= \vartheta_{\text{макс}} - q\pi (R^2 - r_{\text{макс}}^2) R_{T2} = \\ &= 65 - 960 \cdot 10^4 \cdot 3,14 (17^2/4 - 8^2) 10^{-6} \cdot 0,12 \cdot 10^{-3} = 65^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Температура внутренней поверхности трубы

$$\begin{aligned} \vartheta_{\text{вн}} &= \vartheta_0 + q\pi (r_{\text{макс}}^2 - r_{\text{вн}}^2) / (\pi d_{\text{вн}} k_{T1}) = \\ &= 20 + 960 \cdot 10^4 \cdot 3,14 (8^2 - 9,5^2/4) 10^{-6} / (3,14 \cdot 9,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1000) = 62^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

О т в е т: $\vartheta_{\text{вн}}=62^\circ\text{C}$; $\vartheta_{\text{нар}}=65^\circ\text{C}$.

О т в е т: $\vartheta_{\text{вн}}=62^\circ\text{C}$; $\vartheta_{\text{нар}}=65^\circ\text{C}$.

1.5.23. Определить температуры поверхностей медного токопровода, изготовленного в виде трубы с $d_{\text{нар}}=40$ мм, $d_{\text{вн}}=36$ мм, если известно, что по токопроводу протекает ток $I=2500$ А, а с внутренней и наружной поверхностями трубопровода коэффициенты теплоотдачи равны $k_T=200$ Вт/(м²·К) за счет масляного охлаждения. Температура масла $\vartheta_0=35^\circ\text{C}$.

1.5.24. Найти максимальную температуру, а также температуры поверхностей катушки постоянного тока, имеющей 1270 витков медного провода марки ПЭВТЛ, намотанных рядовой намоткой без пропитки. Размеры катушки даны на рис. 1.18. Диаметр провода $d=0,35$ мм, толщина

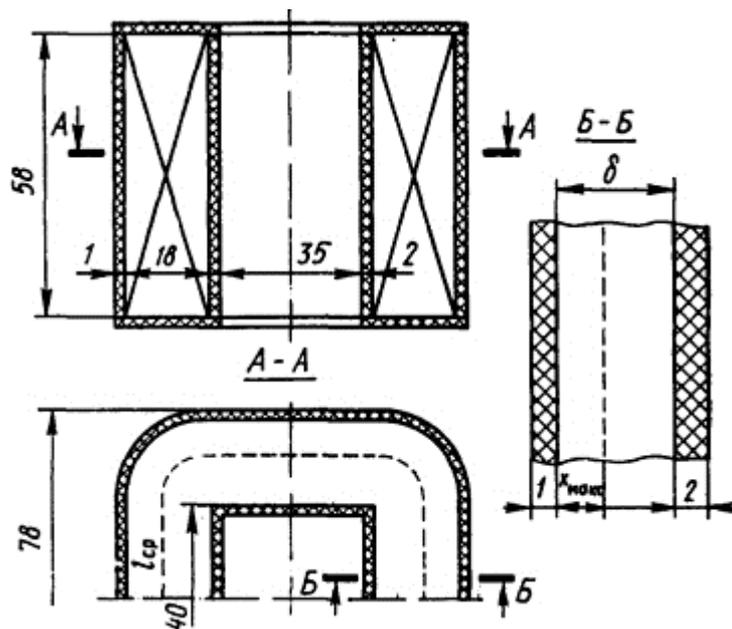


Рис. 1.18. Эскиз катушки

слоя изоляции на нем $\delta = 0,02$ мм. По катушке протекает ток $I=0,54$ А. Катушка находится в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0=35^\circ\text{C}$. Каркас изготовлен из текстолита, на наружной поверхности имеется слой лакоткани, коэффициент теплоотдачи с поверхности которой $k_{т1}=8$ Вт/(м²·К), с внутренней поверхности катушки $k_{т2}=12$ Вт/(м²·К). Удельное сопротивление меди принять независимым от температуры и равным $\rho=2,0\cdot 10^{-8}$ Ом·м, теплопроводность текстолита $\lambda_1 = 0,15$ Вт/(м·К), лакоткани $\lambda_2 = 0,5$ Вт/(м·К).

Решение. Решение задачи будем искать для сечения *Б-Б*. Объемная плотность источников теплоты в катушке определится из формулы

$$q = \frac{4I^2\rho Nl_{ср}/(\pi d^2)}{S_{ок}l_{ср}} = \frac{I^2\rho N4}{S_{ок}\pi d^2} = \frac{0,54^2 \cdot 2 \cdot 10^{-8} \cdot 1270 \cdot 4}{1040 \cdot 10^{-6} \cdot 3,14 \cdot 0,35^2 \cdot 10^{-6}} = 7,32 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^3.$$

Здесь $S_{ок}=1040 \cdot 10^{-6}$ м² - площадь обмоточного окна.

Теплопроводность замещающего тела для слоя катушки определим из формулы (1.63)

$$\lambda_3 = 1,45 \sqrt{\lambda_{из}\lambda_в \left(\frac{d}{\delta_1} - 1 \right)} - 1,57\lambda_в = 1,45 \sqrt{0,134 \cdot 3 \cdot 10^{-2} (0,35/0,02 - 1)} - 1,57 \cdot 3 \cdot 10^{-2} = 0,133 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

Здесь $\lambda_{из}=0,134$ Вт/(м·К) (см. табл. П.15); $\lambda_в=3 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К). Зная значения q и λ , можем решать задачу, применяя формулы для плоской стенки с равномерно распределенными источниками теплоты.

Координата наиболее нагретого места в катушке $x_{\text{макс}} = 8,3$ мм. Дальнейшее решение задачи совершенно аналогично решению задачи 1.5.20 с такой же эквивалентной схемой замещения. Следуя решению задачи 1.5.20, получим: $\vartheta_{\text{макс}}=138^\circ\text{C}$; $\vartheta_{\text{вн}}=110^\circ\text{C}$; $\vartheta_{\text{нар}}=94^\circ\text{C}$.

О т в е т : $\vartheta_{\text{макс}}=138^\circ\text{C}$; $\vartheta_{\text{вн}}=110^\circ\text{C}$; $\vartheta_{\text{нар}}=94^\circ\text{C}$.

1.5.25. Решить задачу 1.5.24 при условии, что ток, протекающий через катушку, $I=0,6$ А, катушка пропитана изоляционным лаком с теплопроводностью $\lambda_{\text{лак}}=0,116$ Вт/(м·К). Определить перепад температур в слоях изоляционного каркаса и лакоткани и построить график изменения температуры по сечениям слоя катушки, изоляционного каркаса и лакоткани.

1.5.26. Рассчитать наибольшую температуру, радиус наиболее нагретого слоя и температуру внутренней и наружной поверхностей цилиндрической бескаркасной катушки постоянного тока, которая намотана круглым медным проводом диаметром $d = 4$ мм. Провод изолирован бумажной изоляцией толщиной $\delta = 0,5$ мм. Катушка расположена в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$. Коэффициенты теплоотдачи с внутренней и наружной поверхностей одинаковы: $k_{т} = 7$ Вт/(м²·К). Внутренний диаметр катушки $D_{\text{вн}}=100$ мм, наружный диаметр $D_{\text{нар}}=156$ мм, ее высота $h=170$ мм. По катушке протекает постоянный ток, плотность которого $j=1,5$ А/мм². Катушка намо-

рядовой намоткой и имеет 250 витков. Удельное сопротивление меди $\rho = 2,3 \cdot 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ принять независимым от температуры, теплопроводность бумажной изоляции $\lambda_{\text{из}} = 0,1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, воздуха $\lambda_{\text{в}} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

1.5.27. Найти температуру наиболее нагретого слоя, а также температуры поверхностей катушки постоянного тока с шихтованным магнитопроводом (рис. 1.19, а). Число витков медного

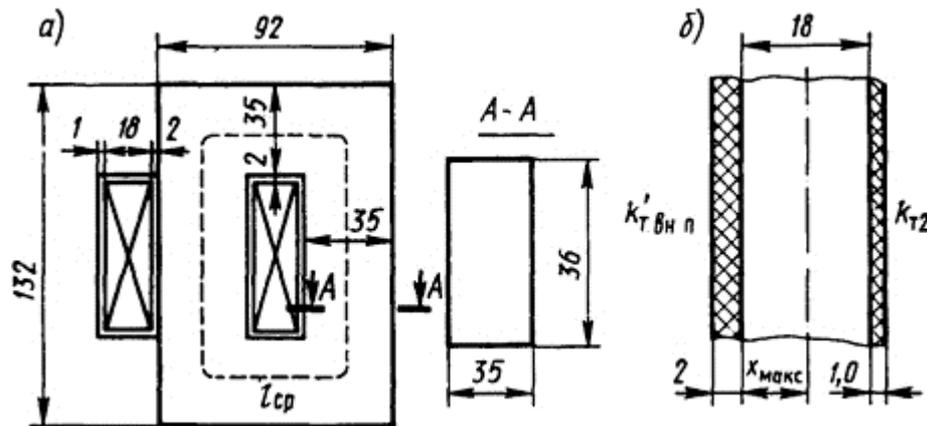


Рис. 1.19. Эскиз катушки на магнитопроводе (а) и разрез катушки (б)

провода марки ПЭВ равно 1250. Диаметр провода $d = 0,35 \text{ мм}$, толщина изоляции $\delta = 0,02 \text{ мм}$. Катушка пропитана изоляционным лаком $\lambda_{\text{лак}} = 0,095 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Между текстолитовым каркасом и магнитопроводом имеется воздушный промежуток толщиной $\delta_{\text{в}} = 0,5 \text{ мм}$, с наружной поверхности катушка изолирована слоем лакоткани, теплопроводность которой $\lambda_2 = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. По катушке протекает ток $I = 0,6 \text{ А}$, коэффициенты теплоотдачи с поверхностей магнитопровода $k_{\text{т}} = 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, катушки $k_{\text{т1}} = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, теплопроводность текстолита $\lambda_{\text{из}} = 0,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, стали $\lambda_2 = 46 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, воздуха $\lambda_{\text{в}} = 0,03 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$, а коэффициент заполнения стали $k_3 = 0,9$.

Решение. Находим коэффициент теплоотдачи, приведенный к внутренней поверхности катушки. Для этого воспользуемся формулой, которая учитывает слой изоляционного каркаса и слой воздуха, а именно формулой (1.62):

$$k'_{\text{т.в.п}} = \frac{1}{\frac{f_{\text{кат}} l_{\text{кат}} m l}{2 k_{\text{т}} f l \operatorname{th}(m l)} + \frac{\delta_{\text{в}}}{\lambda_{\text{в}}} + \frac{\delta_{\text{из}}}{\lambda_{\text{из}}}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{158 \cdot 10^{-3} \cdot 58 \cdot 10^{-3} \cdot 6,4 \cdot 123 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 15 \cdot 142 \cdot 10^{-3} \cdot 123 \cdot 10^{-3} \operatorname{th}(6,4 \cdot 123 \cdot 10^{-3})} + \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{0,03} + \frac{2 \cdot 10^{-3}}{0,5}}$$

$$= 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где $f_{\text{кат}} = 2(35+4) + 2(36+4) = 158 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $f = 2(35+36) = 142 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $= 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

$$m = \sqrt{k_1 f / \lambda_2 S_2} = \sqrt{15 \cdot 142 \cdot 10^{-3} / (46 \cdot 1130 \cdot 10^{-6})} = 6,4 \text{ м}^{-1};$$

$$S_2 = k_3 \cdot 35 \cdot 36 \cdot 10^{-6} = 0,9 \cdot 35 \cdot 36 \cdot 10^{-6} = 1130 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$

$$l_{\text{кат}} = 58 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad 2l = 2(92 - 35 - 132 - 35) - 62 = 246 \text{ мм};$$

$$l = 123 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

После определения приведенного к внутренней поверхности коэффициента теплоотдачи катушку с магнитопроводом можно заменить катушкой без магнитопровода, т.е. можно полагать, что внутренняя поверхность катушки охлаждается какой-то фиктивной средой с коэффициентом теплоотдачи $k'_{\text{т.в.п}}$ и температурой $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$.

Координата наиболее нагретого слоя (рис. 1.19, б) определится, как для плоской стенки [см. формулу (1.57)], с той лишь разницей, что вместо λ необходимо подставить из формулы (1.64) $\lambda_3 = \lambda_{\text{лак}}(d/\delta)^{2/3} = 0,095 [0,35 \cdot 10^{-3} / (0,02 \cdot 10^{-3})]^{2/3} = 0,138 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. После вычислений $x_{\text{макс}} = 12,1 \text{ мм}$.

Объемную плотность источников теплоты определим по формуле (1.59) $q = (IN)^2 \rho / (S_{\text{ок}}^2 k_3) = (0,6 \cdot 1250)^2 \cdot 2,2 \cdot 10^{-8} / [(18 \cdot 58)^2 \cdot 10^{-12} \cdot 0,45] = 2,54 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^3$, где $\rho = 2,2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ - удельное сопротивление для меди, соответствующее средней температуре провода $\vartheta \approx 80^\circ\text{C}$; $k_3 = 0,45$ - коэффициент заполнения катушки, определенный по [1] для катушки, намотанной проводом $d = 0,35 \text{ мм}$ с автоматической подачей; $S_{\text{ок}} = 18 \cdot 58 \text{ мм}^2$ - площадь обмоточного окна. Тогда

$$\begin{aligned} \vartheta_{\text{макс}} - \vartheta_0 &= q x_{\text{макс}} \left(\frac{x_{\text{макс}}}{2\lambda_3} + \frac{\Delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{k'_{\text{т.в.п}}} \right) = \\ &= 2,54 \cdot 10^4 \cdot 12,1 \cdot 10^{-3} \left(\frac{12,1 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,138} + \frac{2 \cdot 10^{-3}}{0,5} + \frac{1}{25} \right) = 15,9^\circ\text{C} \\ \vartheta_{\text{макс}} &= 15,9 + 35 = 50,9^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Аналогично определяем:

$$\Delta\vartheta_{\text{харк}} = 1,23^\circ\text{C}; \quad \vartheta_{\text{вн}} = 47,3^\circ\text{C}; \quad \Delta\vartheta_{\text{лак}} = 1^\circ\text{C}; \quad \vartheta_{\text{нар}} = 49,8^\circ\text{C}.$$

$$\text{О т в е т: } \vartheta_{\text{макс}} = 50,9^\circ\text{C}; \quad \vartheta_{\text{нар}} = 49,8^\circ\text{C}; \quad \vartheta_{\text{вн}} = 47,3^\circ\text{C}.$$

$$\text{О т в е т: } \vartheta_{\text{макс}} = 50,9^\circ\text{C}; \quad \vartheta_{\text{нар}} = 49,8^\circ\text{C}; \quad \vartheta_{\text{вн}} = 47,3^\circ\text{C}.$$

1.5.28. Определить радиус наиболее нагретого слоя, его температуру, а также температуру внутренней и наружной поверхностей цилиндрической катушки индуктивности, которая намотана круглым медным проводом диаметром $d = 2 \text{ мм}$ непосредственно на цилиндрический магнитопровод. Катушка имеет 500 витков и по ней протекает постоянный ток $I = 4,5 \text{ А}$. Магнитопровод катушки замкнут, и его внешняя часть имеет прямоугольное сечение, площадь которого равна площади поперечного сечения круглой части магнитопровода (размеры магнитопровода показаны на рис. 1.20). Высота катушки $h = 72 \text{ мм}$, наружный диаметр $D_{\text{нар}} = 136 \text{ мм}$, внутренний $D_{\text{вн}} = 70 \text{ мм}$. Изоляция провода бумажная, толщина которой $\delta_1 = 0,25 \text{ мм}$. Катушка намотана рядовой намоткой и пропитана. Построить график изменения

температуры вдоль наружной части магнитопровода, если коэффициенты теплоотдачи с наружных частей магнитопровода $k_{T1}=20$ Вт/(м²·К), катушки $k_{T2}=10$ Вт/(м²·К). Катушка намотана на магнитопровод достаточно плотно, находится в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0=35^\circ\text{C}$. Удельное сопротивление меди принять независимым от температуры и равным $\rho=2,2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, теплопроводность бумажной изоляции $\lambda_{из}=0,122$ Вт/(м·К), воздуха $\lambda_{в}=0,03$ Вт/(м·К), стали $\lambda_{ст}=46$ Вт/(м·К).

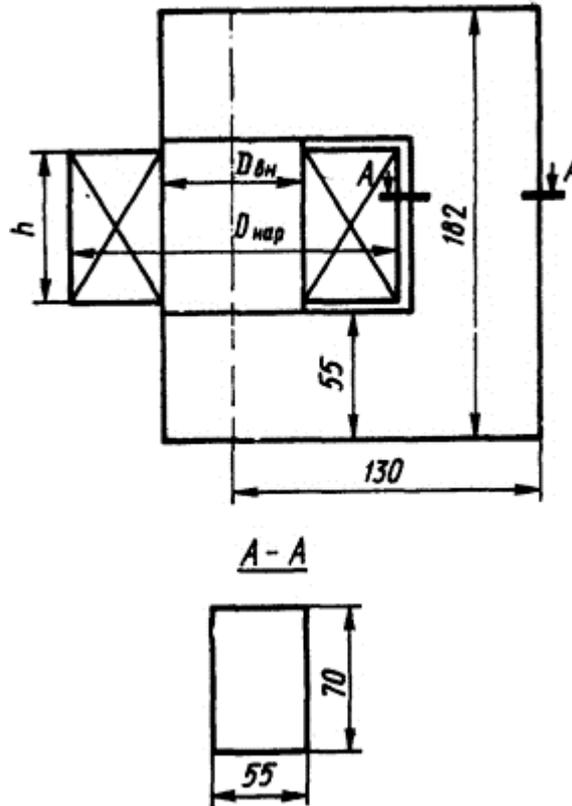


Рис. 1.20. Эскиз магнитопровода катушкой

1.5.29. Определить установившееся значение температуры медного круглого стержня диаметром $d=10$ мм на расстоянии 0,5 м от его торца, который находится в расплавленном олове, имеющем температуру $\vartheta_{\text{макс}}=250^\circ\text{C}$. Стержень находится в воздухе с $\vartheta_0=35^\circ\text{C}$, при этом коэффициент теплоотдачи с его поверхности $k_T = 25$ Вт/(м²·К). Определить также тепловой поток, который отводится с боковой поверхности стержня длиной 0,5 м, считая от поверхности олова.

Решение. Из формулы (1.73)

$$\vartheta - \vartheta_0 = (\vartheta_{\text{макс}} - \vartheta_0) e^{-a_1 x} = (250 - 35)^{-5,25 \cdot 0,5} = 15,6^\circ\text{C},$$

где

$$a_1 = \sqrt{k_T f / (\lambda S)} = \sqrt{25 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 4 / (390 \cdot 3,14 \cdot 10^2 \cdot 10^{-6})} = 5,25 \text{ м}^{-1}.$$

Здесь $\lambda=390$ Вт/(м·К) - теплопроводность меди (см. табл. П.7). Тогда температура стержня $\vartheta=50,6^\circ\text{C}$.

Значение теплового потока с боковой поверхности стержня [2]

$$P = (\vartheta_{\text{макс}} - \vartheta_0) \sqrt{k_{\tau} F \lambda S} (1 - e^{-a_1 x}) =$$

$$= (250 - 35) \sqrt{25 \cdot 3,14 \cdot 10^{-3} \cdot 350 \cdot 3,14 \cdot 10^2 \cdot 10^{-6} / 4} (1 - e^{-5,25 \cdot 0,5}) =$$

$$= 31,6 \text{ Вт},$$

где $F=3,14 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, а $S=3,14 \cdot 10^{-6} / 4 \text{ м}^2$.

О т в е т : $\vartheta=50,6^{\circ}\text{C}$; $P=31,6 \text{ Вт}$

1.5.30. Определить, на каком расстоянии можно держать голой рукой медный круглый стержень диаметром $d=20 \text{ мм}$, торец которого приставили к поверхности расплавленного олова с температурой

53

$\vartheta_{\text{макс}} = 300^{\circ}\text{C}$. Рука может выдержать длительную температуру $\vartheta_{\text{дл}} = 50^{\circ}\text{C}$. Температура окружающего воздуха $\vartheta_0 = 20^{\circ}\text{C}$, средний коэффициент теплоотдачи с поверхности стержня окружающему воздуху $k_{\tau} = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Средняя теплопроводность меди $\lambda=350 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

1.5.31. Определить температуру электрода из нержавеющей стали непосредственно у держателя, который находится на расстоянии $l_1=250 \text{ мм}$ от свариваемой поверхности, а также температуру электрода в конце сварки, когда его длина уменьшилась до $l_2=50 \text{ мм}$. Электрод имеет прямоугольное сечение, размеры; которого $3 \times 3 \text{ мм}$. Коэффициент теплоотдачи с поверхности электрода $k_{\tau} = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, теплопроводность нержавеющей стали $\lambda=200 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, температура торца электрода $\vartheta_{\text{макс}} = 1500^{\circ}\text{C}$ температура воздуха $\vartheta_0=20^{\circ}\text{C}$. При расчете потерями энергии за счет джоулева тепла пренебречь.

1.5.32. Определить количество теплоты, которое отводится от нагретого до $\vartheta_{\text{макс}} = 100^{\circ}\text{C}$ тела с помощью алюминиевого прямо угольного ($40 \times 5 \text{ мм}$) длиной $l=5 \text{ см}$ охлаждающего ребра Средний коэффициент теплоотдачи с его поверхности $k_{\tau} = 13 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, теплоотдача происходит в спокойный воздух с $\vartheta_0=35^{\circ}\text{C}$, а теплопроводность алюминия $\lambda =200 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Найти температуру "холодного" торца" ребра.

Р е ш е н и е . Для расчета теплопередачи вдоль стержня ограниченной длины используем формулу (1.71) для $x=l$. Тогда

$$\vartheta - \vartheta_0 = (\vartheta_{\text{макс}} - \vartheta_0) (p + 1) / (pe^{-a_1 l} + e^{a_1 l}),$$

где $m = k_{\tau} / \lambda = 13 / 200 = 0,065 \text{ м}^{-1}$; $p = (a_1 - m) / (a_1 + m) = (5,4 - 0,065) / (5,4 + 0,065) = 0,975$;

$$a_1 = \sqrt{k_{\tau} f / (\lambda S)} = \sqrt{13 \cdot 90 \cdot 10^{-3} / (200 \cdot 40 \cdot 5 \cdot 10^{-6})} = 5,4 \text{ м}^{-1};$$

$$f = 2(40 + 5) \cdot 10^{-3} = 90 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2; \quad S = 40 \cdot 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Тогда температура «холодного» торца при $l=0,5 \text{ м}$

$$\vartheta = (100 - 35) \frac{0,975 + 1}{0,975e^{-5,4 \cdot 5 \cdot 10^{-2}} + e^{5,4 \cdot 5 \cdot 10^{-2}}} + 35 = 97,6^{\circ}\text{C}$$

Тепловой поток, который отводится ребром охлаждения, определим из формулы (1.72)

$$P = \sqrt{k_T f \lambda S} \frac{1 - pe^{-2a_1 l}}{1 + pe^{-2a_1 l}} (\vartheta_{\max} - \vartheta_0) = \sqrt{13 \cdot 90 \cdot 10^{-3} \cdot 200 \cdot 200 \cdot 10^{-6}} \times \\ \times \left[\frac{(1 - 0,975e^{-2 \cdot 5,4 \cdot 5 \cdot 10^{-2}})}{(1 + 0,975e^{-2 \cdot 5,4 \cdot 5 \cdot 10^{-2}})} \right] (100 - 35) = 3,85 \text{ Вт.}$$

О т в е т: $P = 3,85 \text{ Вт}$; $\vartheta = 97,5^\circ$.

О т в е т: $P = 3,85 \text{ Вт}$; $\vartheta = 97,5^\circ$.

1.5.33. Определить длину стального стержня, с поверхности которого рассеивается 80% теплового потока, если его поперечные размеры равны $5 \times 4 \text{ мм}$, а на торце поддерживается постоянная температура $\vartheta_{\max} = 150^\circ\text{C}$. Определить значение этого

54

потока, если коэффициент теплоотдачи с поверхности стержня $k_T = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, температура окружающего воздуха $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$. Теплопроводность стали $\lambda = 40 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

1.5.34. Определить допустимое значение тока, который можно длительно пропускать через маслонеполненный реостат, сопротивление которого $R = 1 \text{ Ом}$ при 0°C . Охлаждающая площадь поверхности элементов сопротивления $F_1 = 2000 \text{ см}^2$. Элементы сопротивления изготовлены из нихрома, коэффициент теплоотдачи от поверхности которых к маслу $k_{T1} = 70 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, коэффициент теплоотдачи от масла к поверхности бака $k_{T2} = 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Бак реостата изготовлен из чугуна, его наружная поверхность снабжена ребрами охлаждения в количестве $n = 20$. Каждое ребро охлаждения представляет собой прямоугольную пластину, площадь поперечного сечения которой $100 \times 5 \text{ мм}$, а длина вдоль распространения теплового потока $l = 40 \text{ мм}$. Площадь охлаждающей поверхности бака, исключая поверхность ребер, $F_2 = 2000 \text{ см}^2$. Толщина стенки бака $\delta = 5 \text{ мм}$, коэффициенты теплоотдачи с поверхности бака и ребер охлаждения $k_{T3} = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. При расчете принять допустимую температуру масла $\vartheta_{\text{доп}} = 90^\circ\text{C}$, теплопроводность чугуна $\lambda = 45 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Бак находится в воздухе, температура которого $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$.

Р е ш е н и е . Составим эквивалентную схему замещения (рис. 1.21). Предположим, что максимальная температура у основания ребер охлаждения и температура наружной поверхности бака равны. В схеме замещения ϑ_m - температура масла в удаленных от элементов сопротивления местах; ϑ_{c1} , ϑ_{c2} - температура внутренней и наружной поверхностей стенки бака; P - тепловой поток; $R_{T1} = 1/(k_{T1}F_1) = 1/(70 \cdot 2000 \cdot 10^{-4}) = 0,0715 \text{ К}/\text{Вт}$ - тепловое сопротивление теплоотдачи от элементов сопротивления маслу.

Предположим, что $S_1 = F_3 = F_2 + 20 \cdot 5 = 2100 \text{ см}^2$. Здесь $20 \cdot 5$ - площадь поперечных сечений всех ребер охлаждения. Такое допущение, вероятно, не внесет больших погрешностей; $R_{T2} = 1/(\lambda_{T2}F_3) = 1/(50 \cdot 2100 \cdot 10^{-4}) = 0,095 \text{ К}/\text{Вт}$ - тепловое сопротивление теплоотдачи от масла к поверхности стенки бака; $R_{T3} = \delta/(\lambda S_1) = 5 \cdot 10^{-3}/(45 \cdot 2100 \cdot 10^{-4}) = 0,00053 \text{ К}/\text{Вт}$ - тепловое сопротивление стенки бака; $R_{T4} = 1/(k_{T3}F_2) = 1/(10 \cdot 2000 \cdot 10^{-4}) = 0,5 \text{ К}/\text{Вт}$ - тепловое сопротивление теплоотдачи от наружной поверхности бака окружающему воздуху;

$$R_{\tau 5} = \frac{1 + pe^{-2a_1 l}}{(1 - pe^{-2a_1 l}) \sqrt{k_{\tau 3} f \lambda S}} =$$

$$= \frac{1 + 0,955e^{-2 \cdot 9,65 \cdot 40 \cdot 10^{-3}}}{(1 - 0,955e^{-2 \cdot 9,65 \cdot 40 \cdot 10^{-3}}) \sqrt{10 \cdot 210 \cdot 10^{-3} \cdot 45 \cdot 500 \cdot 10^{-6}}} = 0,556 \text{ К/Вт}$$

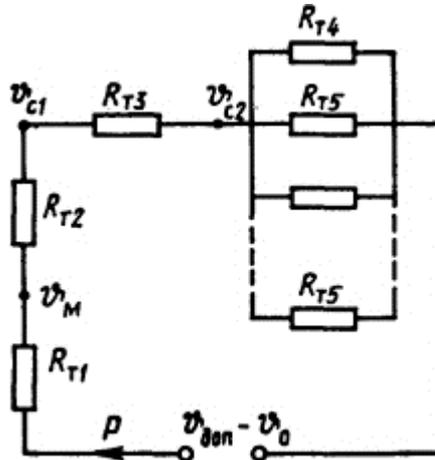


Рис. 1.21. Тепловая схема замещения реостата

-тепловое сопротивление ребра охлаждения, определенное из табл. П.13,

55

$$a_1 = \sqrt{k_{\tau 3} f / (\lambda S)} = \sqrt{10 \cdot 210 \cdot 10^{-3} / (45 \cdot 500 \cdot 10^{-6})} = 9,65 \text{ м}^{-1};$$

$$m = k_{\tau 3} / \lambda = 10 / 45 = 0,222 \text{ м}^{-1}; \quad p = (a_1 - m)(a_1 + m) =$$

$$= (9,65 - 0,222) / (9,65 + 0,222) = 0,955;$$

$$F = 2(100 + 5) 10^{-3} = 210 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2;$$

f - площадь охлаждающей поверхности 1 м длины ребра охлаждения; $S = 100 \cdot 5 \cdot 10^{-6} = 500 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ - поперечное сечение ребра; $\lambda = 45 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ (см. табл. П. 7).

Используя схему замещения (см. рис. 1.21), вычисляем суммарное тепловое сопротивление: $R_{\tau \Sigma} = 0,103 \text{ К/Вт}$. Тогда $\vartheta_{\text{доп}} - \vartheta_0 = PR_{\tau \Sigma}$. Так как $P = I^2 R_0 (1 + \alpha \vartheta)$, то

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{(\vartheta_{\text{доп}} - \vartheta_0) / [R_{\tau \Sigma} R_0 (1 + \alpha \vartheta_{\text{доп}})]} =$$

$$= \sqrt{(90 - 35) / (0,103 \cdot 1 (1 + 14 \cdot 10^{-5} \cdot 90))} = 25 \text{ А.}$$

О т в е т: $I_{\text{доп}} = 25 \text{ А}$.

1.5.35. Рассчитать допустимый ток в реостате для условий задачи 1.5.34, считая, что ребра охлаждения отсутствуют. Остальные данные остались без изменения.

1.5.36. Определить максимальную температуру двух медных цилиндрических стержней, образующих торцовый контакт. Переходное сопротивление контакта $R_{\text{конт}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$. Диаметры стержней одинаковы: $d = 20 \text{ мм}$, а длина их бесконечна. Начертить график распределения температур вдоль стержней, если коэффициент теплоотдачи с боковой поверхности стержней окружающему воздуху $k_{\tau} = 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, температура

окружающего воздуха $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$, ток, протекающий по стержням, $I=850$ А. Теплопроводность меди $\lambda = 390$ Вт/(м·К), удельное сопротивление принять независимым от температуры и равным $\rho = 2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

1.5.37. Определить температуру поверхности алюминиевой шины в точке, находящейся в середине между двумя контактами, расположенными друг от друга на расстоянии $l=200$ мм (шина имеет прямоугольное сечение, размеры ее 40×5 мм). Сопротивление каждого контакта $R_{\text{конт}} = 6 \cdot 10^{-5}$ Ом. По шине протекает ток $I=550$ А. Шина находится в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$, коэффициент теплоотдачи с ее поверхности $k_T=12$ Вт/(м²·К). Теплопроводность алюминия $\lambda = 200$ Вт/(м·К), его удельное сопротивление принять равным $\rho = 3 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

1.5.38. Медный круглый стержень, используемый в качестве токоведущего элемента выключателя, имеет резко изменяющееся сечение от диаметра $d_1 = 30$ мм до диаметра $d_2=20$ мм. По стержню протекает постоянный ток $I=1000$ А. Определить максимальную и минимальную установившуюся температуру стержня, а также температуру в месте резкого изменения диаметра,

56

если стержень находится в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$. Коэффициент теплоотдачи с поверхности большего сечения $k_{T1}=S$ Вт/(м²·К), с поверхности меньшего сечения $k_{T2} = 30$ Вт/(м²·К). Теплопроводность меди $\lambda = 390$ Вт/(м·К), ее удельное сопротивление принять равным $\rho = 2,0 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Использовать формулы для расчета нагрева стержня с внутренними источниками теплоты, имеющего резко изменяющееся поперечное сечение [см. формулы (1.81), (1.82) и (1.83)].

1.5.39. Алюминиевая шина прямоугольного сечения, размеры которой 80×6 мм, соединена встык с алюминиевой шиной, имеющей размеры поперечного сечения 50×6 мм. Определить температуру стыка шин при установившемся режиме нагрева, а также температуру узкой шины на расстоянии $l=10$ см от места стыка, если по шине протекает постоянный ток $I=1200$ А. Шина находится в воздухе, температура которого $\vartheta_0=35^\circ\text{C}$, коэффициент теплоотдачи с большей поверхности шины $k_{T1} = 20$ Вт/(м²·К), с меньшей поверхности $k_{T2}=25$ Вт/(м²·К). Теплопроводность алюминия $\lambda=200$ Вт/(м·К), удельное сопротивление принять равным $\rho = 2,9 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. При решении считать, что шина имеет неограниченные в обе стороны линейные размеры.

1.5.40. Бесконечно длинный медный круглый токопровод диаметром $d=30$ мм на длине $l=30$ мм имеет заточку до диаметра $d_1=20$ мм. Токопровод находится в воде, температура которой $\vartheta_0 = 20^\circ\text{C}$. Коэффициенты теплоотдачи с тонкой части токопровода $k_{T1}=200$ Вт/(м²·К), с толстой $k_{T2}=100$ Вт/(м²·К), теплопроводность меди $\lambda=390$ Вт/(м·К), удельное электрическое сопротивление принять равным $\rho=2,1 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. По токопроводу протекает переменный ток $I=4000$ А частоты $f=50$ Гц. Определить максимальную температуру узкой и широкой частей токопровода.

1.5.41. Медная шина круглого сечения диаметром $d = 30$ мм бесконечной длины имеет утолщение, диаметр и длина которого соответственно равны $d_1=40$ мм, $l=400$ мм. По шине протекает постоянный ток $I=1500$ А. Коэффициенты теплоотдачи с боковых поверхностей толстой части шины $k_{T1}=20$ Вт/(м²·К), тонкой $k_{T2} = 30$ Вт/(м²·К). Определить минимальную температуру в шине и температуру шины в месте стыка. Теплопроводность

меди $\lambda = 390 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, ее удельное электрическое сопротивление принять равным $\rho = 2,0 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$, температура окружающей среды $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$.

1.5.42. Длинная стальная шина прямоугольного сечения размером $30 \times 3 \text{ мм}$ расположена в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$. В средней части шина имеет утолщение длиной $l = 50 \text{ мм}$ и поперечным сечением $40 \times 6 \text{ мм}$. Коэффициенты теплоотдачи с поверхности шины и утолщения равны $k_{t2} = 10 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$. Определить температуру в середине утолщения и в месте изменения поперечного сечения, если по шине протекает

57

постоянный ток $I = 150 \text{ А}$. Теплопроводность стали $\lambda = 40 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, ее удельное электрическое сопротивление $\rho = 12 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

1.5.43. Определить максимальную и минимальную температуру магнитопровода катушки индуктивности, которая намотана на ферромагнитный сердечник, изготовленный из листов трансформаторной стали марки 1512 с толщиной листов $\delta = 0,5 \text{ мм}$. Высота катушки $h = 170 \text{ мм}$, число витков $N = 250$, по ней протекает переменный ток $I = 20 \text{ А}$. Поперечное сечение магнитопровода $70 \times 70 \text{ мм}$, длина его средней линии $l_{\text{ср}} = 720 \text{ мм}$. Между катушкой и магнитопроводом отсутствует теплообмен, катушка находится в воздухе, температура которого $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$. Коэффициент теплоотдачи с наружных частей магнитопровода $k_1 = 10 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$.

58

1.6. Тепловой расчет электрических аппаратов и их частей с учетом совместного действия теплопроводности, конвекции и излучения

Приведенные в этом параграфе задачи позволяют освоить тепловой расчет электрических аппаратов и их частей с учетом совместного действия теплопроводности, конвекции и излучения, широко используя понятия теплового сопротивления и эквивалентных схем замещения.

В общем случае нагрева и охлаждения электрических аппаратов распространение теплоты происходит совместно тремя видами теплопередачи.

При расчетах в этом случае используются расчетные формулы и соотношения предыдущих параграфов данной главы.

1.6.1. Определить допустимый ток для алюминиевой круглой шины, изолированной слоем бумажной изоляции толщиной $\delta = 3 \text{ мм}$. Диаметр шины $d = 30 \text{ мм}$. Максимально допустимая температура наружной поверхности изоляции $\vartheta_{\text{нар}} = 50^\circ\text{C}$, шина расположена горизонтально в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$.

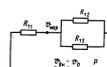


Рис. 1.22. Схема замещения изолированной шины

Решение. Составим эквивалентную схему замещения для данного случая. В результате большой теплопроводности алюминия по сравнению с теплопроводностью

бумажной изоляции тепловым сопротивлением шины пренебрегаем. Схема замещения изображена на рис. 1.22. Тепловые сопротивления на единицу длины шины определим из табл. П. 13:

$$R_{\text{т.к}} = \frac{1}{2\alpha_k} \ln \frac{R}{r} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,14} \ln \frac{18}{15} = 0,207 \text{ К/Вт};$$

$$R_{\text{т.и}} = 1/(k_{\text{т.и}} F) = 1/[k_{\text{т.и}} \pi (d + 2\delta)] = 1/(k_{\text{т.и}} \pi \cdot 3,14 \cdot 36 \cdot 10^{-3}) = 8,9/k_{\text{т.и}},$$

где $\lambda=0,14$ Вт/(м·К) -теплопроводность бумаги (см. табл. П. 14); $R=d/2+\delta=15+3=18$ мм; $r=d/2=15$ мм; $k_{\text{т.к}}$, $k_{\text{т.и}}$ - соответственно коэффициент теплоотдачи конвекцией и излучением с поверхности бумажной изоляции к окружающей среде; $R_{\text{т.з}}=1/(k_{\text{т.и}}/F)=8,9/k_{\text{т.и}}$.

58

Общее сопротивление тепловому потоку $R_{\text{т.ш}} = 0,207 + 8,9/(k_{\text{т.к}} + k_{\text{т.и}})$. Тепловой поток на единице длины шины

$$P = P_0 \frac{1 + \alpha R_{\text{т.ш}}}{S} = I^2 \frac{2,62 \cdot 10^{-8} + 4}{3,14 \cdot 36 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 4,2 \cdot 10^{-3} \theta_{\text{вн}})} = 3,7 \cdot 10^{-5} I^2 (1 + 4,2 \cdot 10^{-3} \theta_{\text{вн}}),$$

где $\rho_0=2,62 \cdot 10^{-8}$ Ом·м (см. табл. П.7); $\theta_{\text{вн}}$ - температура внутренней поверхности изоляции; $\alpha=4,2 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹ (см. табл. П.7).

Коэффициент теплоотдачи конвекцией определим по формуле (1.33)

$$k_{\text{т.к}} = \text{Nu}_m \lambda_m / L = 6,3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)},$$

Коэффициент теплоотдачи излучением определим как

$$k_{\text{т.и}} = \epsilon \sigma (\theta_{\text{вн}} - \theta_0) = 0,65 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)},$$

где $\text{Nu}_m = C[\text{Gr Pr}]_m^n$ определяем из формулы (1.38) при $\text{Pr}_m = \text{Pr}_c$, а p_i из формулы (1.52).

Тогда уравнениями для решения задачи будут $PR_{\text{т.ш}} = \theta_{\text{вн}} - \theta_0$, $PR_{\text{т.л}} = \theta_{\text{вн}} - \theta_{\text{нар}}$, т.е.

$$3,7 \cdot 10^{-5} I^2 (1 + 4,2 \cdot 10^{-3} \theta_{\text{вн}}) [0,207 + 8,9/(6,3 + 0,65)] = \theta_{\text{вн}} - \theta_0;$$

$$3,7 \cdot 10^{-5} I^2 (1 + 4,2 \cdot 10^{-3} \theta_{\text{вн}}) 0,207 = \theta_{\text{вн}} - \theta_{\text{нар}}.$$

Решая эти уравнения совместно, получаем $\theta_{\text{вн}} = 55,6^\circ\text{C}$; $I=350$ А.

Ответ: $\theta_{\text{вн}} = 55,6^\circ\text{C}$; $I=350$ А.

1.6.2. Определить допустимую плотность тока для медной шины прямоугольного поперечного сечения с размерами 100×10 мм, которая изолирована слоем лакоткани толщиной $\delta = 2$ мм. Допустимая температура наружной поверхности изоляции $\theta_{\text{доп}}=65^\circ\text{C}$, шина расположена в спокойном воздухе, температура которого $\theta_0=35^\circ\text{C}$.

1.6.3. Решить задачу 1.6.1 при условии, что задана допустимая температура внутренней поверхности изоляции $\theta_{\text{вн}}=80^\circ\text{C}$.

Р е ш е н и е . Исходными уравнениями для решения задачи будут

$$I^2 R_0 (1 + \alpha \vartheta_{\text{вн}}) R_{\tau \Sigma} = \vartheta_{\text{вн}} - \vartheta_0; \quad I^2 R_0 (1 + \alpha \vartheta_{\text{вн}}) R_{\tau 1} = \vartheta_{\text{вн}} - \vartheta_{\text{нар}}.$$

Подставляя числовые значения, получим следующую систему уравнений:

$$5 \cdot 10^{-5/2} [0,207 + 8,9/(k_{\tau.к} + k_{\tau.н})] = 45; \quad 5 \cdot 10^{-5/2} \cdot 0,207 = 80 - \vartheta_{\text{нар}},$$

решая которую имеем

$$\frac{80 - \vartheta_{\text{нар}}}{0,207} \left(0,207 + \frac{8,9}{k_{\tau.к} + k_{\tau.н}} \right) = 0,45.$$

В последнем уравнении температура $\vartheta_{\text{нар}}$ входит в неявном виде в член $(k_{\tau.к} + k_{\tau.н})$, который зависит от температуры наружной поверхности. Построив зависимость $y=f(\vartheta_{\text{нар}})$, решим это уравнение графически:

$$y = \frac{80 - \vartheta_{\text{нар}}}{0,207} \left(0,207 + \frac{8,9}{k_{\tau.к} + k_{\tau.н}} \right).$$

59

В точке, где график этой функции пересечет прямую $y=45$, получим искомое значение $\vartheta_{\text{нар}}=68,3^\circ\text{C}$ (рис. 1.23).

Подставляя это значение в одно из уравнений системы, получаем $I_{\text{доп}} = 1040 \text{ А}$.

О т в е т : $I_{\text{доп}}=1040 \text{ А}$.

1.6.4. Вычислить допустимую плотность постоянного тока медной шины прямоугольного поперечного сечения размером $100 \times 10 \text{ мм}$, которая изолирована слоем лакоткани толщиной $\delta=4 \text{ мм}$. Шина расположена горизонтально в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0=35^\circ\text{C}$. Максимально допустимая температура поверхности изоляции $\vartheta_{\text{доп}}=80^\circ\text{C}$, степень черноты излучения для лакоткани $\varepsilon=0,9$ коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,16 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

1.6.5. Определить температуру поверхности стальной трубчатой шины, имеющей внутренний диаметр $d_{\text{вн}}=2 \text{ дюйма}$, наружный $\vartheta_{\text{нар}}=60 \text{ мм}$, по которой протекает переменный ток $I=225 \text{ А}$. Шина покрыта слоем бумажной изоляции толщиной $\delta = 5 \text{ мм}$. Определить также температуру наружной поверхности слоя изоляции, если шина расположена горизонтально в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0=35^\circ\text{C}$.

1.6.6. Определить температуру наружной поверхности изоляции алюминиевой шины прямоугольного сечения размерами $80 \times 10 \text{ мм}$, изолированной слоем стеклоткани толщиной $\delta = 3 \text{ мм}$. Шина расположена горизонтально и по ней протекает постоянный ток $I=2800 \text{ А}$. Шина обдувается поперечным потоком воздуха, скорость которого $w=1 \text{ м/с}$, а температура $\vartheta_0=25^\circ\text{C}$. Степень черноты излучения стеклоткани $\varepsilon=0,85$. При решении использовать критериальное уравнение для вынужденной конвекции при обтекании одиночного цилиндра [см. формулы (1.43) и (1.44)], в качестве определяющего размера взять $d_s = 4 S/\Pi$, S - площадь сечения; Π - периметр.

1.6.7. Определить допустимый ток для медной шины прямоугольного сечения, заключенной в прямоугольный короб, изготовленный из текстолита толщиной $\delta=4$ мм. Шина расположена горизонтально в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0=35^\circ\text{C}$, ее поперечные размеры 50×6 мм. Зазор между коробом и шиной $\Delta=1$ мм. Шина окислена, степень черноты излучения текстолита $\varepsilon=0,8$, а допустимая температура наружной поверхности текстолита $\vartheta_{\text{доп}}=80^\circ\text{C}$.

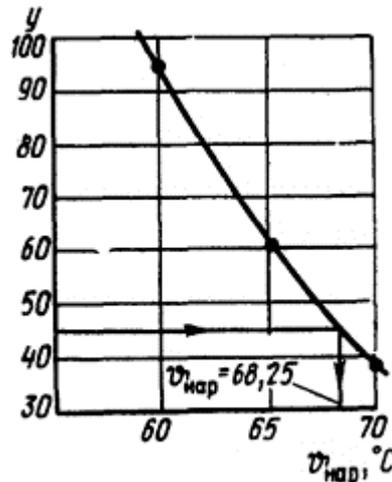


Рис. 1.23. График для определения температуры наружной поверхности шины

60

Решение. Эквивалентная схема замещения изображена на рис. 1.24, а.

Тепловые сопротивления на единицу длины шины определяем по формулам табл. П. 13, т.е.

$$R_{T4} = 1/(k_{T,н}F) \text{ и } R_{T5} = 1/(k_{T,к}F).$$

Общее сопротивление теплоотдачи с поверхности короба в окружающую среду

$$\begin{aligned} R_{T6} &= R_{T4}R_{T5}/(R_{T4} + R_{T5}) = 1/[F(k_{T,н} + k_{T,к})] = \\ &= 1/[152 \cdot 10^{-3}(7,05 + 6,55)] = 0,485 \text{ К/Вт}, \end{aligned}$$

где $k_{T,к}=7,05$ Вт/(м²·К) определяем по критериальному уравнению (1.38); $k_{T,н}=6,55$ Вт/(м²·К) - из уравнения для теплоотдачи излучением [см. формулу (1.52)], $F=2(50+2+8+6+2+8) = 152 \cdot 10^{-3}$ м² - площадь охлаждающей поверхности наружной части короба длиной 1 м.

Тогда тепловой поток через сопротивление R_{T6}

$$\begin{aligned} P &= (\vartheta_{\text{доп}} - \vartheta_0)/R_{T6} = \\ &= (80 - 35)/0,485 = 93 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

Тепловое сопротивление стенки короба толщиной $\delta = 4$ мм

$$\begin{aligned} R_{T3} &= \delta/(\lambda S) = 4 \cdot 10^{-3}/(0,17 \times \\ &\times 120 \cdot 10^{-3}) = 0,196 \text{ К/Вт}, \end{aligned}$$

где $\lambda=0,17 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ (см. табл. П.14), $S = 2(50+2+6+2) = 120 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$.

Температура внутренней стенки корпуса

$$\begin{aligned} \vartheta_1 &= PR_{T3} + \vartheta_{\text{дон}} = \\ &= 93 \cdot 0,196 + 80 = 98,2^\circ \text{ С.} \end{aligned}$$

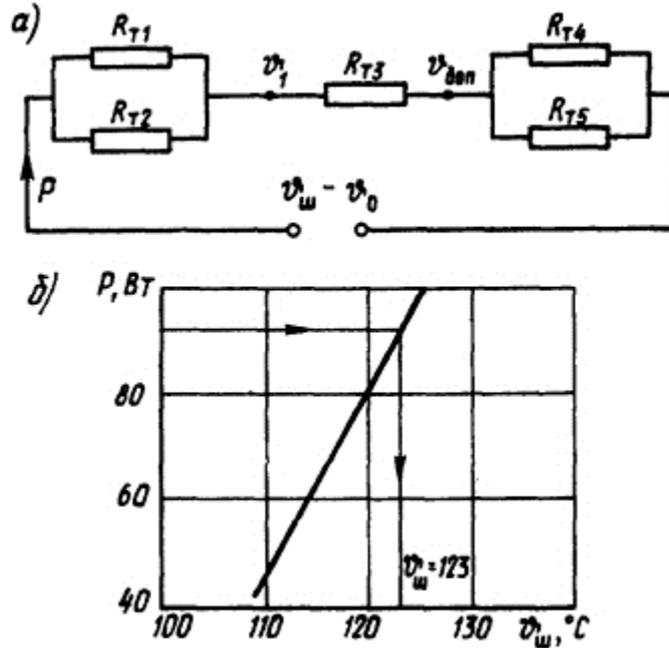


Рис. 1.24. Схема замещения (а) и зависимость мощности источников теплоты от максимальной температуры (б)

В воздушном зазоре $\Delta=1 \text{ мм}$ имеет место теплопередача стесненной конвекцией и излучением. Так как расчет стесненной конвекции в конечном итоге сводится к расчету распространения теплоты теплопроводностью, то вычисления тепловых сопротивлений $R_{T1} = \Delta/(\lambda_{13}F_1)$ и $R_{T2} = \Delta/(\lambda_{23}F_1)$ производим как расчет тепловых сопротивлений плоской стенки без внутренних источников теплоты. Здесь λ_{13} определим из формулы (1.40) для стесненной конвекции, а λ_{23} - из приведенных ниже соображений. Если $\vartheta_{\text{ш}}$ - температура поверхности шины, то количество теплоты, передаваемое от шины к корпусу путем излучения с поверхности шины, определится из формулы (1.51)

$$P_{\text{н}} = 5,67 \left[\left(\frac{\vartheta_{\text{ш}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{\vartheta_1 + 273}{100} \right)^4 \right] F_1 / \left[\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \right].$$

Если предполагать, что теплопередача идет теплопроводностью, то $P_{\text{н}} = \lambda_{23}(\vartheta_{\text{ш}} - \vartheta_1)F_1/\Delta$, откуда $\lambda_{23} = P_{\text{н}}\Delta/(\vartheta_{\text{ш}} - \vartheta_1)$. Так как R_{T1} и R_{T2} - параллельно включенные сопротивления, то $R_{T7} = R_{T1}R_{T2}/(R_{T1} + R_{T2}) = \Delta/[(\lambda_{13} + \lambda_{23})]$. Примем $F_1 = F_2$, тогда $(\vartheta_{\text{ш}} - \vartheta_1)/R_{T7} = P$.

Поскольку $\vartheta_{\text{ш}}$ входит неявно в λ_{13} , а следовательно, и в R_{T7} , задачу следует решать подбором. Задаваясь произвольными значениями $\vartheta_{\text{ш}}$, построим график функций $P = P(\vartheta_{\text{ш}})$ (рис. 1.24, б). В точке пересечения кривой с прямой $P=93 \text{ Вт}$ определим искомое значение $\vartheta_{\text{ш}} = 123^\circ \text{ С}$.

Из выражения $I^2 \rho_0 (1 + \alpha \vartheta_{ш}) / S = P$ допустимый ток

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{PS}{\rho_0 (1 + \alpha \vartheta_{ш})}} = \sqrt{\frac{93 \cdot 50 \cdot 6 \cdot 10^{-6}}{1,62 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0043 \cdot 123)}} = 1060 \text{ А.}$$

Значения ρ_0 и α приведены в табл. П.7; $S = 50 \cdot 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ - площадь поперечного сечения шины.

О т в е т : $I_{\text{доп}} = 1060 \text{ А.}$

1.6.8. Решить задачу 1.6.7 при условии, что зазор между шиной и коробом $\delta = 2 \text{ мм.}$ Остальные данные остались без изменения.

1.6.9. Определить температуру наружной поверхности короба, в который заключена алюминиевая шина с размерами поперечного сечения $60 \times 6 \text{ мм.}$ Короб изготовлен из гетинакса толщиной $\delta = 3 \text{ мм.}$ По шине протекает переменный ток $I = 880 \text{ А}$ частоты $f = 50 \text{ Гц.}$ Шина расположена горизонтально в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C.}$ Степень черноты излучения с поверхности гетинакса $\varepsilon = 0,7,$ поверхность шины покрыта масляной краской, зазор между шиной и коробом $\Delta = 3 \text{ мм.}$

1.6.10. Найти температуру круглой медной шины диаметром $d = 38 \text{ мм,}$ которая проходит через достаточно длинную медную трубу, внутренний диаметр которой $d_{\text{вн}} = 40 \text{ мм,}$ наружный $d_{\text{нар}} = 45 \text{ мм.}$ По шине протекает постоянный ток $I = 1500 \text{ А.}$ Шина расположена горизонтально и концентрично с трубой в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C.}$ Коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности трубы в окружающий воздух $k_t = 5,2 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К).}$

1.6.11. Определить допустимую плотность тока в круглой медной шине диаметром $d = 38 \text{ мм,}$ расположенной горизонтально и концентрично в достаточно длинной медной трубе с внутренним диаметром $d_{\text{вн}} = 40 \text{ мм,}$ наружным $d_{\text{нар}} = 45 \text{ мм.}$ Труба имеет слой изоляции толщиной $\delta = 20 \text{ мм}$ из бакелизированной бумаги и находится в спокойном воздухе, температура которого $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C.}$ Допустимая температура для данной шины $\vartheta_{\text{доп}} = 115^\circ\text{C,}$ степень черноты излучения для бакелита $\varepsilon_1 = 0,9,$ для окисленной меди $\varepsilon_2 = 0,6.$ Эквивалентная схема замещения такая же, как и в задаче 1.6.7 (если пренебречь тепловым сопротивлением медной трубы). Решение задачи отличается тем, что необходимо вести двойное графическое построение. Вначале строим график функции $P = P(\vartheta_{ш}),$ предварительно задавшись произвольным значением температуры наружной поверхности изоляции. После определения $\vartheta_{ш}$ для заданного значения $\vartheta_{\text{нар}}$ строим график $\vartheta_{ш} = f(\vartheta_{\text{нар}})$ и для заданного значения $\vartheta_{\text{доп}}$ определяем $\vartheta_{\text{нар}}$ и, следовательно, возможную отводимую мощность с поверхности изоляции. Зная мощность и температуру шины, определяем значение допустимой плотности тока.

1.6.12. Определить допустимый ток для медной трубы с размерами $d_{\text{вн}} = 12 \text{ мм,}$ $d_{\text{нар}} = 15 \text{ мм,}$ по которой протекает вода со

скоростью $w = 0,5 \text{ м/с.}$ Температура воды на входе в трубу $\vartheta_{\text{вх}} = 20^\circ\text{C,}$ на выходе $\vartheta_{\text{вых}} = 30^\circ\text{C.}$ Труба расположена горизонтально в спокойном воздухе, ее поверхность окрашена

масляной краской. В результате длительной эксплуатации внутренняя поверхность трубы покрылась слоем накипи, толщина которого $\delta = 1$ мм, а теплопроводность $\lambda = 0,8$ Вт/(м·К). Допустимая температура наружной поверхности трубы $\vartheta_{\text{доп}} = 50^\circ\text{C}$, температура окружающего воздуха $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$.

Решение. Схема замещения показана на рис. 1.25, где $R_{T1} = \delta / (\lambda S) = 1 \cdot 10^{-3} / (0,8 \cdot 3,14 \cdot 10^{-3}) = 0,04$ К/Вт - тепловое сопротивление слоя накипи; $R_{T2} = 1 / (k_{\text{т.вн}} F_{\text{вн}}) = 1 / (2800 \cdot 3,14 \cdot 10^{-3}) = 0,0113$ К/Вт - тепловое сопротивление теплоотдачи в воду; $k_{\text{т.вн}} = 2800$ Вт/(м²·К) определяем из критериальных уравнений (1.47) и (1.49) при протекании жидкости в гладких трубах. $R_{T3} = 1 / (k_{\text{т.нар}} F_{\text{нар}}) = 1 / (10,6 \cdot 3,14 \cdot 15 \cdot 10^{-3}) = 2$ К/Вт - тепловое сопротивление теплоотдачи с наружной поверхности воздуха; $k_{\text{т.нар}} = 10,6$ Вт/(м²·К), определяем из условия теплоотдачи конвекцией и излучением [1];

$$F_{\text{вн}} = \pi (d_{\text{вн}} - 2\delta) = 3,14 (12 - 2) \cdot 10^{-3} = 3,14 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2;$$

$$F_{\text{нар}} = \pi d_{\text{нар}} = 3,14 \cdot 15 \cdot 10^{-3} = 47,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Количество теплоты, отдаваемое в воздух,

$$P_{\text{нар}} = (\vartheta_{\text{доп}} - \vartheta_0) / R_{T3} = (50 - 35) / 2 = 7,5 \text{ Вт.}$$

Количество теплоты, отдаваемое в воду,

$$P_{\text{вн}} = (\vartheta_{\text{доп}} - \vartheta_{\text{ср}}) / (R_{T1} + R_{T2}) = (50 - 25) / (0,04 + 0,0113) = 487 \text{ Вт.}$$

где $\vartheta_{\text{ср}} = 0,5 (\vartheta_{\text{вх}} + \vartheta_{\text{вых}}) = 0,5 (20 + 30) = 25^\circ\text{C}$.

Суммарное количество теплоты, отведенное от трубы, $P = P_{\text{вн}} + P_{\text{нар}} = 487 + 7,5 = 494,5$ Вт. Теплоту, выделенную в трубе, определим по формуле $P = I^2 \rho_0 (1 - \alpha \vartheta_{\text{доп}}) / S$, откуда допустимый ток

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{PS}{\rho_0 (1 + \alpha \vartheta_{\text{доп}})}} = \sqrt{\frac{494,5 \cdot 3,14 (15^2 - 12^2) \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 1,62 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0043 \cdot 50)}} = 1400 \text{ А.}$$

О т в е т : $I_{\text{доп}} = 1400$ А.

1.6.13. Решить задачу 1.6.12 при условии, что слой накипи удален полностью. Остальные данные оставить без изменений.

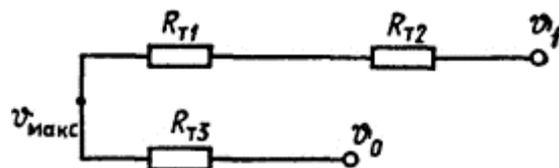


Рис. 1.25. Схема замещения

ГЛАВА 2. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ДЕЙСТВИЯ ТОКОВ

2.1. Расчет электродинамических усилий с использованием закона Био - Савара - Лапласа

В этом параграфе приведены задачи на вычисление электродинамических усилий на прямолинейные участки проводников как с учетом влияния размеров поперечного сечения, так, и без него.

В ряде случаев электродинамические усилия довольно легко можно вычислить, используя закон Био - Савара - Лапласа для определения значений:

63

и направления магнитной индукции. При этом используются следующие рас четные формулы и соотношения.

Формула Ампера для определения электродинамических усилий (э.д.у.) действующих на линейный проводник с током, находящийся в однородном магнитном поле,

$$F = I l B \sin \gamma, \quad (2.1)$$

где i - значение тока, А; l - длина проводника, м; B - магнитная индукция, Тл; γ - угол между направлением тока и вектором индукции.

Формула Ампера в векторном виде

$$F = i [l, B], \quad (2.2)$$

Формула Ампера в дифференциальной форме в векторном виде

$$dF = i [dl, B], \quad (2.3)$$

Закон Био - Савара - Лапласа

$$dH = i dl \sin \alpha / (4\pi r^2), \quad (2.4)$$

где i - ток в проводнике, А; dl - элементарный участок проводника, м; α - угол между направлением тока и направлением радиуса-вектора r от середины участка dl до точки пространства, в которой определяется напряженность магнитного поля dH ; r - длина вектора r , м.

Закон Био - Савара - Лапласа в векторной форме

$$dH = \frac{i}{4\pi r^2} [dl \times \frac{r}{r}], \quad (2.5)$$

Элементарное электродинамическое усилие, действующее со стороны элементарного проводника длиной dl_2 (м), с током i_2 (А), на элементарный проводник длиной dl_1 (м) с током i_1 (А), находящегося на расстоянии r (м) от проводника dl_2 ,

$$d^2 F_{12} = \frac{\mu_0 i_1 i_2}{4\pi r^2} [dl_1 \times \frac{dl_2}{r}], \quad (2.6)$$

где μ_0 - магнитная проницаемость воздуха, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Электродинамическое усилие, H , между двумя проводниками с токами i_1 и i_2 , А:

$$F_{1/2} = \frac{\mu_0 i_1 i_2}{4\pi} k_{1/2}, \quad (2.7)$$

где $k_{1/2}$ - коэффициент контура электродинамических усилий (см. табл. П. 18).

2.1.1. Определить электродинамическое усилие, действующее на 10 м прямолинейного бесконечно тонкого уединенного проводника с током к.з. $I=50$ кА. Проводник находится в поле земли и расположен под углом $\gamma = 30^\circ$ к плоскости магнитного меридиана. Горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля $H = 12,7$ А/м, а угол наклона $\beta = 72^\circ$.

Решение. Действующее на проводник усилие определим из закона Ампера [см. формулу (2.1)].

$$F = IlB \sin \gamma,$$

где $B = \mu_0 H$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Тогда горизонтальная составляющая индукции земного поля $B_r = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 12,7 = 0,16 \cdot 10^{-4}$ Тл; вертикальная составляющая $B_v = B_r \operatorname{tg} \beta = 0,16 \times$

64

$\times 10^{-4} \operatorname{tg} 72^\circ = 0,49 \cdot 10^{-4}$ Тл. Определим две составляющие силы, действующие на проводник:

от горизонтальной составляющей вектора индукции

$$F_r = 0,16 \cdot 10^{-4} \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 0,5 = 4 \text{ Н}$$

и от вертикальной

$$F_v = 0,49 \cdot 10^{-4} \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 10 = 24,5 \text{ Н.}$$

Суммарное усилие, действующее на проводник,

$$F = \sqrt{F_r^2 + F_v^2} = \sqrt{4^2 + 24,5^2} = 24,8 \text{ Н.}$$

О т в е т: $F=24,8$ Н.

2.1.2. Определить усилие, действующее на 1 м длины прямолинейного проводника, по которому протекает постоянный ток $I=10$ кА, если проводник находится в однородном постоянном магнитном поле, магнитная индукция в каждой точке проводника $B = 0,1$ Тл, а угол между вектором индукции и направлением тока $\gamma = 30^\circ$.

2.1.3. Определить значение электродинамического усилия, с которым притягиваются друг к другу два параллельных круглых, бесконечно длинных проводника, находящиеся друг от друга на расстоянии $a=1$ м, когда по ним кратковременно протекают токи $i_1 = 10$ кА, $i_2 = 20$ кА. Диаметры проводников соответственно равны $d_1=10$ мм и $d_2=20$ мм. Расчет усилия провести на длине $l=1$ м.

Решение. Определим усилие, действующее на 1 м проводника. Поскольку проводники бесконечно длинные, напряженность магнитного поля на оси второго проводника от тока в первом

$$H = i_1 / (2\pi a) = 10 \cdot 10^3 / (2\pi \cdot 1).$$

Так как диаметры проводников намного меньше, чем расстояния между ними, то расчет можно вести как для бесконечно тонких проводников. Тогда усилие между проводниками в соответствии с формулой (2.1)

$$F = B i_2 l \sin \gamma = 4\pi 10^{-7} \frac{10 \cdot 10^3}{2\pi} 20 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 1 = 40 \text{ Н},$$

где $\sin \gamma = 1$, так как проводники лежат в одной плоскости; $B = \mu_0 H$; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

О т в е т : $F=40$ Н.

2.1.4. Определить величину и направление усилия, действующего между двумя параллельными проводниками длиной $l = 4$ м, по проводникам, находящимся в воздухе на расстоянии $a=3$ м друг от друга, протекают постоянные токи $i_1 = 10$ кА, $i_2=15$ кА.

2.1.5. Определить величину коэффициента контура электродинамических усилий для условий задачи 2.1.4.

2.1.6. Определить величину коэффициента контура электродинамических усилий для системы двух параллельных проводников длиной $l=10$ м, находящихся друг от друга на расстоянии $a = 2$ м.

65

2.1.7. Определить усилие, которое действует на проводник 3 со стороны проводников 1 и 2 (рис. 2.1), если по проводникам протекает ток $i=100$ кА, проводник имеет бесконечную длину, а проводники 2 и 3 - соответственно $l_2=1$ м $l_3=2$ м. Проводники круглые диаметром $d=40$ мм. Вычислить также момент усилия относительно точки B и определить точку приложения равно действующей усилия на проводник 3.

Решение. Напряженность поля в точке x проводника 3 от тока, протекающего по проводнику 1, определим на основании закон Био - Савара - Лапласа, причем, поскольку диаметры проводников значительно меньше расстояний между ними, расчет будем производить как для бесконечно тонкопроводников.

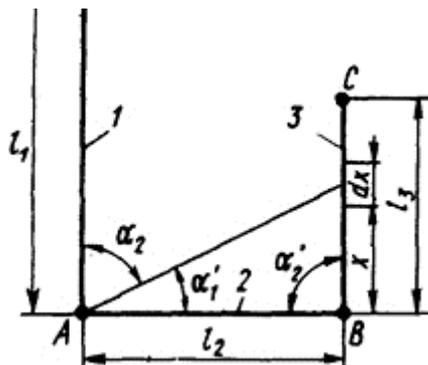


Рис. 2.1. Эскиз расположения проводников

Тогда

$$H_{1x} = \frac{i_1 (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2)}{4\pi l_2} = \frac{i}{4\pi} \frac{x + \sqrt{x^2 + l_2^2}}{l_2 \sqrt{x^2 + l_2^2}},$$

где

$$\cos \alpha_2 = 1; \cos \alpha_1 = x / \sqrt{x^2 + l_2^2}.$$

В точке x от проводника 2 напряженность поля

$$H_{2x} = \frac{i}{4\pi} \frac{\cos \alpha'_1 + \cos \alpha'_2}{x} = \frac{i}{4\pi} \frac{l_2}{x \sqrt{x^2 + l_2^2}},$$

где

$$\cos \alpha'_1 = l_2 / \sqrt{x^2 + l_2^2}; \cos \alpha'_2 = 0.$$

Следовательно, общая напряженность в точке x

$$H_x = \frac{i}{4\pi} \left[\frac{1}{l_2} + \frac{x}{l_2 \sqrt{x^2 + l_2^2}} + \frac{l_2}{x \sqrt{x^2 + l_2^2}} \right].$$

Действующее на элемент dx усилие в соответствии с (2.3)

$$dF_x = \mu_0 H_x i dx = 10^{-7} i^2 \left[\frac{1}{l_2} + \frac{x}{l_2 \sqrt{x^2 + l_2^2}} + \frac{l_2}{x \sqrt{x^2 + l_2^2}} \right] dx = 7360 \text{ Н}.$$

Тогда суммарное усилие на проводник 3

$$F = 10^3 \int_{0,04}^2 \left[1 + \frac{x}{\sqrt{x^2 + 1}} + \frac{1}{x \sqrt{x^2 + 1}} \right] dx.$$

Момент усилия F относительно точки B

$$M_B = \int_{0,02}^2 x \frac{dF_x}{dx} dx = 10^3 \int_{0,02}^2 \left(x + \frac{x^2}{\sqrt{x^2 + 1}} + \frac{1}{\sqrt{x^2 + 1}} \right) dx = 4960 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

с другой стороны, $M_B = FL$.

Тогда расстояние от точки приложения равнодействующего усилия F будет равно $L = M_B/F = 4960/7360 = 0,674 \text{ м}$.

О т в е т : $F=7360 \text{ Н}; M_B = 4960 \text{ Н} \cdot \text{м}; L = 0,674 \text{ м}$.

2.1.8. Определить величину электродинамического усилия, возникающего между двумя расположенными параллельно друг другу шинами прямоугольного сечения $h \times b = 100 \times 10 \text{ мм}$ на длине $l = 2 \text{ м}$. Расстояние между осями шин $a = 20 \text{ мм}$, по ним протекает ток к.з. $I = 54 \text{ кА}$. Шины находятся в воздухе вдали от ферромагнитных частей, и ток по их сечению распределен равномерно. При решении задач учесть влияние поперечных размеров на величину электродинамического усилия. Шины расположены широкими сторонами друг к другу.

Решение. Величина электродинамического усилия [1] $F=2 \cdot 10^{-7}$ Для данного случая расположения проводников величина $(a-b)/(b+h) = (20-10)/(10+100) = 0,091$; $b/h=10/100=0,1$. Тогда из рис. П.12 коэффициент формы $k_{\phi}=0,44$. Следовательно,

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 0,44 \cdot 54^2 \cdot 10^6 \cdot 2 / (20 \cdot 10^{-3}) = 257\,000 \text{ Н.}$$

О т в е т: $F=257000 \text{ Н.}$

2.1.9. Определить электродинамическое усилие, возникающее между двумя шинами, расположенными параллельно друг другу узкими сторонами, если по ним протекает ток к.з. $I=60 \text{ кА}$, расстояние между осями шин $a=110 \text{ мм}$, размеры поперечного сечения шин $100 \times 100 \text{ мм}$. Шины находятся в воздухе вдали от ферромагнитных частей, и ток по их сечению распределен равномерно. Расчет усилия произвести для длины участка шин $l=3 \text{ м}$, при этом учесть влияние поперечных размеров.

2.1.10. Определить электродинамическое усилие, действующее на проводник 1, со стороны проводника 2 (рис. 2.2), если по проводникам протекает постоянный ток $I=12 \text{ кА}$, а длины участков соответственно $l_1 = 1 \text{ м}$, $l_2 = 2 \text{ м}$. Проводники круглые диаметром $d=10 \text{ мм}$ и находятся в воздухе на достаточном удалении от ферромагнитных частей.

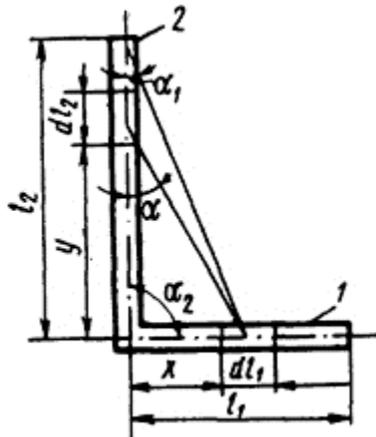


Рис. 2.2. Эскиз расположения проводников

Решение. Выделим элементы проводников dl_1 и dl_2 и определим элементарную силу, действующую со стороны элемента dl_2 на элемент dl_1 . Так как проводники находятся в одной плоскости, то со стороны проводника 2 на проводник 1 действует элементарная сила

$$dF_{1/2} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi r^2} dl_1 dl_2,$$

или для $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Гн/м}$ $dF_{1/2} = 10^{-7} I^2 dl_1 dl_2 / r^2$.

Суммарная сила, действующая на проводник 1,

$$F_{1/2} = 10^{-7} I^2 \int_{d/2}^{l_1} \int_{d/2}^{l_2} \frac{\sin \alpha}{r^2} dl_1 dl_2 = 10^{-7} I^2 \int_{d/2}^{l_1} \int_{\pi/2}^{\alpha_1} -\frac{\sin \alpha}{x} dx d\alpha.$$

Здесь

$$r = x / \sin \alpha; dl_1 = dx; dl_2 = dy; y = x \operatorname{ctg} \alpha; dy = -\frac{x}{\sin^2 \alpha} d\alpha.$$

После интегрирования и учитывая, что $\cos \alpha_1 = l_2 / \sqrt{l_2^2 + x^2}$, получаем

$$F_{1/2} = 10^{-7} I^2 \ln \frac{l_1 + \sqrt{l_2^2 + (d/2)^2}}{(d/2) (l_2 + \sqrt{l_2^2 + l_1^2})} = 10^{-7} \cdot 122 \cdot 10^6 \times \\ \times \ln \frac{1 + \sqrt{2^2 + 5^2 \cdot 10^{-6}}}{5 \cdot 10^{-3} (2 + \sqrt{2^2 + 1})} = 75,2 \text{ Н.}$$

О т в е т: $F_{1/2} = 75,2 \text{ Н.}$

2.1.11. Определить электродинамическое усилие, действующее на проводник 1 для условий задачи 2.1.10 (см. рис. 2.2) той лишь разницей, что проводник 2 имеет бесконечную длин. Остальные данные без изменения.

2.1.12. Определить электродинамическое усилие, действующее на перемычку, соединяющую две параллельные шины круглого сечения (рис. 2.3), если по шинам и перемычке протекает

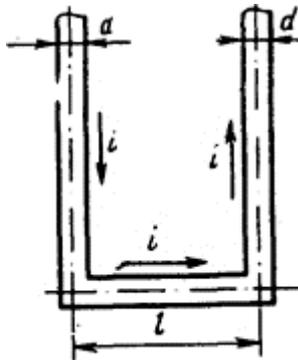


Рис. 2.3. Эскиз расположения шин

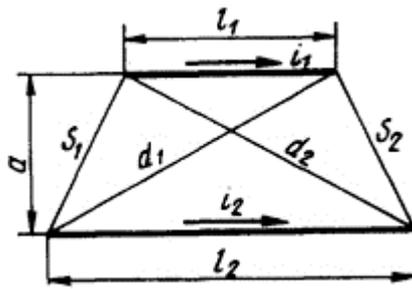


Рис. 2.4. Эскиз расположения шин

постоянный ток $I = 15 \text{ кА}$, диаметр шин и перемычки $d = 20 \text{ мм}$ расстояние между шинами $a = 0,5 \text{ м}$, шины имеют бесконечную длину.

2.1.13. Определить электродинамическое усилие для условий задачи 2.1.10, действующее на проводник 2 со стороны проводника 1.

2.1.14. Определить значения коэффициентов контура электродинамических усилий для условий задач 2.1.10 и 2.1.13.

68

2.1.15. Определить электродинамическое усилие, действующее между параллельно расположенными шинами (рис. 2.4), если $I_1 = 10$ кА, $I_2 = 15$ кА, $l_1 = 1$ м, $l_2 = 1,5$ м, $a = 0,5$ м.

Решение. Электродинамическое усилие определим по формуле (2.7) $F_{1/2} = \mu_0 I_1 I_2 k_{1/2} / 4\pi$. Из табл. П.18 коэффициент контура электродинамических усилий

$$k_{1/2} = [d_1 + d_2 - (s_1 + s_2)] = 2(1,35 - 0,556) / 0,5 = 3,17;$$

для воздуха $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Тогда $F_{1/2} = 10^{-7} \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 3,17 = 47,6$ Н.

О т в е т : $F_{1/2} = 47,6$ Н.

2.1.16. Решить задачу 2.1.15 при условии, что проводник 2 имеет бесконечную длину. Остальные данные без изменения.

2.1.17. На рис. 2.5 изображены два отрезка проводников с токами. Определить электродинамическое усилие между этими проводниками, если по ним протекают токи $i_1 = 20$ кА, $i_2 = 30$ кА, угол $\alpha = 30^\circ$, длина проводников $l_1 = l_2 = 1,5$ м, $a = 0,5$ м.

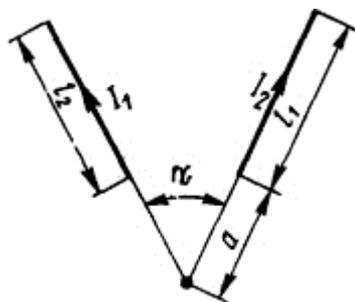


Рис. 2.5. Эскиз расположения проводников

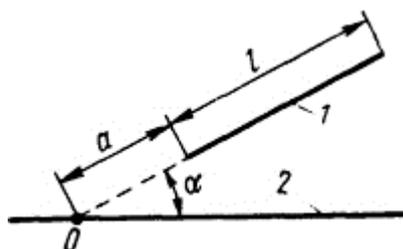


Рис. 2.6. Эскиз расположения проводников

2.1.18. Проводник 1 длиной $l = 2$ м, по которому протекает ток $i_1 = 10$ кА, расположен под углом $\alpha = 30^\circ$ к проводнику 2, имеющему бесконечную длину, по которому протекает ток $i_2 = 15$ кА (рис. 2.6). Вычислить момент силы относительно точки О и найти точку приложения равнодействующей, если $a = 0,5$ м.

2.1.19. Определить усилие, действующее на нож рубильника (рис. 2.7), в момент, когда он размыкает цепь тока $I = 500$ А и между контактами горит дуга. Длина ножа рубильника $t = 60$ мм, угол между ножом и вертикалью $\alpha = 30^\circ$. Длины подводящих вертикальных шин принять бесконечными.

2.1.20. Определить усилие, с которым пластины ножа полюса разъединителя прижимаются к контактам во время протекания по ним тока к.з. $I=50$ кА, если полюс разъединителя состоит из двух параллельных пластин, расположенных на расстоянии $a=20$ мм друг от друга (рис. 2.8). Длина ножа разъединителя $l=300$ мм.

69

2.1.21. Определить усилие, которое во время к.з. стремится разомкнуть нож разъединителя, изображенного на рис. 2.9, ее; длина подводящих шин, расположенных горизонтально, бесконечна, а длина ножа разъединителя $l = 350$ мм. Ток к.з. $I=35$ кА

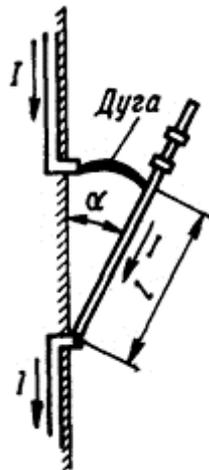


Рис. 2.7. Эскиз рубильника

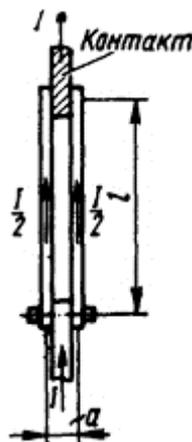


Рис. 2.8. Эскиз разъединителя

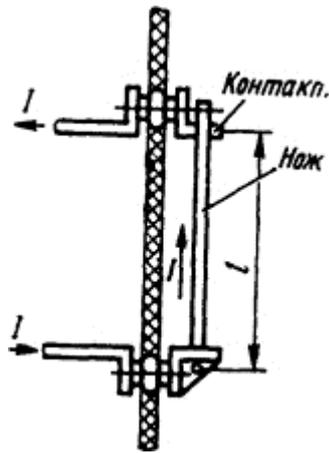


Рис. 2.9. Эскиз разъединителя

2.1.22. Определить электродинамическое усилие, действующее на 1 м круглого проводника диаметром $d=20$ мм. Проводник расположен на расстоянии $a/2=10$ см вдоль ферромагнитной стенки и по нему протекает ток $I = 1000$ А.

Решение. Так как диаметр проводника значительно меньше, чем расстояние до ферромагнитной стенки, то к решению следует подходить, как и в случае бесконечно тонкого проводника. Методом зеркального изображения найдем электродинамическое усилие, которое действует между данным проводником и его зеркальным изображением относительно поверхности ферромагнитной стенки с тем же током I .

Тогда $F = \mu_0 I^2 l / (2\pi a) = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10^6 / (2\pi \cdot 0,2) = 1,0$ Н, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м $a = 2 \cdot 10 \cdot 10^{-2} = 0,2$ м.

Ответ: $F = 1,0$ Н.

2.1.23. Определить усилие, с которым проводник, проложенный вдоль ферромагнитной стенки на расстоянии 20 см от нее притягивается к ней, если длина проводника $l=0,5$ м и по нему течет ток $I=10$ кА.

70

2.2. Расчет электродинамических усилий по энергетическим формулам

Приведенные в этом параграфе задачи дают возможность освоить метод расчета усилий по энергетическому принципу для наиболее часто встречающихся на практике случаев, т.е. для параллельных шин, полубесконечных петель, катушек, витков и других примеров, где индуктивность или взаимоиндуктивность контуров может быть выражена как функция координаты, в направлении которой вычисляется сила взаимодействия. При этом используются следующие расчетные формулы и соотношения.

70

Обобщенное усилие, действующее на проводник при $i = \text{const}$,

$$F = dW/dg, \quad (2.8)$$

где W - электромагнитная энергия системы, Дж; g - обобщенная координата, м.

В линейных системах, поскольку

$$W = \frac{1}{2} L I_1^2 + \frac{1}{2} L I_2^2 + M I_1 I_2 \quad (2.9)$$

$$F = \frac{I_1^2}{2} \frac{dL}{dg} + \frac{I_2^2}{2} \frac{dL}{dg} + I_1 I_2 \frac{dM}{dg} \quad (2.10)$$

где L - индуктивность системы, Гн.

Электродинамическое усилие в проводниках при изменении поперечного сечения (усилие Двайта)

$$F_D = \frac{\pi}{4\alpha} I^2 \frac{D}{d} \quad (2.11)$$

где D, d - соответственно диаметры большего и меньшего поперечного сечения, м; μ_0 - магнитная проницаемость вакуума, Гн/м.

2.2.1. Определить электродинамическое усилие, возникающее между двумя витками цилиндрического однослойного реактора, имеющего радиус $R=1$ м. Витки имеют шаг $h=10$ мм. По реактору протекает ток к.з. $I=50$ кА.

Р е ш е н и е . Для решения задачи воспользуемся формулой (2.8)

$$F_g = dW/dg,$$

где $W = I^2 M + W_{\text{соб}}$ - полная электромагнитная энергия системы; g - возможное перемещение в направлении действия усилия, т.е. $dg = dh$; $W_{\text{соб}}$ - часть электромагнитной энергии, обусловленная собственной индуктивностью витков. При изменении координаты g остается неизменным $W_{\text{соб}}$, поэтому из формулы (2.1)

$$F_h = I^2 \frac{dM}{dh}.$$

Если $h=0,4R$ (это имеет место для условий задачи), взаимная индуктивность $M = \mu_0 R [\ln(8R/h) - 2]$ (см. табл. П.19). Тогда $F_h = - I^2 \mu_0 R / h = - 50^2 \cdot 10 \cdot 4\pi 10^{-7} / (10 \cdot 10^{-9}) = - 3140$ Н.

Ответ: $F=3140$ Н.

2.2.2. Определить усилия в условиях задачи 2.2.1, стремящиеся разорвать витки цилиндрического реактора, а также сжимающие проводники, изготовленные из круглого провода, радиус которого $r=10$ мм.

Р е ш е н и е . Полная электромагнитная энергия витков [1]

$$W = I_1 I_2 M + 0,5 L_1 I_1^2 + 0,5 L_2 I_2^2,$$

где взаимную индуктивность M определим как в задаче 2.2.1; $L_1=L_2=L = \mu_0 R [\ln(8R/r) - 7/4]$ - собственные индуктивности витков для $r \ll R$; $I_1 = I_2 = I$ (см. табл. П.19).

$$W = I^2 \mu_0 R \left[\ln \frac{8R}{r} + \ln \frac{8R}{R} - \frac{15}{4} \right].$$

Доля энергии, приходящаяся на один виток, будет $0,5 W$.

Из формулы (2.8) при $g=R$ усилие, разрывающее виток,

$$F_R = \frac{dW}{dR} = \frac{1}{2} I^2 \mu_0 \left[\ln \frac{8R}{r} + \ln \frac{8R}{R} - \frac{15}{4} + 2 \right] = \frac{1}{2} \cdot 50^2 \cdot 10^6 \cdot 4\pi 10^{-7} \left[\ln \frac{8}{10^{-3}} + \ln \frac{8}{10^{-3}} - \frac{15}{4} + 2 \right] = 11000 \text{ Н}.$$

Эта сила равномерно распределена по дуге окружности витка. Сила же стремящаяся разорвать виток, $F=F_R/(2\pi) = 1750$ Н. Сила, сжимающая проводник в направлении его радиуса, определится из формулы (2.8) $g=r$;

$$F_r = \frac{dF}{dr} = \frac{dF_R R}{-2r} = -0,5 \cdot 50 \cdot 10^4 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot (1/10^{-9}) = -157000 \text{ Н.}$$

Эта сила равномерно распределена по всей поверхности витка.

О т в е т : $F= 1750$ Н; $F_r = 157000$ Н.

2.2.3. Определить усилие, стремящееся разорвать круговой виток радиусом $R=1$ м, если по нему протекает ток $I=40$ кА

Диаметр поперечного сечения витка $d=10$ мм.

2.2.4. Определить усилие, действующее между двумя круговыми витками 1, 2 (рис. 2.10), если по виткам протекают токи $i_1 = 10$ кА, $i_2=15$ кА. Радиусы витков $R_1 = 0,5$ м, $R_2=1$ м диаметры проводников, из которых изготовлены витки, $d_1=d_2 = 20$ мм. Расстояние между витками, находящимися в воздухе, $h = 0,5$ м. Вычислит усилия, разрывающие витки, и давления, сжимающие проводники, а также определить направления усилий.

Р е ш е н и е . Если $h \approx R$, то для двух витков взаимная индуктивность из табл. П. 19

$$M = \mu_0 R_1 \left[\ln \frac{8R_1}{\sqrt{h^2 + (R_2 - R_1)^2}} - 2 \right].$$

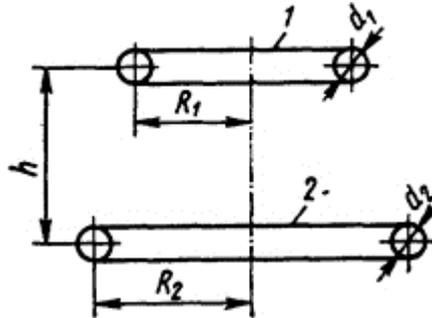


Рис. 2.10. Эскиз расположения витков

Тогда вертикальная составляющая усилия между витками в соответствии с (2.8)

$$\begin{aligned} F_h &= I_1 I_2 \frac{dM}{dh} = -I_1 I_2 \mu_0 h [h^2 + (R_2 - R_1)^2] = \\ &= -10 \cdot 10^3 \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,5 / [(0,5)^2 + (1 - 0,5)^2] = -94,3 \text{ Н.} \end{aligned}$$

Знак минус свидетельствует о том, что с уменьшением расстояния взаимная индуктивность увеличивается.

Радиальные составляющие усилий

$$\begin{aligned}
F'_{R1} &= I_1 I_2 \frac{dM}{dR_1} = I_1 I_2 \mu_0 \left[\ln \frac{8R_1}{\sqrt{h^2 + (R_2 - R_1)^2}} - 1 + \frac{R_1(-R_2 - R_1)}{h^2 + (R_2 - R_1)^2} \right] = \\
&= 10 \cdot 10^3 \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\ln \frac{8 \cdot 0,5}{\sqrt{0,5^2 + (1,0 - 0,5)^2}} - 1 + \right. \\
&\quad \left. + \frac{0,5(-1,0 - 0,5)}{0,5^2 + (1,0 - 0,5)^2} \right] = 232 \text{ Н};
\end{aligned}$$

72

$$\begin{aligned}
F'_{R2} &= I_1 I_2 \frac{dM}{dR_2} = I_1 I_2 \mu_0 R_1 \left[-\frac{R_2 - R_1}{h^2 + (R_2 - R_1)^2} \right] = \\
&= -10 \cdot 10^3 \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{0,5(1,0 - 0,5)}{0,5^2 + (1,0 - 0,5)^2} = -94,3 \text{ Н}.
\end{aligned}$$

Знак минус свидетельствует о том, что данная сила сжимает виток 2.

Усилия, обусловленные собственными индуктивностями контуров, определим по формуле (2.10)

$$\begin{aligned}
F^*_{R1} &= \frac{1}{2} I_1^2 \frac{dL_1}{dR_1} = \frac{1}{2} I_1^2 \mu_0 \left(\ln \frac{8R_1}{r_1} - 0,75 \right) = \\
&= \frac{1}{2} 10^2 \cdot 10^6 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \left(\ln \frac{8 \cdot 0,5}{0,01} - 0,75 \right) = 330 \text{ Н}; \\
F^*_{R2} &= \frac{1}{2} I_2^2 \frac{dL_2}{dR_2} = \frac{1}{2} I_2^2 \mu_0 \left(\ln \frac{8R_2}{r_2} - 0,75 \right) = \\
&= \frac{1}{2} 15^2 \cdot 10^6 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \left(\ln \frac{8 \cdot 1,0}{0,01} - 0,75 \right) = 840 \text{ Н},
\end{aligned}$$

Тогда результирующие усилия, разрывающие витки, $F_{R1} = F'_{R1} + F^*_{R1} = 232 + 330 = 562 \text{ Н}$; $F_{R2} = F'_{R2} + F^*_{R2} = -94,3 + 840 = 745,7 \text{ Н}$. Эти усилия равномерно распределены по дугам окружностей соответствующих витков.

Усилия, стремящиеся разорвать витки,

$$\begin{aligned}
F_1 &= F_{R1} / (2\pi) = 562 / (2 \cdot 3,14) = 89,4 \text{ Н}; \quad F_2 = F_{R2} / (2\pi) = 745,7 / (2 \cdot 3,14) = \\
&= 119 \text{ Н}.
\end{aligned}$$

Для определения усилий, сжимающих витки, необходимо вычислить

$$F_{r1} = \frac{1}{2} I_1^2 \frac{dL_1}{dr_1} = -\frac{1}{2} I_1^2 \mu_0 \frac{R_1}{r_1} = -\frac{1}{2} 10^2 \cdot 10^6 \cdot 4\pi 10^{-7} \cdot 0,5 \frac{1}{0,01} =$$

$$= -3140 \text{ Н};$$

$$F_{r2} = \frac{1}{2} I_2^2 \frac{dL_2}{dr_2} = -\frac{1}{2} I_2^2 \mu_0 \frac{R_2}{r_2} = -\frac{1}{2} 15^2 \cdot 10^6 \cdot 4\pi 10^{-7} \cdot 1,0 \frac{1}{0,01} =$$

$$= -14400 \text{ Н}.$$

Эти усилия распределены равномерно по боковым поверхностям витков. Здесь знаки минус свидетельствуют о том, что происходит сжатие проводников. Следовательно, давления, действующие на боковые поверхности проводников,

$$p_1 = F_{r1}/(2\pi r_1 \cdot 2\pi R_1) = 3140/(4 \cdot 3,14^2 \cdot 0,01 \cdot 0,5) = 15900 \text{ Н/м}^2;$$

$$p_2 = F_{r2}/(2\pi r_2 \cdot 2\pi R_2) = 14400/(4 \cdot 3,14^2 \cdot 0,01 \cdot 1,0) = 36700 \text{ Н/м}^2.$$

Отв ет: $F_h = 94,3 \text{ Н}$; $F_1 = 89,4 \text{ Н}$; $F_2 = 119 \text{ Н}$; $p_1 = 15900 \text{ Н/м}^2$; $p_2 = 36700 \text{ Н/м}^2$.

2.2.5. Вычислить электродинамическое усилие, с которым притягиваются друг к другу два круглых диаметром $d = 5 \text{ мм}$

73

соседних витка цилиндрического реактора, имеющего средний радиус витков $R = 0,5 \text{ м}$, если по реактору протекает ток $I = 35 \text{ кА}$. Шаг витков реактора $h = 10 \text{ мм}$.

2.2.6. Определить усилия, разрывающие витки реактора, а также усилия, сжимающие проводники витков, для условий задачи 2.2.5 с той лишь разницей, что ток к.з. $I = 40 \text{ кА}$. Остальные данные без изменения. Вычислить также величины коэффициентов контуров электродинамических усилий в этих условиях.

2.2.7. Вычислить электродинамическое усилие, с которым взаимодействуют два круговых витка радиусом $R = 0,8 \text{ м}$, лежащих в параллельных плоскостях на расстоянии 20 мм друг от друга и имеющих общую ось, если по одному из витков протекает ток $I_1 = 10 \text{ кА}$, а по другому $I_2 = 30 \text{ кА}$. Определить также величину коэффициента контура электродинамических усилий.

2.2.8. Для условий задачи 2.2.7 определить усилия, с которыми разрываются витки. Удовлетворяют ли они условиям прочности, если диаметры проводников $d_1 = 10 \text{ мм}$ и $d_2 = 30 \text{ мм}$, а сами проводники изготовлены из меди, для которой допустимое напряжение на разрыв $\sigma = 10^4 \text{ Н/см}^2$. Вычислить также усилия, сжимающие проводники витков.

2.2.9. Определить усилие, действующее между двумя витками 1 и 2, радиусы которых $R_1 = 0,25 \text{ м}$ и $R_2 = 0,4 \text{ м}$ (см. рис. 2.10). Витки изготовлены из медных проводников круглого поперечного сечения диаметром $d = 10 \text{ мм}$ и по ним протекают в одном направлении токи $I_1 = I_2 = I = 25 \text{ кА}$. Шаг витков $h = 0,25 \text{ м}$. Проверить, удовлетворяют ли условиям прочности поперечные сечения проводников; если не удовлетворяют, то подобрать ближайшие стандартные сечения, вычислить также давления, сжимающие проводники витков.

2.2.10. Для условий задачи 2.2.9 вычислить коэффициенты контуров электродинамических усилий между витками, разрывающих витки и сжимающих проводники витков.

2.2.11. Определить усилие, разрывающее виток прямоугольного сечения, размер которого $a \times b = 10 \times 20$ мм, средний радиус витка ($R = 1,0$ м. По витку протекает ток $I = 20$ кА. Вычислить также давления, с которым сжимаются горизонтальные и вертикальные грани поперечного сечения.

Решение. Индуктивность витка радиуса R с прямоугольным поперечным сечением $L = \mu_0 R \left(\ln \frac{8R}{a+b} - 0,5 \right)$ (см. табл. П.19). Тогда усилие, разрывающее виток, определим из формулы (2.10) с учетом зависимостей задачи 2.2.1

$$F = \frac{1}{4\pi} I^2 \frac{dL}{dR} = \frac{1}{4\pi} I^2 \mu_0 \left(\ln \frac{8R}{a+b} + 0,5 \right) =$$

$$= \frac{1}{4\pi} 4 \cdot 10^8 \cdot 4\pi 10^{-7} \left(\ln \frac{8 \cdot 1}{30 \cdot 10^{-3}} + 0,5 \right) = 244 \text{ Н.}$$

74

Давление, действующее на грани шириной a ,

$$p_a = \frac{1}{2\pi R \cdot 2a} \frac{I^2}{2} \frac{dL}{da} = - \frac{I^2}{8\pi R a} \frac{\mu_0 R}{a+b} =$$

$$= - \frac{20^2 \cdot 10^6 \cdot 4\pi 10^{-7} \cdot 1}{8\pi \cdot 1 \cdot 10 \cdot 10^{-3} (10 + 20) 10^{-3}} = - 6,68 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2.$$

Давление, действующее на грань шириной b ,

$$p_b = \frac{1}{2\pi R \cdot 2b} \frac{I^2}{2} \frac{dL}{db} = - \frac{I^2 \mu_0}{8\pi R b (a+b)} = - \frac{20^2 \cdot 10^6 \cdot 4\pi 10^{-7}}{8\pi \cdot 1 \cdot 20 \cdot 10^{-3} (10 + 20) 10^{-3}} =$$

$$= - 3,33 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2.$$

О т в е т : $F = 244$ Н; $p_a = 6,68 \cdot 10^4$ Н/м²; $p_b = 3,33 \cdot 10^4$ Н/м².

2.2.12. Определить усилие, действующее на виток в направлении изменения его радиуса, если по витку протекает ток $I = 15$ кА, виток имеет прямоугольное поперечное сечение с размерами $a \times b = 5 \times 10$ мм, а его средний радиус $R = 0,5$ м.

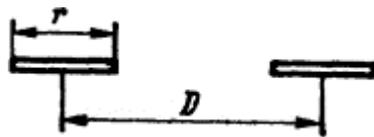


Рис. 2.11. Эскиз однослойной катушки индуктивности

2.2.13. Для условий задачи 2.2.12 вычислить давления, действующие на грани проводника, а также коэффициенты контуров электродинамических усилий, если поперечное сечение проводника выполнить квадратным с той же площадью.

2.2.14. Определить усилие, сжимающее витки однослойной катушки индуктивности, имеющей $N=20$ витков, размеры которой $r=100$ мм, $D=500$ мм (рис. 2.11), если по катушке протекает ток $I=1,0$ кА. Вычислить также усилие, стремящееся разорвать катушку.

Р е ш е н и е . Индуктивность однослойной катушки из табл. П. 19

$$L = \frac{\mu_0}{2} N^2 D \left[\left(1 + \frac{r^2}{24D^2} \right) \ln \frac{4D}{r} - \frac{1}{2} + \frac{43}{288} \frac{r^2}{D^2} \right].$$

Тогда усилие, сжимающее витки катушки на основе формулы (2.10), равно

$$\begin{aligned} F_r = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{dr} &= \frac{1}{4} \mu_0 N^2 D I^2 \left[\left(1 + \frac{r^2}{24D^2} \right) \left(-\frac{1}{r} \right) + \frac{2r}{24D^2} \ln \frac{4D}{r} + \right. \\ &+ \left. \frac{43}{288} \frac{2r}{D^2} \right] = 0,25 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 20^2 \cdot 0,5 \cdot 10^6 \left[\left(1 + \frac{100^2 \cdot 10^{-6}}{24 \cdot 0,5^2} \left(-\frac{1}{100 \cdot 10^{-3}} \right) + \right. \right. \\ &+ \left. \left. \frac{2 \cdot 100 \cdot 10^{-3}}{24 \cdot 0,5^2} \ln \frac{4 \cdot 0,5}{100 \cdot 10^{-3}} + \frac{43 \cdot 2 \cdot 100 \cdot 10^{-3}}{288 \cdot 0,5^2} \right) \right] = 6120 \text{ Н.} \end{aligned}$$

Это усилие равномерно распределено по дугам окружностей, ограничивающих витки катушки.

75

Усилие, разрывающее катушку, на основе формулы (2.10) равно

$$\begin{aligned} F_D = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{dD} &= \frac{1}{4} \mu_0 N^2 I^2 \left[\left(1 - \frac{r^2}{24D^2} \right) \ln \frac{4D}{r} + 0,5 + \frac{r^2}{24D^2} - \right. \\ &- \left. \frac{43}{288} \frac{r^2}{D^2} \right] = \frac{1}{4} 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 20^2 \cdot 10^6 \left[\left(1 - \frac{100^2 \cdot 10^{-6}}{24 \cdot 0,5^2} \right) \ln \frac{4 \cdot 0,5}{10 \cdot 10^{-3}} + \right. \\ &+ \left. 0,5 + \frac{100^2 \cdot 10^{-6}}{24 \cdot 0,5^2} - \frac{43}{288} \frac{100^2 \cdot 10^{-6}}{0,5^2} \right] = 440 \text{ Н.} \end{aligned}$$

Это усилие распределено по окружности радиуса $D/2$.

О т в е т : $F=6120$ Н; $F_D=440$ Н.

2.2.15. Вычислить усилие, стремящееся сжать витки однослойной катушки индуктивности, имеющей 30 витков прямоугольного провода (см. рис. 2.11). По катушке протекает ток $I=500$ А, а ее размеры $r=50$ мм, $D=300$ мм.

2.2.16. Вычислить усилие, стремящееся разорвать однослойную катушку дискового реактора. Катушка состоит из 10 витков и по ней протекает ток $I=800$ А, ее внутренний диаметр $D_{\text{вн}}=320$ мм, наружный $D_{\text{нар}}=480$ мм. Определить также усилие, сжимающее витки катушки.

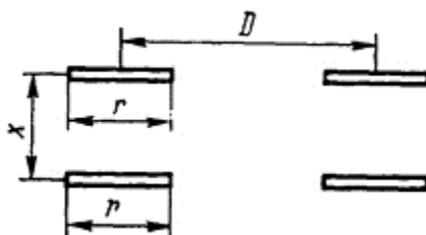


Рис. 2.12. Эскиз расположения плоских катушек

2.2.17. Определить усилие, с которым две одинаковые плоские катушки (рис. 2.12) притягиваются друг к другу, если по ним протекают токи $I_1=I_2=I=100$ А. Расстояние между катушками $x=15$ см, размеры катушек $r=10$ см, $D=50$ см, каждая катушка имеет по $N=20$ витков провода.

Решение. Взаимная индуктивность двух плоских катушек из табл. П.19:

$$M = 0,25\mu_0 N^2 D \left[\left(1 + \frac{3}{4} \frac{x^2}{D^2} + \frac{r^2}{24D^2} \right) \ln \frac{16D^2}{x^2 + r^2} + \right. \\ \left. + \left(1 + \frac{5}{8} \frac{x^2}{D^2} \right) \frac{x^2}{r^2} \ln \frac{x^2 + r^2}{x^2} - 4 \left(1 + \frac{x^2}{D^2} \right) \frac{x}{r} \operatorname{arctg} \frac{r}{x} - 1 + \frac{37}{24} \frac{x^2}{D^2} \right].$$

Тогда усилие, действующее между катушками, на основе формулы (2.10)

$$F_x = I_1 I_2 \frac{dM}{dx} = I^2 0,25\mu_0 N^2 D \left[\frac{3}{2} \frac{x}{D^2} \ln \frac{16D^2}{x^2 + r^2} - \left(1 + \frac{3}{4} \frac{x^2}{D^2} + \frac{r^2}{24D^2} \right) \times \right. \\ \times \frac{2x}{x^2 + r^2} + \left(\frac{2x}{r^2} + \frac{5}{8} \frac{4x^3}{D^2 r^2} \right) \ln \frac{x^2 + r^2}{x^2} + \left(1 + \frac{5}{8} \frac{x^2}{D^2} \right) \frac{x^2}{r^2} \times \\ \times \left(\frac{2x}{x^2 + r^2} - \frac{2}{x} \right) - 4 \left(\frac{1}{r} + \frac{2x^2}{D^2 r} \right) \operatorname{arctg} \frac{r}{x} - 4 \left(1 + \frac{2}{3} \frac{x^2}{D^2} \right) \frac{x}{x^2 + r^2} +$$

76

$$+ \left. \frac{37}{12} \frac{x}{D^2} \right] = 0,25 \cdot 10^4 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 400 \cdot 0,5 \left[\frac{3}{2} \cdot \frac{0,15}{0,25} \cdot \ln \frac{16 \cdot 0,25}{0,0225 + 0,01} - \right. \\ - \left(1 + \frac{3}{4} \cdot \frac{0,0225}{0,25} + \frac{0,01}{24 \cdot 0,0225} \right) \frac{2 \cdot 0,15}{0,0225 + 0,01} + \left(\frac{2 \cdot 0,15}{0,01} + \right. \\ \left. + \frac{5}{8} \cdot \frac{0,001 \cdot 4}{0,25 \cdot 0,01} \right) \ln \frac{0,0225 + 0,01}{0,0225} + \left(1 + \frac{5}{8} \cdot \frac{0,0225}{0,25} \right) \times \\ \times \frac{0,0225}{0,01} \left(\frac{2 \cdot 0,1}{0,0225 + 0,01} - \frac{2}{0,15} \right) - 4 \left(\frac{1}{0,1} + 2 \frac{0,0225}{0,25 \cdot 0,01} \right) \operatorname{arctg} \frac{0,1}{0,15} - \\ \left. - 4 \left(1 + \frac{2}{3} \frac{0,0225}{0,25} \right) \frac{0,15}{0,0225 + 0,01} + \frac{37}{12} \cdot \frac{0,15}{0,25} \right] = -66,2 \text{ Н.}$$

Ответ: $F_x = 66,2$ Н.

Ответ: $F_x = 66,2$ Н.

2.2.18. Определить усилие, с которым отталкиваются друг от друга два дисковых реактора, если по ним протекают токи $I_1=80$ кА, $I_2=120$ кА, расстояние между реакторами $x=20$ см (см. рис. 2.12), размеры реакторов одинаковы: $r=15$ см, $D = 80$ см. Реакторы выполнены из проводников прямоугольного поперечного сечения, имеют по 25 витков, высота поперечного сечения проводов намного меньше, чем расстояние между реакторами.

2.2.19. Для условий задачи 2.2.18 вычислить усилия, сжимающие проводники отдельных реакторов, и усилия, стремящиеся разорвать реакторы, а также определить коэффициенты контуров электродинамических усилий.

2.2.20. Определить усилие, с которым круглый проводник длиной $l= 1$ м и с током $I = 1500$ А притягивается к ферромагнитной стенке, если он находится от нее на удалении $a=20$ см. Ферромагнитная стенка имеет бесконечную магнитную проницаемость. Диаметр проводника $2r=10$ мм. Вычислить также усилие, сжимающее проводник.

Решение. Если проводники расположены вдоль ферромагнитной стенки, то при расчете можно воспользоваться методом зеркальных отображений. Следовательно, индуктивность провода, расположенного вдоль ферромагнитной стенки на расстоянии a , равна индуктивности однофазной линии с проводами, расположенными на расстоянии $b = 2a$, т.е. для 1 м длины провода [10]

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \left(\ln \frac{b}{r} + \frac{1}{4} \right).$$

Тогда усилие, действующее на проводник, определится из формулы (2.10):

$$F_b = \frac{I^2}{2} \frac{dL}{db} = \frac{I^2}{2} \frac{\mu_0}{\pi} \frac{1}{b} = \frac{1500^2}{2} \cdot \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{\pi} \cdot \frac{1}{2 \cdot 0,2} = 1,12 \text{ Н.}$$

Усилие, сжимающее проводник,

$$F_r = \frac{I^2}{2} \frac{dL}{dr} = \frac{I^2}{2} \frac{\mu_0}{\pi} \left(-\frac{1}{r} \right) = \frac{1500^2}{2} \cdot \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{\pi} \cdot \frac{1}{0,01} = -45 \text{ Н.}$$

Ответ: $F_b=1,12$ Н; $F_r=-45$ Н.

О т в е т : $F_b = 1,12$ Н; $F_r = -45$ Н.

2.2.21. Определить значение электродинамического усилия, действующего на 1 м круглого проводника, расположенного вдоль ферромагнитной стенки на расстоянии 10 см от нее, если по проводнику протекает ток $I=10$ кА.

2.2.22. Вычислить усилие, действующее на проводник с током, находящийся в прямоугольном пазу ферромагнитной стенки, если по проводнику протекает ток $I = 2,0$ кА, магнитная проницаемость ферромагнитного материала $\mu = \infty$, длина паза $l = 100$ мм, ширина $\delta = 10$ мм.

2.2.23. Определить значение электродинамического усилия, которое возникает и стремится разомкнуть два круглых медных стержня диаметром $d=10$ мм. Торцы стержней

обработаны под сферу радиуса $r=40$ мм, стержни стянуты силой $F=98$ Н и по ним протекает ток короткого замыкания $I=10$ кА.

Решение. Так как здесь имеет место пластическая деформация (читатель это может проверить), то радиус площадки касания

$$a = \sqrt{F/(\pi\sigma_{см})} = \sqrt{98/(3,14 \cdot 39300)} = 2,85 \cdot 10^{-2} \text{ см},$$

где $\sigma_{см}=39300$ Н/м² - напряжение смятия для меди (см. табл. П.16). По формуле Двайта (2.11) электродинамическое усилие

$$F_D = I^2 10^{-7} \ln \frac{d}{2a} = 10^8 \cdot 10^{-7} \ln \frac{10}{0,57} = 28,7 \text{ Н}.$$

О т в е т: $F_D=28,7$ Н.

2.2.24. Определить усилие, разрывающее проводник с током $I=100$ кА в месте, где проводник изменяет свое поперечное сечение от $D=50$ мм до $d=20$ мм.

Решение. Для нахождения усилия, разрывающего проводник, воспользуемся формулой Двайта (2.11)

$$F_D = \frac{\mu_0}{4\pi} I^2 \ln \frac{D}{d} = \frac{4\pi 10^{-7}}{4\pi} \cdot 10^{10} \ln \frac{50}{20} = 720 \text{ Н}.$$

О т в е т: $F_D = 720$ Н.

2.2.25. Электрический контакт образован путем сжатия двух круглых медных стержней силой $F=400$ Н. Определить, с каким усилием эти стержни стремятся оттолкнуться друг от друга, если по ним протекает ток $I=10$ кА, диаметр стержней, изготовленных из твердой меди, $d=20$ мм, торцовые поверхности имеют радиус закругления $r=10$ мм.

2.2.26. Шина прямоугольного сечения 25×3 мм плавно переходит в шину размерами поперечного сечения 10×3 мм. Определить усилие, стремящееся разорвать шину, если по ней протекает ток $I=10,0$ кА.

2.3. Расчет электродинамических усилий при переменном токе

В данном параграфе приведены задачи на расчет электродинамических усилий, когда по проводникам протекает переменный ток. Так как усилия, действующие на проводники при переменном токе, изменяются во времени,

то возникает необходимость в определении и правильном выборе собственной частоты колебаний элементов электрических аппаратов, подвергающихся воздействию этих усилий. Необходимо правильно рассчитать значения максимальных усилий, которые зависят от вида и места к.з. в системе. При этом используются следующие расчетные формулы и соотношения.

Электродинамическое усилие между двумя проводниками в однофазной системе

$$F_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi} k_{1/2} I_m^2 (1 - \cos 2\omega t)/2, \quad (2.12)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная проницаемость вакуума; I_m - максимальное значение тока при синусоидальном законе его изменения, А; $\omega = 2\pi f$ - круговая частота тока с^{-1} ; f - частота тока, Гц; $k_{1/2}$ - коэффициент контура электродинамических усилий.

Закон изменения тока при однофазном коротком замыкании

$$i = I_m (e^{-at} - \cos \omega t), \quad (2.13)$$

где a - постоянная затухания аperiodической составляющей тока, с^{-1} .

Значение ударного тока короткого замыкания

$$i_{\text{из}} = 1,81\sqrt{2}I, \quad (2.14)$$

где I - действующее значение установившегося тока короткого замыкания. Значение максимального отталкивающего усилия, действующего на крайние проводники в трехфазной системе при расположении проводников в одной плоскости на одинаковом расстоянии друг от друга,

$$F_{\text{от}} = 0,005 \frac{\mu_0}{4\pi} k_{1/2} I_m^2, \quad (2.15)$$

Значение максимального притягивающего и притягивающего усилий, действующих на средний проводник в трехфазной системе при расположении проводников в одной плоскости на одинаковом расстоянии друг от друга

$$F = \pm \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\mu_0}{4\pi} k_{1/2} I_m^2. \quad (2.16)$$

Значение максимального притягивающего усилия, действующего на крайние проводники в трехфазной системе при расположении проводников в одной плоскости на одинаковом расстоянии друг от друга,

$$F_{\text{пр}} = 0,055 \frac{\mu_0}{4\pi} k_{1/2} I_m^2. \quad (2.17)$$

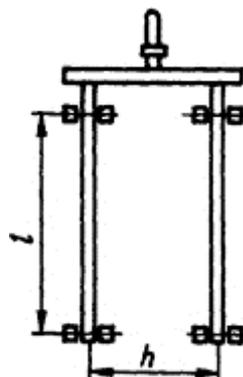


Рис. 2.13. Эскиз рубильника

2.3.1. Определить характер изменения во времени и значение электродинамического усилия, действующего на ножи рубильника (рис. 2.13), по которым протекает однофазный ток к.з. Установившееся значение тока $I_{уст} = 800$ А, частота $f=50$ Гц. Известно, что короткое замыкание произошло в удаленных от генератора точках сети. Размеры рубильника: $l=80$ мм, $h = 70$ мм.

Решение. Поскольку короткое замыкание произошло в удаленных от генератора точках сети, влиянием апериодической составляющей на электродинамическое усилие можно пренебречь [9], т.е. ток к.з. $i = \sqrt{2}I_{уст} \sin \omega t$.

79

Тогда усилие взаимодействия между ножами рубильника в соответствии с формулой (2.7)

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} i^2 k_{1/2} = \frac{\mu_0}{4\pi} 2I_{уст}^2 k_{1/2} \sin^2 \omega t,$$

где

$$k_{1/2} = \frac{2l}{h} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{h}{l}\right)^2} - \frac{h}{l} \right] = \frac{2 \cdot 8 \cdot 10^{-2}}{7 \cdot 10^{-2}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{7 \cdot 10^{-2}}{8 \cdot 10^{-2}}\right)^2} - \frac{7 \cdot 10^{-2}}{8 \cdot 10^{-2}} \right] = 1,04$$

- коэффициент контура электродинамических усилий, определяемый по табл. П. 18; $\omega = 2\pi 50 = 314$ с⁻¹ - круговая частота тока. Тогда $F = [4\pi 10^{-7}/(4\pi)] 2 \cdot 800^2 \cdot 1,04 \sin^2 \omega t = 0,134 \sin^2 \omega t$.

Разложив $\sin^2 \omega t = (1 - \cos^2(\omega t))/2$, получаем $F=0,067 - 0,067 \cos 628t$. Очевидно, что максимальное значение усилия $F_{\max} = 0,134$ Н; среднее значение за период $F_{\text{ср}} = 0,067$ Н; минимальное $F_{\min} = 0$.

О т в е т : $F_{\max}=0,134$ Н; $F_{\text{ср}}=0,067$ Н; $F_{\min}=0$.

2.3.2. Для задачи 2.3.1 проверить, удовлетворяют ли условиям прочности и жесткости ножи рубильника, которые изготовлены из меди, поперечное сечение их имеет прямоугольную форму с размерами $a \times b = 3 \times 15$ мм. Ножи расположены широкими сторонами друг к другу.

Решение. Нож рубильника можно рассчитать как балку на двух опорах, т.е. $\sigma_{\text{из}} = M/W_{\text{из}} \leq \sigma_{\text{доп}}$, где $M = F_{\max} l/8 = 0,134 \cdot 80 \cdot 10^{-3}/8 = 0,134 \cdot 10^{-2}$ Н·м - максимальное значение изгибающего момента; $W_{\text{из}} = ba^2/6 = 15 \cdot 10^{-3} \cdot 3^2 \cdot 10^{-6}/6 = 22,5 \cdot 10^{-9}$ м³ - момент сопротивления; $\sigma_{\text{доп}} = 137 \cdot 10^6$ Па - допустимое напряжение на изгиб для меди. Тогда

$$f_{\text{соб}} = \frac{k}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{\gamma S}} = \frac{48}{8^2} \sqrt{\frac{11,8 \cdot 10^6 \cdot 15 \cdot 10^{-4} \cdot 3^3}{12 \cdot 85,2 \cdot 3 \cdot 15 \cdot 10^{-3}}} = 24,2 \text{ Гц},$$

Следовательно, ножи рубильника удовлетворяют условиям прочности. Во избежание появления механического резонанса необходимо, чтобы частота собственных колебаний механической системы не была равна частоте возбуждающей силы, т.е. в нашем случае 100 Гц.

Для двух параллельных шин частота собственных колебаний

$$\sigma_{из} = 0,134 \cdot 10^{-2} / (22,5 \cdot 10^{-9}) = 0,6 \cdot 10^6 < 137 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

где k - коэффициент, учитывающий жесткости заделки ножа как балки на двух опорах. При жестко заделанном одном конце и свободном закреплении другого конца, это имеет место в случае рубильника, $k=48$ [1]; $E=11,8 \times 10^6$ Н/см² - модуль упругости материала (меди); $\gamma=85,2$ Н/см³ - удельный вес меди; $S=3 \cdot 15 \cdot 10^{-2}$ см² - площадь поперечного сечения; $J = ba^3/12 = 15 \cdot 10^{-4} \cdot 3^3/12$ см⁴ - момент инерции поперечного сечения. Следовательно поскольку собственная частота меньше вынужденной, механический резонанс не будет иметь места.

О т в е т : $\sigma_{из}=0,6 \cdot 10^6$ Па $< \sigma_{доп}$; $f_{соб}=39,3$ Гц < 100 Гц.

2.3.3. Определить значения максимальных, средних и минимальных электродинамических усилий, действующих на ножи двухполюсного рубильника, изображенного на рис. 2.13. Через рубильник протекает однофазный ток к.з., значение которого в установившемся режиме к.з. $I_{уст}=1000$ А, а частота $f=50$ Гц.

80

Длина ножей рубильника $l=60$ мм, расстояние между полюсами $h=55$ мм. Влиянием аperiodической составляющей тока к.з. пренебречь.

2.3.4. Написать зависимость усилия от времени электродинамического, возникающего между круглым проводником диаметром $d=10$ мм и ферромагнитной стенкой, вдоль которой проложен проводник с током, если по проводнику протекает ток к.з. $I=1500$ А частоты $f=50$ Гц. Проводник находится на расстоянии $h=20$ см от стенки, магнитную проницаемость стенки принять равной $\mu=\infty$. Рассчитать усилие на длину проводника $l=1$ м.

2.3.5. Удовлетворяют ли условиям прочности и жесткости ножи рубильника, описанного в задаче 2.3.3, если поперечное сечение ножей является прямоугольным с размерами $a \times b = 3 \times 20$ мм. Ножи расположены широкими сторонами друг к другу и изготовлены из меди.

2.3.6. Определить значение максимального напряжения и частоту собственных колебаний отрезка проводника, имеющего длину 0,5 м и находящегося в прямоугольном пазу ферромагнитной стенки с бесконечной магнитной проницаемостью. По проводнику протекает переменный ток $I=3$ кА частоты $f=50$ Гц. Длина паза $l=70$ мм, ширина $\delta=20$ мм, диаметр проводника $d=10$ мм. Проводник изготовлен из меди, на концах имеет жесткое закрепление.

2.3.7. Для условий задачи 2.3.4 сделать проверку проводника на прочность и жесткость, если известно, что проводник изготовлен из алюминия и через каждые 0,5 м имеет опорные изоляторы, в которых он закреплен.

2.3.8. Определить усилия, действующие на каждый из ножей трехполюсного разъединителя, по которому протекает предельный сквозной ток трехфазного к.з. Амплитудное значение тока $I_{макс} = 320$ кА, длина ножей $l=610$ мм, расстояние между ними $h=700$ мм. Вычислить также требуемый момент сопротивления ножей.

Решение. В соответствии с выводами, приведенными в [1], на каждый из ножей в случае установившегося тока к.з. будут действовать знакопеременные во времени усилия. Определим максимальные притягивающие и максимальные отталкивающие усилия на каждый из трех ножей разъединителя (рис. 2.14):

В соответствии с формулой (2.15)

$$F_{1от} = 0,805CI_{\max}^2 = 0,805 \cdot 0,665 \cdot 10^{-7} \cdot 3202^2 \cdot 10^6 = 5450 \text{ Н},$$

где $C = \mu_0 k_{1/2} / (4\pi) = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,665 / (4\pi) = 0,665 \cdot 10^{-7}$. Из табл. п.18 $k_{1/2} = 0,665$; по формуле (2.17) $F_{1пр} = 0,055CI_{\max}^2 = 374 \text{ Н}$, где $C = \mu_0 k_{1/2} / (4\pi)$. Аналогично, $F_{2от} = F_{2пр} = 0,87CI_{\max}^2 = 5900 \text{ Н}$; $F_{3от} = F_{1от} = 5450 \text{ Н}$; $F_{3пр} = F_{1пр} = 374 \text{ Н}$.

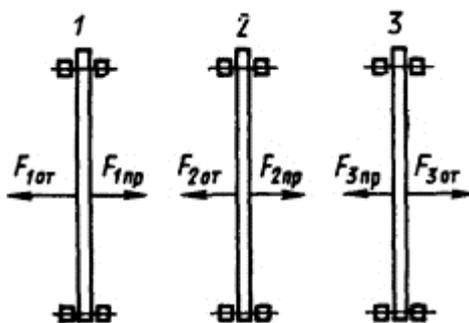


Рис. 2.14. Эскиз разъединителя поперечного сечения

81

Наиболее напряженным будет средний полюс, поэтому его необходимо рассчитывать на прочность изгиба как балку на двух опорах. Требуемое значение момента сопротивления поперечного сечения

$$W_{из} = M / \sigma_{доп} = 450 / (137 \cdot 10^6) = 3,28 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3,$$

где $M = F_{\max} l / 8 = 5900 \cdot 0,61 / 8 = 450 \text{ Н} \cdot \text{м}$ - изгибающий момент; $\sigma_{доп} = 137 \times 10^6 \text{ Па}$ - допустимое напряжение на изгиб для ножей, выполненных из меди.

О т в е т : $F_{1от} = F_{3от} = 5450 \text{ Н}$; $F_{1пр} = F_{3пр} = 374 \text{ Н}$; $F_{2от} = F_{2пр} = 5900 \text{ Н}$; $W_{из} = 3,28 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$.

2.3.9. Вычислить электродинамические усилия, воздействию которых подвергаются три ножа трехполюсного разъединителя. Через ножи протекает ток трехфазного к.з. промышленной частоты $f = 50 \text{ Гц}$, максимальное значение которого $I_{\max} = 80 \text{ кА}$. Расстояние между полюсами разъединителя данного типа $h = 450 \text{ мм}$, длина ножей $l = 635 \text{ мм}$. При расчете пренебречь влиянием аperiodической составляющей тока к.з.

2.3.10. Для условий задачи 2.3.9 подобрать требуемое по прочности и жесткости сечение ножей, приняв, что каждый нож состоит из двух медных пластин, жестко закрепленных в нижней части разъединителя и свободно опирающихся в верхней части, где имеются подвижные размыкающие контакты. При расчете на жесткость исходить из условия, что частота собственных колебаний ножей должна быть меньше двойной частоты сети.

2.3.11. На каком минимальном расстоянии можно поставить опорные изоляторы в распределительном устройстве, если в нем применены прямоугольные медные шины сечением 100×10 мм по одной шине на фазу. Шины закреплены жестко на опорах, поставлены на ребро и по ним протекает ток трехфазного к.з., установившееся значение которого $I_{уст} = 50$ кА. Расстояние между фазами равно 0,3 м.

Решение. Определим значение электродинамического усилия, действующего на 1 м длины шин, при этом расчетное значение тока определим по формуле (2.14)

$$i_{yx} = k_{yx} I_{мз} = 1,8 \cdot 50 \cdot \sqrt{3} = 128 \text{ кА.}$$

Здесь $k_{yx} = 1,8$.

Сила, действующая на 1 м длины,

$$F = 10^{-7} i_{yx}^2 l / a = 10^{-7} \cdot 128^2 \cdot 10^6 / 0,3 = 5470 \text{ Н/м.}$$

Для многопролетной балки [1]

$$\sigma_{доп} = Fl^2 / (10W_{из}),$$

где $W_{из} = bh^2/6$ - момент сопротивления поперечного сечения шины; $\sigma_{доп} = 13,7 \cdot 10^7$ Н/м² - допустимое напряжение на изгиб для меди.

Подставив числовые значения, получим

$$13,7 \cdot 10^7 = \frac{5470 \cdot 6 l_{мин}}{10 \cdot 100 \cdot 10^{-3} \cdot 10^2 \cdot 10^{-6}} \cdot$$

откуда $l_{мин} = 0,65$ м.

82

Поскольку по шинам протекает переменный ток, необходимо найти минимальное расстояние между изоляторами в случае отсутствия механического резонанса. При этом собственная частота шин должна быть меньше частоты механических колебаний, т.е. двойной частоты тока.

Из формулы [1]

$$f = \frac{k}{l_{2мин}^2} \sqrt{\frac{EJ}{\gamma S}}, \quad (a)$$

где $k=112$ для жесткого закрепления шин; $E=11,8 \cdot 10^6$ Н/см² - модуль упругости для меди; $J = bh^3/12 = 10 \cdot 1^3/12 = 0,838$ см⁴ момент инерции сечения шины; $\gamma = 85,2$ Н/см³ - удельный вес меди; $S = 10$ см² - поперечное сечение шины.

После решения равенства (a) относительно $l_{2мин}$ получаем требуемое расстояние между изоляторами $l_{2мин} = 0,596$ м. Выбираем наименьшее из двух полученных значений, т.е. 0,6 м.

О т в е т : $l_{\min}=0,6$ м.

2.3.12. Решить задачу 2.3.11 при условии, что шины расположены плашмя. Остальные данные без изменения.

2.3.13. Решить задачу 2.3.11 при условии, что шины круглые, диаметр которых $d=35$ мм, а все остальные данные остались без изменения.

2.3.14. Определить максимальные напряжения, возникающие в наиболее нагруженном пакете шин распределительного устройства трехфазного генератора, если короткое замыкание произошло на выходе из распределительного устройства и действующее значение установившегося тока трехфазного к.з. $I_{уст} = 140$ кА. Пакеты шин расположены в одной плоскости, расстояние между ними $h=700$ мм, расстояние между опорными изоляторами $l=600$ мм, пакеты шин состоят из 2-х жестко связанных медных шин с размерами поперечного сечения 120×10 мм, расстояние между шинами пакета $d=10$ мм и через каждые 10 см между шинами имеются прокладки.

Р е ш е н и е . При вычислении напряжения на изгиб необходимо учесть взаимодействие между шинами пакета, т.е. $\sigma_{расч} = \sigma_{фаз} + \sigma_{пак}$, где $\sigma_{фаз}$ - напряжение от усилий, возникающих от взаимодействия соседних фаз; $\sigma_{пак}$ - напряжение от взаимодействия шин в одном пакете.

Поскольку наиболее напряженным при данном расположении шин будет средний пакет шин, для него и проведем расчет. Максимальное усилие, действующее на средний пакет,

$$F_{фаз} = 0,87C_1 (k_{уд} \sqrt{2} I_{уст})^2 = 0,87 \cdot 0,66 \cdot 10^{-7} (1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 140 \cdot 10^3)^2 = 7280 \text{ Н},$$

где $C_1 = \mu_0 k_1 / (4\pi) = 0,66 \cdot 10^{-7}$; $k_{уд} = 1,8$ - ударный коэффициент, учитывающий влияние на электродинамические усилия аperiodической составляющей тока к.з. Так как короткое замыкание произошло вблизи генератора, то это влияние довольно значительно. Так как шину можно рассчитать как многопролетную балку [1], то $\sigma_{фаз} = F_{фаз} / (10 W_{из}) = 7280 \cdot 0,6 / (10 \cdot 1,44 \cdot 120 \cdot 10^{-3} \cdot 10^2 \cdot 10^{-6}) = 25,3 \cdot 10^6$ Па, где $W_{из} = 1,44 ab^2$ - момент инерции поперечного сечения пакета шин [13]; $a=120$ мм; $b=10$ мм.

Максимальное усилие, возникающее между шинами пакета, можно вычислить как максимальное усилие в однофазной системе, и так как шины в пакете находятся близко друг к другу, то необходимо учесть влияние конечных

83

размеров шин. Предположим, что ток между шинами пакета распределен равномерно. Тогда

$$F_{пак} = k_{\phi} C_2 (k_{уд} \sqrt{2} I / 2)^2,$$

где

$$C_2 = \mu_0 k_{1/2} / (4\pi); \quad k_{1/2} = \frac{2l_{пр}}{\delta} \left[\sqrt{1 + (\delta/l_{пр})^2} - \frac{\delta}{l_{пр}} \right]$$

(см. табл. П. 18); $l_{пр}=100$ мм - расстояние между прокладками; $\delta = 20$ мм - расстояние между осями шин; $k_{\phi} = 0,4$ - коэффициент формы (см. рис. П. 12). После вычислений получим $C_2 = 8 \cdot 10^{-7}$.

$$F_{\text{пак}} = 0,4 \cdot 8 \cdot 10^{-7} (1,8 \sqrt{2} \cdot 140 \cdot 10^3 / 2)^2 = 10\,400 \text{ Н.}$$

Напряжение изгиба в пакете шин [1]

$$\sigma_{\text{пак}} = \frac{F_{\text{пак}} l_{\text{пак}}}{12 W_{\text{ш}}} = 10\,400 \cdot 100 \cdot 10^{-3} / (12 \cdot 20 \cdot 10^{-7}) = 43,5 \cdot 10^6 \text{ Па,}$$

где $W_{\text{ш}} = ab^2/6 = 120 \cdot 10^3 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-6} / 6 = 20 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3$. Суммарное максимальное напряжение изгиба в наиболее нагруженной шине $\sigma = \sigma_{\text{фаз}} + \sigma_{\text{пак}} = 25,3 \cdot 10^6 + 43,5 \cdot 10^6 = 68,8 \cdot 10^6 \text{ Па}$.

О т в е т : $\sigma = 68,8 \cdot 10^6 \text{ Па}$.

2.3.15. Вычислить максимальные напряжения в наиболее нагруженном пакете шин распределительного устройства трехфазного синхронного генератора для случая трехфазного к.з., действующее значение тока которого в установившемся режиме $I_{\text{уст}} = 50$ кА. Пакеты шин расположены в одной плоскости, расстояние между ними $h=450$ мм, расстояние между опорными изоляторами $l=500$ мм; пакеты шин состоят из двух жестко связанных алюминиевых шин размером 50×5 мм, расстояние между шинами в пакете 5 мм и через каждые 20 см между шинами пакета имеются прокладки. При расчете учесть влияние аperiodической составляющей тока к.з.

84

ГЛАВА 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА И ЕЕ ГАШЕНИЕ

3.1. Физические параметры дуговой плазмы

В этом параграфе приведены задачи по некоторым исходным физическим параметрам и связи между ними (например, определение длины свободного пробега электрона в дуговой плазме и ее зависимости от температуры и давления газа, энергии электрона, степени ионизации газа с помощью уравнения Саха, решение вопроса рекомбинации ионизированных частиц и передачи энергии от дугового столба к окружающей газовой среде). Решение таких задач дает возможность ознакомиться с некоторыми физическими закономерностями и числовыми значениями наиболее употребительных величин в теории газового разряда высокого давления. При этом используются следующие формулы и соотношения.

Длина (см) свободного пробега электрона.

$$\lambda_e = 4 / (n N_A \sigma) \quad (3.1)$$

где N_T - число молекул в 1 см^3 газа при температуре T ; d - диаметр молекулы газа, см.

84

Средняя энергия электронов (эВ), ускоряемых в электрическом поле напряженностью E (В/см),

Мощность, отводимая в воздухе с 1 см длины дуги путем теплопроводности,

$$P_{\tau} = 2,4 (T/1000)^2, \quad (3.3)$$

где T - температура дуги, К.

Мощность, отводимая от 1 см длины дуги путем поперечной конвекции,

$$P_{\kappa} = 4 \cdot 10^{-2} d v (\sqrt{T} - \sqrt{T_0}), \quad (3.4)$$

где T - температура дуги, К; T_0 - температура окружающей среды, К; v - скорость поперечного потока воздуха, м/с; d - диаметр столба дуги, см, определяемый по формуле

$$d = 1,12 \sqrt{I/(20 + v)}, \quad (3.5)$$

где I - ток в дуге, А.

Формула Саха

$$p x^2 / (1 - x^2) = 3,16 \cdot 10^{-2} T^{2,5} \exp(-11 620 V_{и} / T), \quad (3.6)$$

где p - давление газа, Па; x - относительная ионизация в долях единицы, $V_{и}$ - энергия ионизации, эВ; T - температура, К.

Начальная скорость спада плотности ионов в ионизированном газе за счет рекомбинации

$$dn/dt = -\alpha n^2, \quad (3.7)$$

где α - коэффициент рекомбинации.

3.1.1. Определить среднюю длину пробега электрона в азоте при атмосферном давлении и температуре газа $T=5000$ К.

Решение. Длина свободного пробега электрона определится из (3.1), где $d=3,146 \cdot 10^{-8}$ см - диаметр молекулы азота (см. табл. П.22). Для нахождения λ_e необходимо знать N_{τ} . Известно, что число молекул любого газа в 1 см³ при атмосферном давлении и 0°С $N_0=2,7 \cdot 10^{19}$ см⁻³.

Определим N_{τ} , считая, что число частичек газа в 1 см³ (плотность газа) при температуре T находится в обратном отношении абсолютных температур, т.е. $N_{\tau}=N_0 T_0/T = 2,7 \cdot 10^{19} \cdot 273/5000 = 14,74 \cdot 10^{17}$ см⁻³, тогда средняя длина свободного пробега электрона из (3.1)

$$\lambda_e = \frac{4}{\pi N_{\tau} d^2} = 4 / (3,14 \cdot 14,74 \cdot 10^{17} \cdot 3,146^2 \cdot 10^{-16}) = 0,88 \cdot 10^{-3} \text{ см.}$$

О т в е т: $\lambda_e=0,88 \cdot 10^{-3}$ см.

3.1.2. Определить среднюю длину свободного пробега электрона в атмосфере кислорода при давлении $p=2 \cdot 10^5$ Па и температуре $T=7000$ К.

3.1.3. Определить среднюю длину свободного пробега электрона в атмосфере водорода при давлении $p = 3 \cdot 10^5$ Па, температуре $T = 8000$ К.

3.1.4. Определить среднюю энергию электрона в азоте, приобретаемую им в электрическом поле напряженностью $E = 50$ В/см при температуре газа $T = 10000$ К и давлении газа $p=9,8 \cdot 10^4$ Па.

85

Решение. Если заряд электрона принять за единицу, то средняя энергия электронов, ускоряемых в электрическом поле напряженностью E , определится из (3.2)

$$A = \lambda_3 E = 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot 50 = 80 \cdot 10^{-3} \text{ эВ.}$$

Здесь $\lambda_3 = 4/(\pi N_T d^2) = 4/[3,14 \cdot 7,37 \cdot 10^{17} (3,146)^2 \cdot 10^{-16}] = 1,6 \cdot 10^{-3}$ см - средняя длина свободного пробега электрона в азоте, $N_T = N_0 T_0 / T = 2,7 \cdot 10^{19} \cdot 273 / 10000 = 7,37 \cdot 10^{17}$; $d = 3,146 \cdot 10^{-8}$ (см. табл. П.22).

О т в е т: $A_3 = 80 \cdot 10^{-3}$ эВ.

3.1.5. Определить среднюю энергию электрона в атмосфере азота, приобретенную им в электрическом поле напряженностью $E=100$ В/см при температуре газа $T=10000$ К и давлении $p = 3 \cdot 10^5$ Па.

3.1.6. Определить среднюю энергию электрона в атмосфере водорода, приобретенную им в электрическом поле напряженностью $E=100$ В/см при температуре газа $T=18000$ К и давлении $p = 5 \cdot 10^5$ Па.

3.1.7. Определить мощность, отводимую поперечным потоком воздуха, скорость которого $v = 3$ м/с. Температура газа в дуговом столбе $T=5000$ К, температура окружающей среды $T_0=300$ К. Ток в дуге $I=50$ А. Полученный результат сопоставить с мощностью, отводимой за счет теплопроводности в воздухе.

Решение. Мощность, отводимая в воздухе с 1 см длины дуги путем теплопроводности, в соответствии с (3.3)

$$P_T = 2,4 (T/1000)^2 = 2,4 (5000/1000)^2 = 60 \text{ Вт/см.}$$

Диаметр дугового столба при относительной скорости движения его в среде определим по формуле Брона

$$d = 0,8 \sqrt{I/v} = 0,8 \sqrt{50/3} = 3,26 \text{ см.}$$

Мощность, отводимая за счет конвекции [см. (3.4)],

$$P_K = 4 \cdot 10^{-2} d v (\sqrt{T} - \sqrt{T_0}) = 4 \cdot 10^{-2} \cdot 3,26 \cdot 300 (\sqrt{5000} - \sqrt{300}) = 2090 \text{ Вт/см.}$$

О т в е т: $P_K = 2090$ Вт/см.

3.1.8. Оценить мощность, отводимую от дугового столба длиной в 1 см путем излучения, если ток в дуге $I=5000$ А, напряженность поля $E=80$ В/см. Электроды выполнены из меди.

3.1.9. Определить мощность, отводимую от дугового столба длиной в 1 см за счет теплопроводности. Температура $T=7000$ К.

3.1.10. Определить мощность, отводимую от дугового столба длиной в 1 см путем конвекции газа (азота). Скорость движения дуги $v=25$ м/с, температура газа в дуговом столбе $T=8000$ К, температура окружающей среды $T = 500$ К.

3.1.11. Оценить мощность, отводимую с 1 см длины дуги путем конвекции, при условии, что температура столба дуги $T= 3000$ К, температура окружающей среды $T=320$ К, диаметр - дуги $d=1,5$ см, скорость проникновения (средняя) холодного потока газа в дуговой столб $v = 50$ м/с.

86

3.1.12. Оценить и сравнить долю общей рассеиваемой дуговым столбом мощности по существующим эмпирическим формулам. Ток дуги $I=5000$ А, падение напряжения в столбе $U = 200$ В/см.

3.1.13. Вычислить и построить кривую мощности дуги длиной $l=5$ см за полупериод переменного тока при условии, что ток в дуге изменяется по закону $i =450 \sin \omega t$, а напряжение на дуге

3.1.14. Какая часть от общего числа частичек газа находится в ионизированном состоянии при условии, что энергия ионизации атома газа $V_{и}=15$ эВ, температура газа $T=12000$ К, давление $p=4 \cdot 10^5$ Па?

Решение. Связь между относительной ионизацией газа, его температурой T , энергией ионизации $V_{и}$ и давлением p можно выразить с помощью уравнения Саха (3.6). Обычно полагают, что $x \ll 1$, и поэтому

$$\begin{aligned}
 & \text{Тогда} \quad px^2/(1-x^2) \approx px^2. \\
 x = & \frac{\sqrt{3,16 \cdot 10^{-1}} T^{1,25}}{\sqrt{p}} e^{-5810 V_{и}/T} = \frac{\sqrt{3,16 \cdot 10^{-1} \cdot 12000^{1,25}}}{4 \cdot 10^5} e^{-5810 \cdot 15/12000} = \\
 & = 0,024.
 \end{aligned}$$

О т в е т: $x=0,024$.

3.1.15. Определить начальную скорость спада плотности ионов в ионизированном газе за счет рекомбинации, а также плотность ионов спустя 10 мкс с начала процесса, если коэффициент рекомбинации $\alpha = 10^{-9}$ и начальная плотность ионов в остаточном столбе $n_0=10^{15}$.

Решение. Начальную скорость спада плотности ионов определим по формуле (3.7)

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\alpha n^2 = -10^{-9} (10^{15})^2 = -10^{21} \text{ с}^{-1}.$$

Решение уравнения (3.7) дает зависимость $n=n(t)$, т.е. плотность ионов спустя время t . Для $t=10^{-5}$ с будем иметь $n=n_0/(1+n_0\alpha t) = 10^{15}/(1 + 10^{15} \cdot 10^{-9} \cdot 10^{-5}) = 0,91 \cdot 10^{14}$ пар ионов.

О т в е т : $dn/dt = -10^{21} \text{ с}^{-1}$; $n = 0,91 \cdot 10^{14}$ пар ионов.

3.1.16. Определить начальную скорость спада плотности ионов в ионизированном газе дугового столба, если коэффициент рекомбинации газа $\alpha=10^{-9}$, начальная плотность ионов $n_0=10^{15}$.

3.1.17. Построить для частного случая зависимость спада во времени плотности ионов в дуговом столбе за счет рекомбинации ионов. Коэффициент рекомбинации газа $\alpha=2 \cdot 10^{-9}$, начальная плотность ионов $n_0 = 10^{15}$.

87

3.2. Электрическая дуга в магнитном поле

В этом параграфе приведены задачи оценки некоторых характеристик дуги в магнитном поле. Рассматриваются также задачи на движение дуги в узких щелях дугогасительных камер. Между дуговым столбом и магнитным

87

полем возникают силы взаимодействия, под влиянием которых дуговой столб приходит в движение. Явления сообщения дуговому столбу значительных скоростей широко используют в отключающих аппаратах с целью повышения интенсивности гашения дуги, а также для повышения срока службы аппаратов. При решении задач используются следующие расчетные формулы и соотношения.

Скорость перемещения дуги в результате действия тока в шинах при $B \leq 0,1$ Тл определяется по формуле Г.А. Кукекова

$$v_x = 73 I^2 B_{cp}^{0,5} \quad (3.8)$$

где I - ток в дуге, А; B_{cp} - магнитная индукция между шинами, Тл.

Скорость движения дуги в результате действия тока в шинах, по данным О.Б. Брона, определяется по формуле

$$v_x = 41,2 \sqrt{\frac{I^2 H}{(1 + 0,4H^{0,5})^2}} \quad (3.9)$$

где H - напряженность магнитного поля, А/см.

Скорость дуги, находящейся в узкой щели, по данным Г.А. Кукекова, определяется по формуле

$$v_x = 370 \sqrt{\delta I_x B}, \quad (3.10)$$

где δ - ширина щели, м; I - ток в дуге, А; B - величина индукции, Тл.

3.2.1. Определить скорость дуги между круглыми медными шинами диаметром $d=20$ мм, по которым протекает ток $I_d=1500$ А. Расстояние между шинами $\delta=10$ мм. Шины находятся в воздухе, магнитная проницаемость которого $\mu_0=4\pi\cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Решение. Для определения скорости смещения дуги между шинами необходимо знать значения магнитной индукции между шинами. Примем за расчетное значение индукции ее величину в средней точке между шинами, т.е.

$$B_{\text{ср}} = \mu_0 I_d / [2\pi (d/2 + \delta/2)] = \\ = 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 1500 / [2 \cdot 3,14 (0,02/2 + 0,01/2)] = 0,02 \text{ Тл.}$$

По формуле Кукекова (3.8), скорость перемещения дуги от тока в шинах

$$v_d = 73 (1500)^{1/3} (0,02)^{2/3} = 61 \text{ м/с.}$$

Ответ: $v_d=61$ м/с.

3.2.2. Определить скорость движения дуги в средней (между электродами) ее зоне между круглыми шинами, имеющими диаметр $d=10$ мм, при токе в шинах $I=2000$ А и расстоянии между ними 10 мм.

3.2.3. Определить скорость движения открытой (свободной) дуги с током $I_d = 400$ А, находящейся в поперечном магнитном поле с индукцией $B = 0,05$ Тл.

Решение. Для индукций в пределах $0 < B < 0,1$ Тл по формуле Кукекова (3.8)

$$v_d = 73 (400)^{1/3} (0,05)^{2/3} = 73 \text{ м/с.}$$

88

По формуле Брона (3.9) скорость движения дуги

$$v_d = 41,2 \sqrt{\frac{I_d H^2}{(1 + 0,4 H^{0,3})^2}} = 41,2 \sqrt{\frac{400 \cdot 394^2}{(1 + 0,4 \cdot 398^{0,3})^2}} = \\ = 7255 \text{ см/с} = 72,6 \text{ м/с,}$$

где $H=B/\mu_0=0,05/(4\pi \cdot 10^{-7})=39800$ А/м = 398 А/см.

Сопоставив полученные результаты, получим среднее значение $V_{\text{ср}}=0,5 (73 + 72,6) = 72,8$ м/с.

Ответ: $v_{\text{ср}}=72,8$ м/с.

3.2.4. Магнитная индукция равномерного магнитного поля $B = 0,07$ Тл. Определить скорость перемещения дуги с током $I = 500$ А, находящейся в этом магнитном поле.

3.2.5. Определить скорость перемещения свободной дуги с током 600 А, находящейся в магнитном поле, создаваемом тем же током дуги, если число витков катушки магнитного дутья $N = 4$ и расстояние между полюсами (воздушный зазор) $\delta = 20$ мм.

3.2.6. Определить скорость перемещения дуги в узкой щели дугогасительной камеры при условии, что поперечное магнитное поле в камере создается катушкой, имеющей $N=10$ витков и обтекаемой током дуги $I_d=400$ А. Ширина щели (рис. 3.1), в которую затягивается дуга, $\delta = 2$ мм. Расстояние между полюсами катушки (воздушный зазор) $\Delta = 2$ см.

Решение. По формуле Кукекова (3.10) скорость дуги, находящейся в узкой щели,

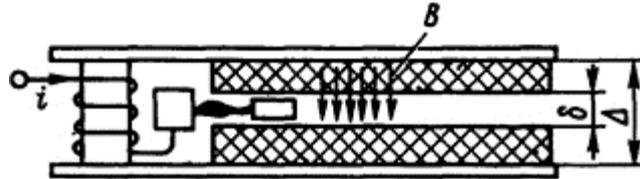


Рис. 3.1. Эскиз катушки магнитного дутья

$$v_d = 370 \sqrt{\delta I_d B} = 370 \sqrt{0,002 \cdot 400 \cdot 0,25} = 165 \text{ м/с,}$$

где B - индукция в камере;

$$B = \mu_0 I_d N / \Delta = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 400 \cdot 10 / 0,02 = 0,25 \text{ Тл;}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м.}$$

Ответ: $v_d=165$ м/с.

3.2.7. Определить скорость перемещения дуги в узких щелях между изоляционными пластинами, если расстояние между ними $\delta = 3$ мм, индукция в щелях $B = 0,15$ Тл и ток в дуге $I_d=500$ А.

3.2.8. Определить скорость перемещения электрической дуги постоянного тока на концентрических кольцах, имеющих между собой зазор 1 см, при условии, что дуга вместе с кольцами находится в длинной однослойной катушке ($N=1000$ витков), а ток, протекающий по виткам, $I = 50$ А.

Решение. Найдем индукцию в средней зоне катушки:

$$B = \mu_0 I N = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 50 \cdot 1000 \approx 0,063 \text{ Тл.}$$

89

Для такой индукции можно использовать формулу Кукекова (3.8), она справедлива для $B < 0,1$ Тл:

$$v_d = 73 I^{1/3} B^{2/3} = 73 \cdot 50^{1/3} \cdot 0,063^{2/3} = 42,7 \text{ м/с.}$$

Ответ: $v_d = 42,7$ м/с.

3.2.9. Определить скорость перемещения дуги между концентрическими кольцами, помещенными в полость катушки постоянного тока. Катушка большой длины имеет 1000 витков на 1 м и ток в ее обмотке $I=100$ А. Зазор между кольцами 10 мм, ток в дуге $I_d= 100$ А.

3.2.10. Определить направление и значение скорости перемещения электрической дуги, образующей круговое кольцо, под влиянием собственного поля при радиусе дугового кольца $R = 30$ см, токе в дуге $I_d = 500$ А и радиусе дугового столба $r = 0,03 \sqrt{I_d}$.

3.2.11. Определить время, за которое дуга, имеющая вид кольца, переместится (растянется) из положения радиуса $R_1 = 30$ см до положения $R_2 = 70$ см при токе в дуге $I_d = 1500$ А (радиус дугового столба выбирают из условия, приведенного в задаче 3.2.10).

3.2.12. Определить скорость, с которой дуговой столб будет удаляться от параллельного ему проводника, обтекаемого тем же током $I = 2500$ А. Расстояние между дуговым столбом и проводом (между их осями) составляет 15 см.

90

3.3. Дуга постоянного тока

В этом параграфе рассмотрены задачи на определение времени угасания дуги постоянного тока, критических длин и токов дуги, а также энергии, поглощаемой дугой во время ее гашения. Дана оценка ожидаемых перенапряжений при срезках токов, роли шунтирующих сопротивлений, подсоединяемых к дуге постоянного тока, и индуктивности, находящейся в рассматриваемом контуре последовательно с отключающим промежуток. При этом используются следующие расчетные формулы и соотношения.

Энергия горения дуги

$$A_d = \int_0^{t_d} U_d i dt, \quad (3.11)$$

где U_d , i - соответственно падение напряжения на дуге, В, и ток в дуге, А; t_d - время горения дуги, с. Время горения дуги

$$t_d = -\frac{L}{\Delta U} \int_I^0 di, \quad (3.12)$$

где L - индуктивность цепи, Гн; ΔU - перенапряжение, В; I - установившийся ток цепи, А.

Вольт-амперная характеристика дуги

$$U_d = ci^{-a}l, \quad (3.13)$$

где i - ток дуги, А; l - длина дуги, м, c и a - числовые коэффициенты, определяемые экспериментально.

90

3.3.1. Определить энергию, поглощенную дугой постоянного тока при ее гашении, если сопротивление отключаемой цепи $R = 1$ Ом, индуктивность цепи $L = 100$ мГн, спад тока имеет прямолинейный характер, время угасания дуги $t_d = 0,1$ с, напряжение цепи $U_H = 200$ В.

Решение. Исходя из уравнения напряжений $U_u = iR + U_d + Ldi/dt$, получаем выражение энергии дуги в соответствии с (3.11)

$$A_{\text{д}} = \int_0^{t_{\text{д}}} U_{\text{д}} i dt = \int_0^{t_{\text{д}}} (U_{\text{н}} i - iR) dt + \frac{LI^2}{2},$$

где $I = U/R = 200/1 = 200$ А -ток в цепи.

Интеграл в правой части уравнения представляет собой энергию, поглощенную в дуге и подведенную от источника за время горения дуги $t_{\text{д}} = 0,1$ с. Интеграл может быть вычислен, если задана зависимость изменения тока во времени. По условию задачи, ток в зависимости от времени падает по прямой линии, т.е. $i = I(1 - t/t_{\text{д}})$. Тогда

$$A_{\text{д}} = U_{\text{н}} I t_{\text{д}} / 6 + LI^2 / 2 = 200 \cdot 200 \cdot 0,1 / 6 + 100 \cdot 10^{-3} \cdot 200^2 / 2 = \\ = 670 + 2000 = 2670 \text{ Дж.}$$

Ответ: $A_{\text{д}} = 2670$ Дж.

Примечание. Из примера видно, что основная доля энергии, поглощенная дугой, определяется энергией, запасенной в индуктивности. Такие соотношения обычно возникают при больших индуктивностях цепи и малом времени горения дуги.

3.3.2. Определить энергию, поглощенную дугой постоянного тока при ее гашении, если напряжение $U = 200$ В, сопротивление $R = 1,5$ Ом, индуктивность $L = 80$ мГн, время угасания дуги $t_{\text{д}} = 0,09$ с, спад тока имеет прямолинейный характер.

3.3.3. Общее количество энергии, поглощенной дугой за один цикл отключения, $A = 3000$ Дж. Оценить, какое количество энергии потребуется из сети непосредственно за время одного отключения; если отключаемый ток (начальный) $I = 200$ А, индуктивность цепи $L = 80$ мГн.

3.3.4. Определить время угасания дуги постоянного тока для двух случаев индуктивности цепи $L = 10 \cdot 10^{-3}$ Гн и $L = 0,1 \cdot 10^{-3}$ Гн при условии, что $\Delta U = 30$ В остается величиной постоянной (рис. 3.2). Напряжение источника $U_{\text{н}} = 400$ В, сопротивление цепи $R = 2$ Ом.

Решение. Установившийся ток цепи $I = U_{\text{н}} / R = 400 / 2 = 200$ А. Из выражения $\Delta U = -L$

$$\frac{dt}{di}$$

при $L = 0,1 \cdot 10^{-3}$ Гн время угасания дуги по (3.12)

$$t_{\text{д}} = -\frac{L}{\Delta U} \int_I^0 di = \frac{LI}{\Delta U} = \frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{30} 200 = 0,67 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Для $L = 10 \cdot 10^{-3}$ Гн время угасания дуги в 100 раз больше, т.е. $t_{\text{д}} = 67$ мс.

Ответ: для $L=0,1 \cdot 10^{-3}$ Гн $t_d=0,67$ мс; для $L=10 \cdot 10^{-3}$ Гн $t_d=67$ мс.

91

3.3.5. Определить графоаналитическим методом время угасания дуги, если в цепи сопротивление $R=3$ Ом, индуктивность $L=120$ мГн, напряжение источника $U_n=400$ В, а вольт-амперная характеристика описывается уравнением $U_d=ci^{-a}l$, где $l=1,2l_{кр}$; $c=80$; $a=0,5$, $l_{кр}$ - критическая длина дуги.

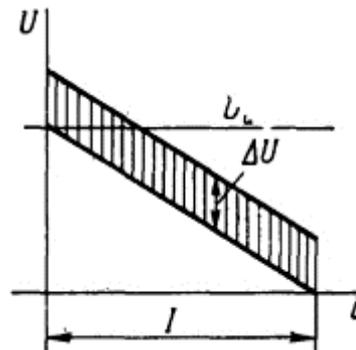


Рис. 3.2. Зависимость напряжения от тока

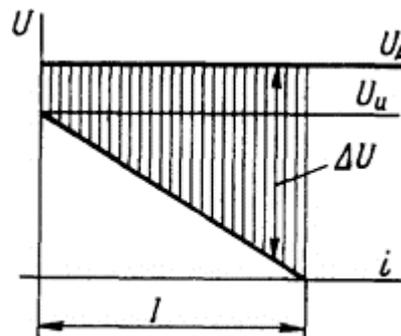


Рис. 3.3. Зависимость напряжения от тока

3.3.6. Определить полное время угасания дуги, если напряжение на дуге $U_d=250$ В в зависимости от тока остается постоянным (рис. 3.3). Напряжение сети $U_n=200$ В, сопротивление $R=1$ Ом, индуктивность $L=15$ мГн.

Решение. Полное время горения дуги определим по формуле (3.12).

Значение $\Delta U=U_d-U_n+iR$. Подставив ΔU в выражение для t_d и проинтегрировав его, получим

$$t_x = \frac{L}{R} \ln \frac{U_d}{U_d - U_n} = \frac{15 \cdot 10^{-3}}{1} \ln \frac{250}{250 - 200} = 24 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

О т в е т : $t_d = 24 \cdot 10^{-3}$ с.

3.3.7. Определить время угасания дуги постоянного тока при условии, что напряжение $\Delta U=35$ В остается величиной постоянной в течение всего времени гашения. Напряжение источника $U_n=400$ В, сопротивление $R=4$ Ом, индуктивность $L=15 \cdot 10^{-3}$ Гн.

3.3.8. Определить критическую длину дуги $l_{кр}$ постоянного тока и критический ток дуги $i_{кр}$ для цепи с общим сопротивлением $R=1,2$ Ом при напряжении источника $U_n=400$ В. Выражение вольт-амперной характеристики, имеет вид (3.13), где $c=80$, $a=0,5$.

Р е ш е н и е . Для такой вольт-амперной характеристики

$$l_{кр} = \frac{I_{к.з}^a U_H}{c} \cdot \frac{a^a}{(1+a)^{1+a}} = \frac{333^{0,5} \cdot 400}{80} \cdot \frac{0,5^{0,5}}{(1+0,5)^{1+0,5}} = 35,4 \text{ см};$$

$$i_{кр} = \frac{U_H}{R} \frac{a}{a+1} = I_{к.з} \frac{a}{a+1} = 333 \frac{0,5}{1+0,5} = 111 \text{ А}.$$

Здесь $I_{к.з} = U_H/R = 400/1,2 = 333 \text{ А}$.

О т в е т : $l_{кр} = 35,4 \text{ см}$; $i_{кр} = 111 \text{ А}$.

92

3.3.9. Определить критическую длину дуги и ее критический ток, если сопротивление цепи $R = 1,5 \text{ Ом}$, напряжение $U_H = 600 \text{ В}$. Вольт-амперная характеристика описывается уравнением (3.13), где $c = 90$, $a = +0,4$.

3.3.10. Установить необходимое число промежутков в решетке, если дуга постоянного тока должна гаситься путем деления ее на ряд коротких дуг. Напряжение цепи $U_H = 400 \text{ В}$, а напряжение на дуге $U_d = 500 \text{ В}$ остается постоянным.

3.3.11. До какой длины должна растянуться дуга постоянного тока, чтобы достигнуть неустойчивого состояния? Вольт-амперная характеристика дуги описывается уравнением (3.13), где $c = 100$, $a = +0,5$. Напряжение сети $U_H = 400 \text{ В}$, ток в цепи $I = 100 \text{ А}$.

3.3.12. Определить возможное перенапряжение $U_{\text{макс}}$ в цепи постоянного тока, если происходит ее размыкание без дуги, при условии, что к зажимам индуктивности подключена емкость $C = 0,1 \text{ мкФ}$. Индуктивность в цепи $L = 1,5 \text{ Гн}$, ток $I = 20 \text{ А}$.

Р е ш е н и е . Если пренебречь активным сопротивлением индуктивной катушки, то наиболее ожидаемое напряжение может быть определено из того условия, что вся электромагнитная энергия переходит в электростатическую

$$\frac{LI^2}{2} = \frac{CU_M^2}{2}, \text{ откуда } U_M = I \sqrt{\frac{L}{C}} = 20 \sqrt{\frac{1,5}{0,1 \cdot 10^{-6}}} = 77500 \text{ В}.$$

О т в е т : $U_M = 77500 \text{ В}$.

3.3.13. Определить перенапряжение на индуктивности $L = 1,0 \text{ Гн}$ при разрыве тока $I = 25 \text{ А}$ без дуги при параллельной емкости $C = 0,15 \text{ мкФ}$.

3.3.14. В цепи постоянного тока отключается большая индуктивность. Для ограничения перенапряжения эта индуктивность перед разрывом цепи шунтируется сопротивлением. Найти значение этого сопротивления, если отключаемый ток $I = 300 \text{ А}$, напряжение $U = 200 \text{ В}$, наибольший пик перенапряжения $U_{\text{макс}} = 500 \text{ В}$.

3.3.15. Определить значение емкости, которая должна быть подключена параллельно индуктивности $L = 1 \text{ Гн}$, с тем чтобы при внезапном обрыве цепи (без дуги)

перенапряжение на индуктивности не превышало 10 кВ. Ток цепи, текущий через индуктивность, $I=15$ А.

93

3.4. Дуга в коротком промежутке

В настоящем параграфе рассмотрены задачи гашения дуг постоянного и переменного токов малой длины (порядка единиц миллиметра), а также задач, в которых определяются необходимое число пластин в решетке и пробивное напряжение единичного промежутка с учетом и без учета восстановления прочности промежутка в зависимости от времени. При этом используются следующие расчетные формулы и соотношения.

93

Число пластин дугогасительной решетки

$$n = U/(U_a + U_k) + 1, \quad (3.14)$$

где U - напряжение сети, U_a и U_k - анодное и катодное падения напряжения соответственно.

Амплитуда восстанавливающего напряжения

$$U_{\text{амп}} = k \sqrt{2} U, \quad (3.15)$$

где k - коэффициент превышения амплитуды. Пробивное напряжение короткого промежутка

$$U_{\text{пр}} = 210 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{E_{\text{макс}}^2}{\sqrt{T} \sqrt{p}} \cdot 1000 \sqrt{T}, \quad (3.16)$$

где $E_{\text{макс}}$ - напряженность электрического поля автоэлектронной эмиссии, В/см; T - температура газа, К; V_n - энергия ионизации, эВ; p - давление газовой среды, Па.

Начальная прочность короткого промежутка

$$U_{\text{нач}} = 2,8 \cdot 10^5 \cdot E_{\text{вых}}^2 / n_0, \quad (3.17)$$

где $E_{\text{вых}}$ - напряженность поля выхода электронов, В/см; n_0 - плотность носителей зарядов после перехода тока через нуль.

Закон изменения плотности ионов во времени

$$n(t) = n_0 / (1 + \alpha n_0 t), \quad (3.18)$$

где n_0 - начальная плотность ионов; α - коэффициент рекомбинации.

3.4.1. Определить число стальных пластин решетки аппарата постоянного тока для гашения дуги, возникающей на его контактах, при напряжении $U=440$ В.

Решение. Дуга, входящая в стальную решетку под влиянием магнитных сил, в средней зоне пластин останавливается, в результате чего образуются сильно нагретые

электроды дуги. Сумма катодного и анодного напряжений получается сравнительно небольшой: $U_a + U_k \approx 20 \dots 25$ В. Таким образом, число пластин решетки в соответствии с (3.14) $m = U / (U_a + U_k) + 1 = 440 / 20 + 1 = 23$.

Если расстояние между пластинами 0,1 см, то общее напряжение на дуге $U_d = 0,1 \cdot 22 \cdot I_d = 2,2 \cdot 20 = 44$ В. Это значение напряжения может пойти в запас надежности работы аппарата.

Примечание. При решении подобных задач для нахождения числа пластин решетки из медных пластин при быстром движении дуги сумма катодного и анодного напряжений может быть повышена до 50 В и, следовательно, при тех же параметрах число пластин составит уже примерно 10 шт.

$$m = 1 + \sqrt{2}U / U_{\text{пр1}} = 1 + \sqrt{2} \cdot 600 / 100 = 9,5 \approx 10.$$

О т в е т : $m = 23$.

3.4.2. Определить число медных пластин решетки дугогасительного аппарата переменного тока, если восстановление напряжения на промежутке происходит с очень высокой скоростью. При этих условиях следует принять пробивное напряжение для единичного промежутка $U_{\text{пр1}} = 200$ В. Рабочее напряжение цепи 600 В (действующее) .

Решение. При ряде последовательных промежутков пробивное напряжение между пластинами распределяется неравномерно. При расчетах

94

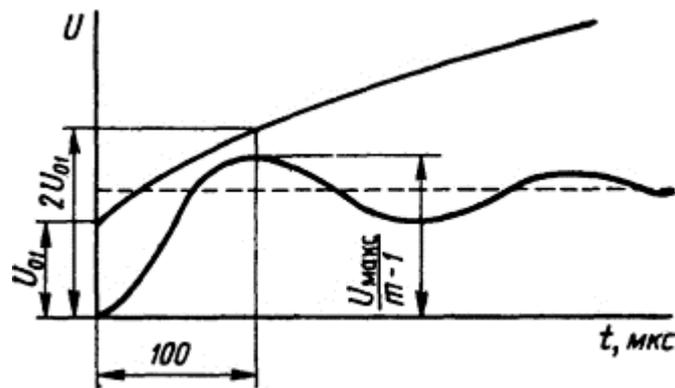


Рис. 3.4. Осциллограмма напряжения

следует принимать среднее значение пробивного напряжения в 1,5... 2 раза меньше, т.е. $U_{\text{пр1}} = 100$ В. Тогда число пластин решетки в соответствии с (3.14)

$$m = 1 + \sqrt{2}U / U_{\text{пр1}} = 1 + \sqrt{2} \cdot 600 / 100 = 9,5 \approx 10.$$

О т в е т : $m = 10$.

3.4.3. Сколько следует взять стальных пластин решетки для гашения дуги в цепи переменного тока с напряжением $U = 600$ В с током отключения $I = 100$ А?

3.4.4. Сколько пластин следует взять для медной решетки, если номинальное напряжение сети переменного тока $U=600$ В, отключаемый ток $I=200$ А? Дуга на пластинах перемещается магнитным полем.

3.4.5. Определить число стальных пластин в решетке, учитывая, что прочность должна быстро нарастать во времени и через 100 мкс должна увеличиться в 2 раза по сравнению с начальной величиной (рис. 3.4). Действующее значение напряжения $U=600$ В. Напряжение восстанавливается с частотой $f_0=5000$ Гц. Коэффициент превышения амплитуды $k=1,4$. Начальное расчетное пробивное напряжение единичного промежутка $U_{пр1} = 120$ В.

Решение. Амплитуда восстанавливающегося напряжения определяется по формуле (3.15)

$$U_{\max} = kU \sqrt{2} = 1,4 \cdot 600 \sqrt{2} = 1190 \text{ В.}$$

Через 100 мкс (прочность единичного промежутка $U_{пр}=U_{пр1} \cdot 2=120 \cdot 2=240$ В.

При $f_0=5000$ Гц полупериод собственной частоты $\tau=1/(2f_0) = 1/(5000 \cdot 2)=1/10000$ с=100 мкс.

Известно, что через этот отрезок времени прочность единичного промежутка достигает 240 В, а амплитуда восстановления напряжения достигает 1190 В. Отсюда при 20%-ном запасе число пластин в решетке в соответствии с (3.14)

$$m = 1 + 1,2U_{\max}/U_{пр} = 1 + 1190 \cdot 1,2/240 \approx 7.$$

О т в е т : $m=7$.

3.4.6. Определить число стальных пластин дугогасительной камеры, если начальная прочность единичного промежутка $U_{пр1} = 120$ В, частота восстановления напряжения $f_0=1000$ Гц, коэффициент превышения амплитуды восстанавливающегося напряжения $k=1,6$. Рабочее возвращающееся напряжение на

95

разрыв $U_{в} = 600$ В. Известно также, что за 50 мкс прочность промежутка достигает двойной величины по сравнению с начальной.

3.4.7. По какому закону должен спадать ток в обмотке возбуждения генератора, если обмотка возбуждения замкнута на дуговой промежуток с медными пластинами и напряжение на нем в основном складывается из суммы анодных и катодных падений напряжений?

3.4.8. Определить число пластин в камере автомата гашения поля генератора, если во время гашения поля она замкнута на дуговой промежуток с медными пластинами. Индуктивность обмотки возбуждения генератора $f=0,5$ Гн, начальный ток возбуждения $I=1000$ А, а наибольшее напряжение на обмотке генератора $U_{\max} = 600$ В.

3.4.9. Определить пробивное напряжение дугового короткого промежутка, если напряженность электрического поля автоэлектронной эмиссии $U_{\max} = 5 \cdot 10^5$ В/см,

температура газа $T=5000$ К, энергия ионизации частиц $V_{и}=11$ эВ, давление газовой среды $p = 4 \cdot 10^5$ Па.

Решение. Связь пробивного напряжения короткого промежутка с указанными величинами определяется выражением (3.16)

$$U_{пр} = 210 \cdot 10^{-13} \cdot \frac{E_{\max}^2}{\sqrt{T} \sqrt{p}} e^{5800 V_{и}/T} = 210 \cdot 10^{-13} \times \\ \times \frac{(5 \cdot 10^5)^2}{\sqrt{5000} \sqrt{4 \cdot 10^5}} \cdot e^{5800 \cdot 11/5000} = 344 \text{ В.}$$

О т в е т: $U_{пр}=344$ В.

3.4.10. Определить электрическую прочность короткого промежутка, если напряженность электрического поля автоэлектронной эмиссии $U_{\max} = 5,5 \cdot 10$ В/см; температура газа $T=6000$ К, энергия ионизации частиц $V_{и}=11,5$ эВ, давление газовой среды $p = 3 \cdot 10^5$ Па.

3.4.11. Определить начальную прочность короткого промежутка, если плотность носителей зарядов в дуговом промежутке непосредственно после перехода тока через нуль $n_0 = 5 \cdot 10^{15}$ см⁻³, напряженность поля выхода электронов $E_{\text{вых}}=2 \cdot 10^6$ В/см.

Решение. Связь между значением пробивного напряжения $U_{пр}$, плотностью ионов n_0 и напряженностью поля выхода $E_{\text{вых}}$ можно выразить формулой (3.17) и тогда

$$U_{пр} = 2,8 \cdot 10^5 \cdot 4 \cdot 10^{12} / (5 \cdot 10^{15}) = 224 \text{ В.}$$

О т в е т: $U_{пр}=224$ В.

3.4.12. Определить пробивное напряжение короткого промежутка сразу после перехода тока через его нулевое значение и

96

спустя 10 и 50 мкс. Напряженность поля выхода $E_{\text{вых}} = 3 \cdot 10^5$ В/см, начальная плотность ионов $n_0=10^{15}$ см⁻³.

Решение. Изменение плотности ионов во времени описывается выражением (3.18). Принимая коэффициент рекомбинации $\alpha = 6 \cdot 10^{-6}$, получим соответственно для $t=10$ мкс и $t=50$ мкс:

$$n(10) = 10^{15} / (1 + 10^{15} \cdot 6 \cdot 10^{-9} \cdot 10^{-5}) = 1,64 \cdot 10^{13}; \\ n(50) = 10^{15} / (1 + 10^{15} \cdot 6 \cdot 10^{-9} \cdot 5 \cdot 10^{-5}) = 0,33 \cdot 10^{13};$$

Зная значения плотностей ионов $n_0=10^{15}$; $n_{10}=1,64 \cdot 10^{13}$; $n_{50}=0,33 \cdot 10^{13}$ см³, можно определить пробивное напряжение для трех моментов времени: 0,1; 10⁻⁵; 5 \cdot 10⁻⁵ с. Подставляя найденные значения n в уравнение (3.17), выражающее значение пробивного напряжения, получим

$$U_{\text{пр1}} = 2,8 \cdot 10^5 (3 \cdot 10^5)^2 / 10^{15} = 25 \text{ В для } t = 0;$$

$$U_{\text{пр2}} = 2,8 \cdot 10^5 (3 \cdot 10^5)^2 / (1,64 \cdot 10^{13}) = 1530 \text{ В для } t = 10^{-5} \text{ с};$$

$$U_{\text{пр3}} = 2,8 \cdot 10^5 (3 \cdot 10^5)^2 / (0,33 \cdot 10^{13}) = 7600 \text{ В для } t = 5 \cdot 10^{-5} \text{ с}.$$

О т в е т : $U_{\text{пр1}} = 25 \text{ В}; U_{\text{пр2}} = 1530 \text{ В}; U_{\text{пр3}} = 7600 \text{ В}.$

3.4.13. Определить изменение плотности ионов в коротком промежутке во времени, если начальная плотность $n_0 = 2 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и коэффициент рекомбинации $\alpha = 0,5 \cdot 10^{-9}$.

3.4.14. Определить пробивное напряжение $U_{\text{пр}}$ короткого промежутка через 15 мкс, если плотность ионов $n_0 = 1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$; коэффициент рекомбинации $\alpha = 10^{-9}$; напряженность поля выхода $E_{\text{вых}} = 3,5 \cdot 10^5 \text{ В/см}.$

97

3.5. Отключение цепей переменного тока с длинной дугой

В этом параграфе приведены задачи на гашение дуги переменного тока в длинных промежутках, когда к единичному промежутку приложены сотни, тысячи и десятки тысяч вольт, а также задачи на определение частот восстановления напряжения при различных видах короткого замыкания и разных критических шунтирующих сопротивлениях, последовательно включенных с дугой и индуктивностью в отключаемом контуре. Задачи даны преимущественно для цепей высокого напряжения. При этом используются следующие расчетные формулы и соотношения.

Индуктивность фазы трансформатора при частоте $f = 50 \text{ Гц}$

$$L_{\phi} = \frac{10XU^2}{2\pi f P_{\text{ном}}}, \quad (3.19)$$

где X - процентная реактивность фазы; U - номинальное напряжение, кВ; f - частота тока, Гц, $P_{\text{ном}}$ - номинальная мощность трансформатора, кВ·А.

Индуктивное сопротивление реактора

$$X = X_{\text{ф}} I_{\text{ном}} (\sqrt{3} U_{\text{ном}} - 100), \quad (3.20)$$

где X - процентная реактивность реактора; $U_{\text{ном}}$, $I_{\text{ном}}$ - номинальные напряжения и ток реактора соответственно.

97

Средняя скорость восстановления напряжения, В/мкс, на первой рвущей фазе выключателя [1]

$$\left(\frac{dU_{\text{вн}}}{dt} \right)_{\text{ср}} = 4 \cdot 10^{-6} f_0 U_0, \quad (3.21)$$

где f_0 - частота колебаний восстановления напряжения на разрыве выключателя; $U_0 = 1,5 U_{\text{ном}} \sqrt{2/\sqrt{3}}$ где $U_{\text{ном}}$ - номинальное напряжение.

Индуктивность трансформатора при высокой частоте восстановления напряжения [4]

$$L_{f_0} = 0,75L_{50}. \quad (3.22)$$

3.5.1. Определить ток трехфазного к.з. за трансформатором, у которого номинальная мощность $P_{\text{ном}}=160000$ кВ·А, напряжение $U_{\text{ном}} = 110$ кВ, процентная реактивность $X=10\%$. Пред включенным индуктивным сопротивлением цепи пренебречь.

Решение. Ток к.з. $I_{\text{к.з}} = I_{\text{ном}} \cdot 100/X$. Если умножить числитель и знаменатель этого равенства на $\sqrt{3}U_{\text{ном}}$, то можно выразить значение тока к.з. трансформатора через его номинальные мощность и напряжение:

$$I_{\text{к.з}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot 100}{\sqrt{3}U_{\text{ном}}X} = \frac{160\,000 \cdot 100}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10} = 8400 \text{ А.}$$

О т в е т : $I_{\text{к.з}} = 8400$ А.

3.5.2. Группа трансформаторов общей мощностью 580000 кВ·А, питает шины напряжением $U_{\text{ном}}=220$ кВ. Определить общее индуктивное сопротивление X и ток к.з., если реактивность трансформатора составляет 8%.

3.5.3. Определить значение индуктивности фазы трансформатора в условиях высокочастотного процесса, если мощность трансформатора $P_{\text{ном}} = 240000$ кВ·А; напряжение $U_{\text{ном}}=220$ кВ; процентная реактивность $X=10\%$, общая емкость фазы трансформатора на землю $C=2500$ пФ.

Решение. Для промышленной частоты $f=50$ Гц индуктивность одной фазы трансформатора в соответствии с (3.19)

$$L_{\Phi} = \frac{10XU_{\text{ном}}^2}{2\pi f P_{\text{ном}}} = \frac{10 \cdot 10 \cdot 220^2}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 240\,000} = 0,064 \text{ Гн.}$$

Принимаем эквивалентную емкость на конце обмотки равной половине общей емкости: $C_{\text{пр}}=C_{\Phi}/2= 2500/2 =1250$ пФ.

Частота свободных колебаний без учета снижения индуктивности

$$f_0 = 1/(2\pi \sqrt{C_{\text{пр}}L_{\Phi}}) = 1/(2 \cdot 3,14 \sqrt{1250 \cdot 10^{-2} \cdot 0,064}) = 1,78 \cdot 10^4 \text{ Гц.}$$

При частоте около 20 кГц индуктивность может снижаться на 20%, т.е. $L_{f_0}=0,8 \cdot 0,064 = 0,051$ Гн.

О т в е т : $L_{f_0}=0,051$ Гн.

3.5.4. Определить частоту и среднюю скорость восстановления напряжения на выключателе (первом рвущем полюсе), если имеет место короткое замыкание за выключателем в начале линии, присоединенной к шинам весьма мощной станции или подстанции

через реактор. Номинальное напряжение $U_{\text{ном}}=10$ кВ, процентная реактивность реактора $X_p = 10\%$, номинальный ток $I_{\text{ном}} = 2000$ А. Емкость элементов цепи, находящейся за

реактором, определяется следующими составляющими одной фазы: реактор - 200 пФ, трансформатор тока - 1500 пФ, опорные изоляторы - 500 пФ, воздушный выключатель - 100 пФ. Частота тока в нормальном режиме $f=50$ Гц.

Решение. Общая емкость одного полюса на землю $C = 200 + 150 + 500 + 100 = 950$ пФ.

Индуктивное сопротивление реактора [см. (3.20)]

$$X = 10 \cdot 10\,000 / (\sqrt{3} \cdot 2000 \cdot 100) = 0,29 \text{ Ом.}$$

Индуктивность одной фазы реактора

$$L = X / \omega = 0,29 / 314 = 0,92 \cdot 10^{-3} \text{ Гн,}$$

где $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ с}^{-1}$.

Частота колебания восстанавливающегося напряжения на разрыве выключателя

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \sqrt{0,92 \cdot 10^{-3} \cdot 950 \cdot 10^{-12}}} = 170 \text{ кГц.}$$

Средняя скорость восстановления напряжения на первой рвущей фазе определится по формуле (3.21)

$$\left(\frac{dU_{\text{вн}}}{dt} \right)_{\text{ср}} = 4f_0 U_0 \cdot 10^{-6} = 4 \cdot 170\,000 \cdot 1,5 \frac{10\,000}{\sqrt{3}} \sqrt{2} \cdot 10^{-6} = 8330 \text{ В/мкс,}$$

где

$$U_0 = 1,5 \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2}.$$

О т в е т: $f_0 = 170000$ Гц, $(dU_{\text{вн}}/dt)_{\text{ср}} = 8330$ В/мкс.

3.5.5. Определить частоту f_0 и скорость восстановления напряжения dU/dt на выключателе, установленном за трансформатором, если $P_{\text{ном}} = 300000$ кВ·А. Напряжение $U_{\text{ном}} = 220$ кВ. Емкость одной фазы трансформатора $C = 2000$ пФ. Нейтраль не заземлена.

3.5.6. Определить частоты и скорости восстановления напряжения в контурах двухчастотного контура для первой рвущей фазы. Напряжение $U_{\text{ном}} = 110$ кВ. Данные первого контура: $L_1 = 0,3$ Гн, $C_1 = 15000$ пФ; второго: $L_2 = 0,4$ Гн, $C_2 = 2000$ пФ.

3.5.7. Определить ток трехфазного к.з. трансформатора и частоту восстановления напряжения на первой рвущей фазе при емкости фазы $C = 2000$ пФ, если $P_{\text{ном}} = 160000$ кВ·А, $U_{\text{ном}} = 110$ кВ, процентная реактивность $X = 8\%$.

3.5.8. Определить частоту, амплитуду и скорость восстановления напряжения на первом рвущем полюсе выключателя, если короткое замыкание имеет место в начале линии, непосредственно за выключателем, присоединенным к шинам весьма мощной станции через реактор. Данные установки: $U_{\text{ном}} = 10$ кВ; индуктивное

сопротивление реактора $X = 80\%$; $I_{\text{ном}}=2000$ А; общая емкость одного полюса на землю $C = 1000$ пФ.

3.5.9. Определить критическую величину шунтирующего сопротивления на полюсах трехфазного выключателя, которое давало бы при всех возможных режимах к.з. апериодический процесс восстановления напряжения (рис. 3.5, а). Мощность трансформатора

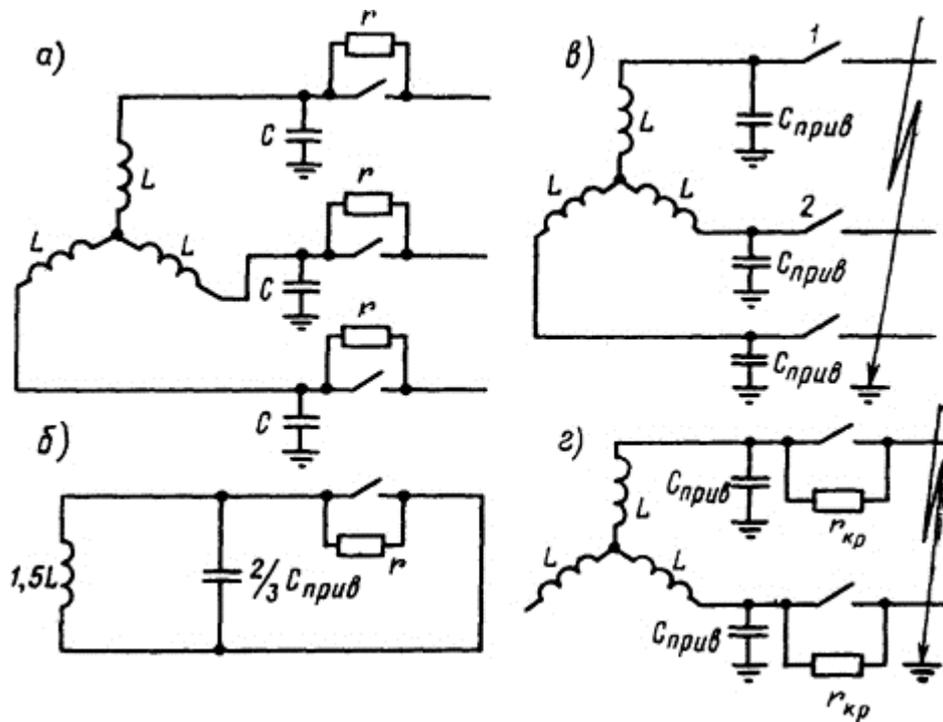


Рис. 3.5. Схема сети и место короткого замыкания

$P_{\text{ном}}=20000$ кВ·А. Напряжение $U_{\text{ном}}=10$ кВ; реактивность $X=6\%$; емкость обмотки на землю $C_{\text{тр}}=1500$ пФ. Нейтраль трансформатора не заземлена. Емкость оборудования и шин на землю одной фазы в общей сложности $C_0=1000$ пФ.

Решение. При частоте 50 Гц индуктивность рассеяния одной фазы трансформатора определим по формуле (3.19)

$$L_{50} = 10 \cdot X U_{\text{ном}}^2 / (2\pi f P_{\text{ном}}) = 10 \cdot 6 \cdot 10^2 / (2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 20\,000) = 0,001 \text{ Гн.}$$

Индуктивность трансформатора при высокой частоте восстановления напряжения будет равна [см. (3.22)]

$$L_{f_0} = 0,75 L_{50} = 0,75 \cdot 0,001 = 0,00075 \text{ Гн.}$$

Приведенная расчетная емкость одной фазы трансформатора

$$C_{\text{прив}} = \frac{C_{\text{тр}}}{2} + C_{\phi} = 1500/2 + 1000 = 1750 \text{ пФ.}$$

Для различных возможных к.з. за выключателем могут быть приняты следующие приведенные контуры и их параметры:

1. Трехполюсное к.з. без замыкания на землю (рис. 3.5, б). Для первой рвущей фазы без замыкания на землю в месте к.з.

$$L = 1,5L_{f_0} = 1,5 \cdot 0,00075 = 0,00112 \text{ Гн};$$

$$C = 2C_{\text{прив}}/3 = 2 \cdot 1750/3 = 1170 \text{ пФ}.$$

100

Критическое сопротивление

$$r_{\text{кр}} = 0,5 \sqrt{L/C} = 0,5 \sqrt{0,00112/(1170 \cdot 10^{-12})} = 4740 \text{ м}.$$

2. Трехполюсное к.з. с замыканием на землю (рис. 3.5, в). Если фаза 1 является первой рвущей, то емкости фаз 2 и 3 оказываются зашунтированными дугowym замыканием на землю. В приведенном контуре в этом случае будет индуктивность $L=1,5L_{f_0}=0,00112$ Гн, как в предыдущем случае. Емкость в приведенном контуре будет равна фазовой приведенной емкости $C_{\text{прив}}$, а критическое сопротивление

$$r_{\text{кр}} = 0,5 \sqrt{0,00112/(1750 \cdot 10^{-12})} = 400 \text{ Ом}.$$

3. Двухполюсное к.з. (без земли) (рис. 3.5, г) :

$$L = 2L_{f_0} = 2 \cdot 0,00075 = 0,0015 \text{ Гн};$$

$$C = C_{\text{прив}}/2 = 1750/2 = 875 \text{ пФ};$$

$$2r_{\text{кр}} = 0,5 \sqrt{L/C} = 0,5 \sqrt{0,0015/(875 \cdot 10^{-12})} = 1320 \text{ Ом}.$$

В данном случае присутствуют два сопротивления на полюсах и, следовательно, сопротивление на один полюс $r_{\text{кр}} = 1320/2 = 660$ Ом. Таким образом, наименьшее из значений критических сопротивлений дает случай трехфазного к.з. с замыканием на землю ($r_{\text{кр}}=400$ Ом). Выбираем шунтирующее сопротивление с двойным запасом, а именно: $r_{\text{ш}}=r_{\text{кр}}/2=400/2=200$ Ом. Такое сопротивление обеспечит апериодический процесс восстановления напряжения в довольно широких пределах изменения постоянных контура.

О т в е т : $r_{\text{ш}}=200$ Ом.

3.5.10. Определить значение критического сопротивления $\Gamma_{\text{кр}}$, шунтирующего фазу выключателя при мощности $P_{\text{ном}} = 5000$ кВ·А. Приведенная к фазе выключателя емкость $C_{\text{прив}} = 2500$ пФ, номинальное напряжение $U_{\text{ном}} = 20$ кВ.

101

3.6. Отключение малых емкостных и индуктивных токов

В этом параграфе рассмотрены задачи на отключение токов трансформаторов и воздушных линий передачи переменного тока, на определение превышения напряжения на выключателе в случае отключения зарядного тока линии при различных значениях шунтирующего сопротивления и значения первой наибольшей амплитуды напряжения при отключении холостых трансформаторов в условиях среза токов, а также на

определение условий отключения одной фазы линии передачи и значений сопротивлений, шунтирующих выключатель для ограничения напряжения на определенном уровне. При этом используются следующие расчетные формулы и соотношения.

Наибольший пик напряжения при срезе тока на максимуме

$$U_{\max} = I_0 \sqrt{2\pi \sqrt{L_0 C}} \quad (3.23)$$

где I_0 - ток холостого хода трансформатора, А; L_0 - индуктивность одной фазы трансформатора; Гн; C - приведенная емкость, Ф.

Остаточный ток при однофазном отключении

$$I_{\text{ост}} = U \omega C / \sqrt{3} \quad (3.24)$$

где U - напряжение сети, А; $\omega = 2\pi f$; f - частота тока, Гц; C - междуфазовая емкость, Ф; l - длина линии передачи, м.

101

Коэффициент превышения напряжения на выключателе при отключении емкостного тока [1]

$$k = \frac{U_{\max}}{U_{\text{ном}}} = \frac{1}{\omega + (1/r)C\omega^2} \left(\frac{1}{rC} \sin \omega t - \omega \cos \omega t + \omega^2 e^{-\beta t} \right) \quad (3.25)$$

где ω - угловая частота сети; r - шунтирующее сопротивление на фазу, Ом; C - отключаемая фазовая емкость, Ф.

Значение напряжения, кВ, остаточного дугового столба открытой дуги

$$U < \frac{3,3I}{3,5e^{-200t} \sqrt{l}} ,$$

где l - длина дуги, м; t - время, с; I - ток, А.

3.6.1. Определить начальную скорость и амплитуду восстановления напряжения на выключателе при отключении холостой линии емкостью C от трансформатора, если номинальная мощность трансформатора $P_{\text{ном}}=5000$ кВ·А, номинальное напряжение $U_{\text{ном}}=110$ кВ, процентная реактивность $X=12\%$, приведенная емкость $C=0,1$ мкФ. Зарядный ток холостой линии $I=25$ А частоты $f=50$ Гц.

Р е ш е н и е . Индуктивность фазы трансформатора в соответствии с (3.19)

$$L_{\text{тр}} = 10XU_{\text{ном}}^2 / (2\pi f P_{\text{ном}}) = 10 \cdot 12 \cdot 110^2 / (2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 5000) = 0,925 \text{ Гн.}$$

Амплитуда падения напряжения на сопротивлении рассеяния трансформатора

$$U_{L_{\text{макс}}} = L_{\text{тр}} 2\pi f I = 0,925 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 25 = 7260 \text{ В.}$$

Собственная частота колебаний напряжения

$$f_0 = 1/(2\pi \sqrt{L_{\text{тр}}C_{\text{тр}}}) = 1/(2 \cdot 3,14 \sqrt{0,925 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}}) = 526 \text{ Гц.}$$

Начальная средняя скорость восстановления напряжения на выключателе определится из формулы (3.21)

$$\left(\frac{dU_{\text{в}}}{dt}\right)_{\text{ср}} = 4f_0 U_{L_{\text{макс}}} = 4 \cdot 526 \cdot 7260 = 15,2 \cdot 10^6 \text{ В/с} = 15,2 \text{ В/мкс.}$$

О т в е т : $U_{L_{\text{макс}}} = 7,26 \text{ кВ}$; $(dU_{\text{в}}/dt)_{\text{ср}} = 15,2 \text{ В/мкс.}$

3.6.2. Определить значение тока х.х. линии длиной $l=100 \text{ км}$ при номинальном напряжении $U_{\text{ном}} = 220 \text{ кВ}$, если ее отключают от бесконечно мощного источника энергии. Найти перенапряжение на линии, если при отключении имеет место образование двух повторных пробоев на амплитудном напряжении.

3.6.3. Трехфазный трансформатор работает то в режиме к.з., то в режиме отключения х.х. Определить частоты восстановления и амплитуды напряжений, если мощность трансформатора $P_{\text{ном}}=120 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; напряжение $U_{\text{ном}}=110 \text{ кВ}$; реактивность к.з. $X=10\%$; ток х.х. $I_0 = 2\%$; приведенная емкость $C = 2000 \text{ пФ}$; $f = 50 \text{ Гц}$.

Р е ш е н и е . Индуктивность рассеяния одной фазы трансформатора можно определить по формуле (3.19).

$$L_{\phi} = 10XU_{\text{ном}}^2 / (2\pi f P_{\text{ном}}) = 10 \cdot 10 \cdot 110^2 / (2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 120\,000) = 0,0321 \text{ Гн.}$$

102

Частота колебания восстанавливающегося напряжения в режиме к.з.

$$f_0 = 1/(2\pi \sqrt{L_{\phi}C}) = 1/(2 \cdot 3,14 \sqrt{0,0321 \cdot 2000 \cdot 10^{-12}}) = 20\,000 \text{ Гц.}$$

Амплитуда первого пика восстанавливающегося напряжения [1]

$$U_{\text{макс.х.х}} = U_{\text{ном}} \cdot \sqrt{2} \cdot 2 / \sqrt{3} = 110 \sqrt{2} \cdot 2 / \sqrt{3} = 179 \text{ кВ.}$$

Ток х.х. трансформатора

$$I_0 = \frac{2I_{\text{ном}}}{100} = \frac{2P_{\text{ном}}}{100U_{\text{ном}}} = 0,02 \frac{120\,000}{\sqrt{3} \cdot 110} = 12,6 \text{ А.}$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки трансформатора в режиме х.х.

$$X_0 = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}I_0} = \frac{110\,000}{\sqrt{3} \cdot 12,6} = 5046 \text{ Ом.}$$

Тогда индуктивность одной фазы $L_0 = X_0/\omega = 5046/314 = 16,1 \text{ Гн}$.

Частота колебания напряжения на трансформаторе в режиме х.х.

$$f_{x,x} = 1/(2\pi \sqrt{LC}) = 1/(2 \cdot 3,14 \sqrt{16,1 \cdot 2000 \cdot 10^{-12}}) = 887 \text{ Гц.}$$

Наибольший пик напряжения при срезе тока на максимуме

$$U_{\text{макс.х.х}} = I_0 \sqrt{L_0/C} = 12,6 \sqrt{16,1/(2000 \cdot 10^{-12})} = 1,13 \cdot 10^6 \text{ В} = 1130 \text{ кВ.}$$

О т в е т : $f_0=20000$ Гц; $f_{x,x} = 887$ Гц; $U_{\text{макс к.з}}=179$ кВ; $U_{\text{макс х.х}} = 1130$ кВ.

3.6.4. Определить значение шунтирующего сопротивления полюса выключателя для ограничения (до 215 кВ) перенапряжения х.х. трансформатора, если его мощность $P_{\text{ном}} = 120000$ кВ·А, напряжение $U_{\text{ном}}=110$ кВ, суммарная емкость, приведенная к началу фазы (вводу), $C_{\text{прив}} = 3500$ пФ, процентная реактивность $X = 10\%$.

3.6.5. Определить пик ожидаемого напряжения на трансформаторе при отключении х.х. если мощность одного полюса трансформатора $P_{\text{ном}} = 60000$ МВ·А, напряжение $U_{\text{ном}} = 70$ кВ. Ток х.х. составляет 3% от номинального, емкость фазы трансформатора $C=2000$ пФ, емкость остальных элементов (шин, изоляторов, трансформатора тока) выключателя $C=1800$ пФ.

3.6.6. На линии электропередачи напряжением $U = 220$ кВ и протяженностью $t = 60$ км произошло однофазное короткое замыкание на землю, которое можно устранить с помощью одного полюса выключателя. Оценить возможность деионизации остаточного столба дуги, если междуфазовая емкость $C = 0,001$ мкФ/км, частота сети $f = 50$ Гц.

Р е ш е н и е . При однофазном отключении остаточный дуговой столб будет получать подпитку от междуфазовых емкостных связей. Ток подпитки определим из формулы (3.24) :

$$I_{\text{ост}} = \frac{U}{\sqrt{3}} \omega C l = \frac{220\,000}{\sqrt{3}} 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,001 \cdot 10^{-6} \cdot 60 = 2,4 \text{ А.}$$

При емкостных связях и полной деионизации остаточного столба дуги возвращающееся напряжение на отключенном проводе по отношению к земле

103

$U_3 \approx 0,15 \cdot U/\sqrt{3} = 0,15 \cdot 220000/\sqrt{3} = 19100 \text{ В} = 19,1 \text{ кВ.}$ Критическая длина дуги за счет подпитывающего тока

$$l_{\text{кр}} = 0,128 \sqrt{I_{\text{ост}} U_3} = 0,128 \cdot \sqrt{2,4 \cdot 19,1} = 3,8 \text{ м.}$$

На основании экспериментальных данных действительная длина дуги за счет мелких петель и изгибов получается по крайней мере в 2 раза больше, чем расчетная, поэтому для угасания дуги ее кажущаяся длина должна быть $l < l_{\text{кр}}/2 = 3,8/2 = 1,9$ м.

При номинальном напряжении 220 кВ наименьшее расстояние по гирлянде изоляторов П-4,5 составляет 2,5 м, однако следует иметь в виду, что при протекании тока к.з. через дуговой столб он будет растянут электродинамическими силами, создаваемыми током к.з. Таким образом, несомненно, путь остаточного тока будет значительно больше, чем кажущаяся длина дуги, и, следовательно, дуга остаточного тока гореть не сможет и должна угаснуть.

О т в е т : остаточная дуга угасает.

3.6.7. Оценить возможность гашения дуги на линии, возникающей при перекрытии фаза - земля при условии пофазного отключения. Напряжение $U_{\text{ном}}=110$ кВ, длина линии $l=50$ км.

3.6.8. Определить условие самоугасания открытой дуги, если начальный ток дуги $I=100$ А, линейное напряжение сети $U_{\text{ном}} = 110$ кВ. Дуга возникает между проводом и землей.

3.6.9. Определить максимальный ток, который можно разомкнуть с помощью открытой дуги, если длина, на которую может быть растянута дуга в процессе отключения, $l_{\text{д}}=8$ м, а номинальное напряжение $U_{\text{ном}} = 6$ кВ.

3.6.10. Оценить кратность напряжения, возникающего на выключателе при отключении им участка линии емкостью $C=1,5$ мкФ, если каждая фаза выключателя зашунтирована сопротивлением $r=3000$ Ом. Повторные пробои и замыкания не принимаются во внимание.

Р е ш е н и е . Повышение напряжения на выключателе при отключении им емкостного тока [4] определим на основе формулы (3.25)

$$k = \frac{U_{\text{вык}}}{U_{\text{макс}}} = \frac{\omega}{\omega^2 + [1/(rC)]^2} \left(\frac{1}{rC} \sin \omega t - \omega \cos \omega t + \omega e^{-t/(rC)} \right) =$$
$$= \frac{314}{314^2 + [1/(3000 \cdot 1,5 \cdot 10^{-6})]^2} \times$$
$$\times \left[\frac{1}{3000 \cdot 1,5 \cdot 10^{-6}} \sin 314t - 314 \cos 314t + 314 e^{-t/(3000 \cdot 1,5 \cdot 10^{-6})} \right].$$

Наибольшая кратность напряжения, как показано в [4], наступает при $t = 0,0076$ с и составляет $k = 0,92$.

О т в е т : $k = 0,92$.

3.6.11. Оценить ориентировочное значение напряжения остаточного дугового столба через время $t = 0,3$ с после его отключения, если до отключения ток дуги $I=1000$ А. Дуга открытая, длина канала достигает $l = 2,0$ м.

104

Р е ш е н и е . Оценить это напряжение можно с помощью формулы (3.26):

$$U < \frac{33I}{3,5e^{-200t/\sqrt{I}} + 1} = \frac{3,3 \cdot 200}{3,5e^{-200 \cdot 0,3/\sqrt{1000}} + 1} = 434 \text{ кВ.}$$

О т в е т : $U=434$ кВ.

3.6.12. Оценить сопротивление остаточного дугового канала, если номинальное напряжение цепи $U_{\text{ном}}=110$ В, а остаточный ток $I=200$ мА.

4.2. Сваривание контактов

В этом параграфе даны задачи на сваривание контактов аппаратов. Сваривание контактов - весьма сложное явление сочетания тепловых и динамических процессов. При расчете токов сваривания используются следующие расчетные формулы и соотношения

Минимальный сваривающий ток [1]

$$I_{св\infty} = ma \sqrt{32\lambda\theta_{пл}/\rho} \quad (4.10)$$

где $m=1,5... 2$ - коэффициент, a - радиус площадки касания, м; λ - коэффициент теплопроводности материала контактов, Вт/(м·К); $\theta_{пл}$ - температура плавления материала контактов, °С; ρ - удельное сопротивление материала контактов, Ом·м.

Эмпирическая формула Буткевича для определения минимального тока сваривания [4]

$$I_{св\min} = k \sqrt{P}, \quad (4.11)$$

где k - коэффициент, зависящий от материала и типа контактов; P - усилие контактного нажатия.

4.2.1. Два стержня диаметром $d=20$ мм сжаты силой $P=390$ Н. Торцы обработаны таким образом, что образуют сферические поверхности радиуса $r=10$ мм. Определить, какой постоянный ток в течение времени $t=0,2$ с эти контакты могут выдержать без сваривания.

Решение. Минимальный сваривающий ток определяется по формуле (4.10)

$$I_{св\infty} = ma \sqrt{32\lambda\theta_{пл}/\rho} = 1,5 \cdot 0,49 \cdot 10^{-3} \times \\ \times \sqrt{32 \cdot 390 \cdot 1083 / 1,62 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0043 \cdot 1083)} = 8928 \text{ А.}$$

Здесь

$$a = \sqrt{P/(\pi\sigma_{см})} = \sqrt{390/(3,14 \cdot 51 \cdot 10^7)} = 0,49 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

- радиус площадки касания; $m=1,5$ - коэффициент; $\sigma_{см}=51 \cdot 10^7$ Н/м² - напряжение смятия для меди (см. табл. П.16); $\lambda=390$ Вт/(м·К) - теплопроводность меди; $\theta_{пл} = 1083$ °С - температура плавления меди, $\rho=1,62 \cdot 10^{-8}$ Ом·м - удельное сопротивление меди при 0°С. Для параметра

$$\frac{ma}{2\beta \sqrt{t}} = \frac{1,5 \cdot 0,49 \cdot 10^{-3}}{2 \sqrt{390/(390 \cdot 8700)} 0,2} = 0,08,$$

где

$\beta = \sqrt{\lambda/(c\gamma)} = \sqrt{390/(390 \cdot 8700)}$; $c = 390$ Дж (кг·К) — удельная теплоемкость
 $\gamma = 8700$ кг/м³ — плотность меди. По графику из [4] находим $I_{св}/I_{св\infty} = 1,1$
 Следовательно, $I_{св} = I_{св\infty} \cdot 1,1 = 8928 \cdot 1,1 = 9820$ А.
 Ответ: $I_{св} = 9820$ А.

4.2.2. Определить ток сваривания в задаче 4.2.1, если сила контактного нажатия $P=1000$ Н, а все остальные данные остались без изменения.

4.2.3. Определить сваривающий ток медных контактов, образуемых параллельными стержнями и переключкой (траверсой).

110

Контакты торцовые, диаметр стержня $d=20$ мм. Расстояние между осями стержней $a=400$ мм. Механическая сила, сжимающая контакты (каждую пару), $P=200$ Н, контакты одноточечные.

4.2.4. Определить минимальный сваривающий ток розеточного контакта из меди, если сила нажатия на одну ламель составляет 50 Н, всего ламелей 6 шт.

Решение. Величина амплитуды минимального сваривающего тока может быть определена по формуле (4.4) для случаев, когда наибольший пик симметричного тока получается в начале процесса:

$$I_{св\min} = k \sqrt{P} = 5000 \sqrt{50/9,81} = 11\,300 \text{ А},$$

где P - сила сжатия контактов, $k = 5000$ - числовой коэффициент для одной ламели.

Для шести ламелей сваривающий ток можно получить по крайней мере в 6 раз большим:

$$I_{св} = 6 \cdot 11\,300 = 67\,700 \text{ А}.$$

В действительности сваривающий ток может оказаться более высоким, если учитывать силу взаимодействия между ламелями.

Ответ: $I_{св} = 67,7$ кА.

4.2.5. Определить минимальный ток сваривания медных контактов, сжимаемых с силой $P=150$ Н, если ток при к.з. имеет сильное затухание симметричной составляющей (т.е. возможно сваривание только на первом максимальном пике).

4.2.6. Определить минимальный сваривающий ток для сильно затухающего симметричного тока в пальцевых медных контактах, сжимаемых силой $P = 100$ Н, для несомоустанавливающихся и сомоустанавливающихся пальцев и сравнить полученные результаты.

4.2.7. Определить допустимую величину амплитуды тока к.з. для розеточного контакта выключателя, если величина контактного нажатия, которое осуществляется каждой ламелью розетки, $P=100$ Н, число ламелей в контакте $n=6$.

4.2.8. Определить требуемую с точки зрения сваривания величину контактного нажатия медного щеточного контакта пускового реостата, если максимальное значение амплитуды ударного тока к.з. $i_{уд}=10$ кА.

4.2.9. Определить минимальный ток сваривания самоустанавливающегося пальцевого медного контакта, прижимаемого пружиной с силой 100 Н. Допускаем, что составляющая симметричного тока имеет сильно затухающий характер. Сваривание в этом случае возможно только на первой наибольшей полуволне тока.

4.2.10. Определить силу, с которой должны сжиматься между собой медные контакты, если амплитуда наибольшего тока в цепи может достигнуть $I_{макс}=30$ кА. Результаты сравнить, когда контакты снабжены медно-вольфрамовыми накладками.

4.2.11. Оценить предельный минимальный сваривающий ток контакта разъединителя с учетом механической силы, сжимающей

111

контакты и внешних электродинамических сил, возникающих от взаимодействия шин длиной $l=0,5$ м. Максимальный ток, протекающий через каждый контакт, $I=20$ кА. Расстояние между осями шин $a=0,04$ м. Механическая сила, сжимающая контакты, постоянна; $P=100$ Н.

Решение. Электродинамическая сила, прижимающая один контакт, $P/2=10^{-7}I^22l/(2a)=10^{-7}(20000)^2\cdot 0,5/(0,04\cdot 2)=500$ Н. Общая сила на один контакт $P_{\Sigma}=500+100=600$ Н. Амплитуда сваривающего тока для одного контакта по формуле (4.11) будет равна

$$I_{св} = k \sqrt{P_{\Sigma}} = 4000 \sqrt{600/9,8} = 31,3 \text{ кА},$$

где $k=4000$ - числовой коэффициент [4].

Этот ток больше действительного тока, приходящегося на один контакт (20 кА), и, следовательно, сваривания не произойдет.

О т в е т : $I_{св}=31,3$ кА.

4.2.12. Определить минимальный сваривающий ток к.з. одноточечного латунного контакта разъединителя, сжимаемого с силой $P=150$ Н, если подводящие шины дополнительно сжимают контакты с максимальной электродинамической силой, развиваемой током. Размеры шин 5×30 мм, расстояние между шинами $a=10$ мм, а длина их $l=0,5$ м.

112

ГЛАВА 5. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕХАНИЗМОВ

5.1. Расчет магнитных проводимостей воздушных промежутков

В данном параграфе рассматриваются задачи по расчету магнитных проводимостей путей магнитного потока по воздуху, характерных для электромагнитных механизмов постоянного и переменного тока. Приводятся задачи

114

по расчету проводимостей рабочих и паразитных зазоров, проводимостей рассеяния и суммарных проводимостей различных магнитных систем (клапанного, броневое и других типов), а также цепей с постоянными магнитами, применяющихся в поляризованных и других системах электрических аппаратов. В дальнейшем тексте теории и задач пятой главы¹ будем для упрощения использовать термин *электромагнит*, подразумевая электромагнитный механизм, т.е. такое устройство, в котором электрическая энергия преобразуется в механическую (приводы высоковольтных выключателей, магнитные пускатели, контакторы, реле, силовые электромагниты и т.п.).

При равномерном (однородном) поле магнитная проводимость воздушного промежутка (Гн)

$$\Lambda_1 = \mu_0 S / \delta, \quad (5.1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная постоянная; S - площадь полюса, м²; δ - величина воздушного промежутка, м.

Для цилиндрических с диаметром d или квадратных со стороной a полюсов, обращенных друг к другу торцовыми поверхностями, поле можно считать равномерным при $d/\delta, a/\delta \geq 20$ (приблизительно при $d/\delta, a/\delta \geq 10$ [6]); поле также можно считать равномерным для паразитных зазоров.

Магнитное сопротивление (являющееся величиной, обратной проводимости) (Гн⁻¹) равно

$$R_1 = 1/\mu_0 S, \quad (5.2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; S - площадь полюса, м²; δ - воздушный зазор, м.

При неравномерном поле расчет магнитных проводимостей поля с боковой поверхности полюсов вблизи воздушного зазора может быть произведен по кривым Буля [1], приведенным на рис. П.17 и П.20 приложения.

Расчет магнитных проводимостей с учетом выпучивания может быть сделан также по формулам Сливинской, полученным путем математической обработки экспериментальных данных, на основании разработанного метода подобия магнитных полюсов [14].

Для обращенных друг к другу цилиндрических полюсов диаметром d (м) упрощенная формула проводимости с учетом выпучивания с торца

$$\Lambda_1 = \mu_0 \left(\frac{\pi d^2}{4\delta} + 0,58d \right), \quad (5.3)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; δ - зазор, м.

Формулы для расчета проводимостей квадратных, конических и цилиндрических полюсов приведены в табл. П.25.

Для броневого электромагнита с внутренним диаметром кожуха D проводимость рабочего зазора b с учетом поля выпучивания с торцов и боковой поверхности цилиндрических полюсов диаметром d определяют по формуле [6]

$$\Lambda_b = \mu_0 \left(\frac{\pi d^2}{4b} + 0,38d + \frac{\pi d}{0,22b + 0,4x} \right); \quad (5.4)$$

здесь $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; $x = (D-d)/\pi - \delta/2$ (считается, что линии потока выпучивания замыкаются по дугам полуокружностей); D, d, δ - в м.

Для рабочего зазора клапанного электромагнита с цилиндрическим полюсом, имеющим полюсный наконечник (шляпку), проводимость с учетом

115

выпучивания с торца и с боковой поверхности шляпки находят по формуле [14]

$$\Lambda_b = \mu_0 \left(\frac{\pi d_{шл}^2}{4b} \chi_1 + 0,36d_{шл} + \frac{\pi d_{шл}}{0,09b/h_{шл} + 0,63} \right); \quad (5.5)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; $\delta, d_{шл}$ и $h_{шл}$ - соответственно зазор, диаметр и толщина шляпки, м; χ_1 - коэффициент, равный

$$\chi_1 = 2n_1 (n_1 - \sqrt{n_1^2 - 1}); \quad (5.6)$$

$$n_1 = 2R_0/d_{шл}; \quad (5.7)$$

где R_0 - расстояние от оси вращения якоря до оси полюса, м.

Для концентрических полюсов, имеющих постоянный зазор δ , толщину a , ширину b и радиус r (м), проводимость (Гн) без учета выпучивания находят, по формуле

$$\Lambda_b = \mu_0 \beta / \delta (a + b) / r; \quad (5.8)$$

здесь $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; β - угол перекрытия, рад, равный

$$\beta = 2 \arcsin (b/2r) - \alpha; \quad (5.9)$$

где α - угол сдвига между осью полюсов и осью якоря.

Удельная магнитная проводимость (на единицу длины в осевом направлении) (Гн/м) для параллельных цилиндров с радиусами r_1, r_2 , оси которых находятся на расстоянии h (м), равна

$$\lambda = \mu_0 \frac{2\pi}{16(a+h)^2 - 1}; \quad (5.10)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; u - коэффициент, равный

$$u = \frac{h^2 - r_1^2 - r_2^2}{2r_1 r_2}; \quad (5.11)$$

Формулы для расчета удельной проводимости между параллельными цилиндрами для других случаев приведены в табл. П.23 (по этим формулам определяют обычно удельную проводимость рассеяния λ_{σ}).

По методу вероятных путей потока Ротерса суммарная магнитная проводимость между двумя параллельными призмами равна

$$\Lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \Lambda_{эл i} \quad (5.12)$$

где $\Lambda_{эл i}$ - проводимость элементарного i -го пути магнитного потока.

Для проводимости между двумя параллельными гранями шириной c и длиной b , лежащими в одной плоскости на расстоянии δ (элементарная геометрическая фигура - полукольцо), при $\delta < 3c$ имеем

$$\Lambda_{эл i} = \mu_0 (\delta/c) \ln(1 + 2c/\delta) \quad (5.13)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; размеры b , c и зазор δ выражаются в метрах.

Формула для определения проводимости при $\delta \geq 3c$, а также формулы для проводимостей между остальными элементами параллельных призм приведены в табл. П.28. При вычислении проводимости между призмой и плоскостью следует учесть, что путями магнитного потока будут полуобъемы от показанных в табл. П.28. Тогда проводимость каждого элементарного пути будет вдвое больше соответствующей проводимости, указанной в

116

табл. П.28 [или в формуле (5.10)]; при этом за длину воздушного зазора принимают удвоенное расстояние от плоскости до торца призмы.

Расчет магнитных проводимостей с торца коаксиального цилиндра на кожух (например, для электромагнитов с незамкнутой магнитной цепью) может быть произведен по формулам² табл. П.29.

Для параллельных граней призмы (с размерами a , b и шириной c), находящихся на расстоянии δ и обращенных в противоположные стороны, расчет ведут по формуле Кремпа и Кольдервуд, полученной методом конформных преобразований:

$$\Lambda = \mu_0 (k^2 + k'^2) \quad (5.14)$$

Здесь $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; k' находят по $n' = a/\delta$, k - по $n = b/\delta$ (в зависимости от коэффициента $m = (\delta + 2c)/\delta$) с помощью рис. П.18.

При плоскопараллельном поле проводимость с учетом выпучивания может быть найдена по построенной графическим путем картине поля. Для этого проводят эквипотенциальные линии и линии индукции, выходящие с поверхности полюса под прямым углом (считая, что полюса не насыщены и их поверхности эквипотенциальны), добиваясь при этом перпендикулярности пересечений вышеуказанных линий, а также равенства средних размеров криволинейных квадратов, заключенных между ними. Используя полученную картину поля, проводимость между полюсами находят по формуле

$$\Delta = \mu_0 h \sum_{l=1}^n m_l / n_l \quad (5.15)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; m_i - число трубок магнитного потока; n_i - число элементов в каждой трубке; h - толщина поля, м. Суммарная магнитная проводимость двух зазоров δ_1 и δ_2 , через которые последовательно проходит магнитный поток, равна

$$\Lambda_{\delta\Sigma} = \Lambda_{\delta_1} \Lambda_{\delta_2} / (\Lambda_{\delta_1} + \Lambda_{\delta_2}), \quad (5.16)$$

где Λ_{δ_1} и Λ_{δ_2} - соответственно проводимости зазоров δ_1 и δ_2 , Гн.

Для двух одинаковых зазоров

$$\Lambda_{\delta\Sigma} = \Lambda_{\delta} / 2. \quad (5.16a)$$

5.1.1. Определить суммарную проводимость рабочих зазоров полюсов, показанных на рис. 5.1, без учета выпучивания. Размеры полюсов: $b = 2 \cdot 10^{-2}$ м, $r = 2 \cdot 10^{-2}$ м, толщина полюса (в направлении, перпендикулярном чертежу) $a = 2 \cdot 10^{-2}$ м; $\delta = 0,06 \cdot 10^{-2}$ м; угол $\alpha = 15^\circ$.

Решение. Определив по (5.9) угол перекрытия $\beta = 2 \arcsin(2 \cdot 10^{-2} / 2 \cdot 2 \cdot 10^{-2}) - 15 = 45^\circ = 0,785$ рад находим согласно (5.8) проводимость одного зазора

$$\Lambda_{\delta} = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 0,785 / \ln [1 + 0,06 \cdot 10^{-2} / (2 \cdot 10^{-2})] = 66,75 \cdot 10^{-8} \text{ Гн.}$$

Суммарная проводимость по (5.16a) $\Lambda_{\delta\Sigma} = \Lambda_{\delta} / 2 = 66,75 \cdot 10^{-8} / 2 \approx 33,4 \cdot 10^{-8}$ Гн.

О т в е т : $\Lambda_{\delta\Sigma} = 33,4 \cdot 10^{-8}$ Гн.

117

5.1.2. Решить предыдущую задачу при $\alpha = 0^\circ$.

О т в е т : $\Lambda_{\delta\Sigma} = 44,5 \cdot 10^{-8}$ Гн.

5.1.3. Определить суммарную проводимость рабочих зазоров и удельную проводимость рассеяния прямоходового электромагнита,

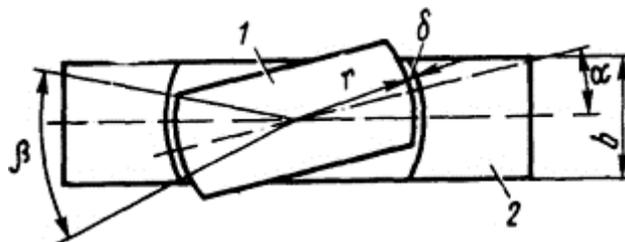


Рис. 5.1. Концентрические полюса: 1 - якорь; 2 - полюсные наконечники

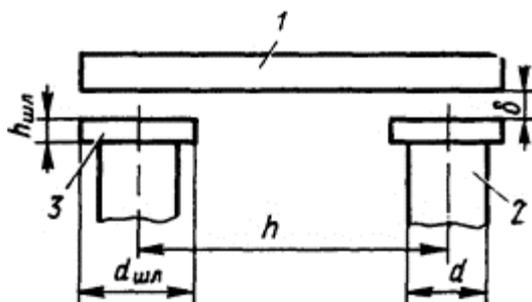


Рис. 5.2. Полюса прямоходового электромагнита с внешним притягивающимся якорем: 1 - якорь; 2 - сердечник; 3 - полюсный наконечник (шляпка)

полюса которого показаны на рис. 5.2, для $\delta=0,1 \cdot 10^{-2}$ м, если $d_{шп}=2,4 \cdot 10^{-2}$ м; $h_{шп}=0,3 \cdot 10^{-2}$ м; $h=3,6 \cdot 10^{-2}$ м; $d=1,6 \cdot 10^{-2}$ м.

Решение. Применяя формулу (5.4) для полюсов подковообразного электромагнита и подставив в нее $d=d_{шп}$ и $x=h_{шп}$, найдем

$$\Lambda_{\delta} = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{\pi (2,4 \cdot 10^{-2})^2}{4 \cdot 0,1 \cdot 10^{-2}} + 0,58 \cdot 2,4 \cdot 10^{-2} + \frac{0,3 \cdot 10^{-2} \cdot 2,4 \cdot 10^{-2}}{0,22 \cdot 0,1 \cdot 10^{-2} + 0,4 \cdot 0,3 \cdot 10^{-2}} \right] = 65 \cdot 10^{-8} \text{ Гн.}$$

Согласно формуле (5.16а) суммарная проводимость $\Lambda_{\delta\Sigma} = 65 \cdot 10^{-8} / 2 = 32,5 \cdot 10^{-8}$ Гн. Удельную проводимость рассеяния определяем по формуле (1) табл. П.23 ($n=h/d=3,6 \cdot 10^2 / 1,6 \cdot 10^{-2} = 2,25$):

О т в е т: $\Lambda_{\delta\Sigma} = 32,5 \cdot 10^{-8}$ Гн; $\lambda_{\sigma} = 2,7 \cdot 10^{-8}$ Гн/м.

5.1.4. Для клапанного электромагнита, имеющего полюсный наконечник (шляпку), рассчитать по формуле (5.5) проводимость рабочего зазора. Найти предварительно по формуле (5.7) значение коэффициента ρ_1 , зависящего от соотношения размеров, а по формуле (5.6) - соответствующее ему значение χ_1 . Рабочий зазор $\delta=0,5 \cdot 10^{-2}$ м. Размеры (рис. 5.3): $d=1 \cdot 10^{-2}$ м; $h_{шп}=0,3 \cdot 10^{-2}$ м; $d_{шп}=1,5 \cdot 10^{-2}$ м; $h=1,5 \cdot 10^{-2}$ м; $a_{яр}=0,5 \cdot 10^{-2}$ м, необходимый для вычисления ρ_1 размер $R_0=h+a_{яр}+0,5d$.

О т в е т: $\tau_1 = 3,33$; $\chi_1 = 1,024$; $\Lambda_{\delta} = 9,7 \cdot 10^{-8}$ Гн.

5.1.5. Для условий предыдущей задачи определить суммарную проводимость воздушных зазоров и удельную проводимость рассеяния магнитной системы при $b_{яр}=1,6 \cdot 10^{-2}$ м.

Решение. Полюса магнитной системы, показанные на рис. 5.3, имеют два изменяющихся зазора δ и δ_e . По заданному значению δ , используя соотношение

$$\frac{\delta_e}{a_{яр}/2} = \frac{\delta}{R_0},$$

находим соответствующее значение

$$\delta_e = \frac{\delta a_{яp}/2}{R_0} = \frac{0,5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,5 \cdot 10^{-2}/2}{2,5 \cdot 10^{-2}} = 0,05 \cdot 10^{-2} \text{ м,}$$

где $R_0 = h - a_{яp} + 0,5d = 1,5 \cdot 10^{-2} + 0,5 \cdot 10^{-2} + 0,5 \cdot 1 \cdot 10^{-2} = 2,5 \cdot 10^{-2}$ м. Проводимость паразитного зазора δ_e определяем по (5.1):

$$\Delta_e = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,8 \cdot 10^{-4} / (0,05 \cdot 10^{-2}) = 20,1 \cdot 10^{-8} \text{ Гн,}$$

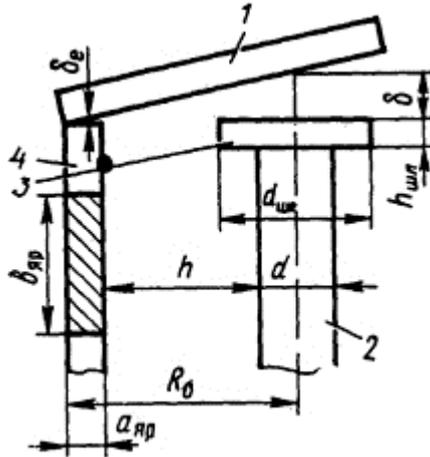


Рис. 5.3. К определению проводимости между тор-дом цилиндра и наклонной плоскостью: 1 - якорь; 2 - сердечник; 3 - полюсный наконечник; 4 - ярмо

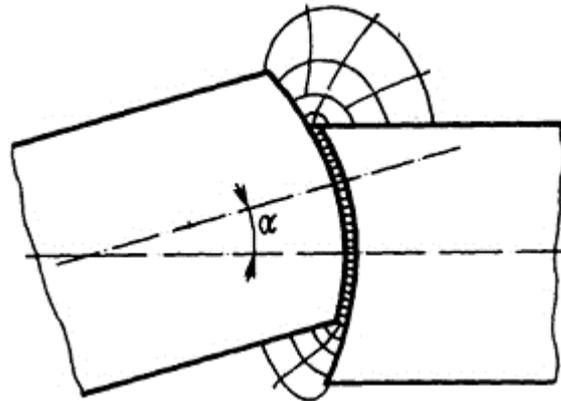


Рис. 5.4. Картина поля в зазоре концентрических полюсов

Суммарная проводимость согласно (5.16)

$$\Delta_{\Sigma} = \frac{9,7 \cdot 10^{-8} \cdot 20,1 \cdot 10^{-8}}{9,7 \cdot 10^{-8} + 20,1 \cdot 10^{-8}} = 6,54 \cdot 10^{-8} \text{ Гн.}$$

Проводимость рассеяния определяем по формуле (2) табл. П.23. С учетом отношения $b_{яp}/h = 1,6 \cdot 10^{-2} / (1,5 \cdot 10^{-2}) = 1,07 < 1,25$, принимаем $k_a = 0,8$; тогда

$$\lambda_{\sigma} = 0,8 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{2\pi}{\ln(2 \cdot 1,5 + \sqrt{4 \cdot 1,5^2 - 1})} = 3,58 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м,}$$

5.1.6. Решить задачи 5.1.4 и 5.1.5 при $\delta = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м и $h = 2 \cdot 10^{-2}$ м.

5.1.7. Используя метод графического построения картины поля, определить проводимость рабочих зазоров электромагнита с внешним поперечно-движущимся якорем по данным, приведенным

в задаче 5.1.1, с учетом полей выпучивания. Сопоставить результат с ответом задачи 5.1.1.

Решение. По заданным размерам с учетом масштаба вычерчиваем эскиз полюсов (рис. 5.4) и, выполняя указанные в теории рекомендации, проводим линии потока и эквипотенциальные линии. Исходя из рис. 5.4 $m_1=26$ (число трубок с одним элементом), $m_2=6$ (число трубок с двумя элементами) и $m_3=2$ (число трубок с четырьмя элементами). Учитывая, что $h=a=2 \cdot 10^{-2}$ м, находим по формуле (5.15): $\Lambda_\delta = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^{-2} (26/1 + 6/2 + 2/4) = 74,13 \cdot 10^{-8}$ Гн. Суммарная проводимость рабочих зазоров согласно (5.16а) $\Lambda_{\delta\Sigma} = \Lambda_\delta / 2 = 74,13 \cdot 10^{-8} / 2 \approx 37,07 \cdot 10^{-8}$ Гн. Таким образом, с учетом выпучивания проводимость получается на 11% больше, чем без учета выпучивания ($\Lambda_{\delta\Sigma} = 33,4 \cdot 10^{-8}$ Гн найдено в задаче 5.1.1).

Ответ: $\Lambda_{\delta\Sigma} = 37,07 \cdot 10^{-8}$ Гн, что на 11% больше значения проводимости без учета выпучивания (полученного в задаче 5.1.1).

5.1.8. Решить задачу 5.1.7 при $\alpha=20^\circ, 10^\circ, 5^\circ$.

5.1.9. Для магнитной системы с втягивающимся якорем (рис. 5.5), имеющим плоский торец, определить проводимость рабочего зазора δ с учетом поля выпучивания (Λ_δ) и без учета поля выпучивания (Λ_δ') при $\delta=0,4 \cdot 10^{-2}$ м, а также удельную проводимость

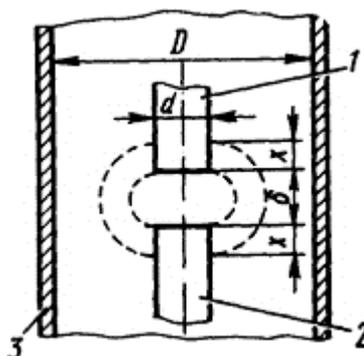


Рис. 5.5. К определению проводимости с учетом выпучивания с боковых поверхностей цилиндрических полюсов: 1 - якорь; 2 - стоп; 3 - корпус

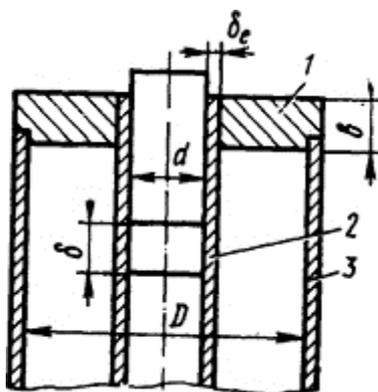


Рис. 5.6. Эскиз к определению проводимости паразитного зазора δ_c : 1 - верхний фланец; 2 - немагнитная направляющая втулка; 3 - корпус

рассеяния λ_{σ} . Найдя при заданных размерах отношение d/δ , выяснить, какой процент составляет проводимость выпучивания от величины полной проводимости. Размеры: $D=8 \cdot 10^{-2}$ м; $d=3,3 \cdot 10^{-2}$ м.

Решение. Без учета выпучивания согласно (5.1) $\Lambda_{\delta}'=4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \pi(3,3 \cdot 10^{-2})^2/(4 \cdot 0,4 \cdot 10^{-2})=26,9 \cdot 10^{-8}$ Гн. С учетом поля выпучивания с торцевой и боковой поверхности согласно (5.4)

$$\Lambda_{\delta} = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{\pi (3,3 \cdot 10^{-2})^2}{4 \cdot 0,4 \cdot 10^{-2}} + 0,58 \cdot 3,3 \cdot 10^{-2} + \frac{1,3 \cdot 10^{-2} \cdot 3,3 \cdot 10^{-2}}{0,22 \cdot 0,4 \cdot 10^{-2} + 0,4 \cdot 1,3 \cdot 10^{-2}} \right] = 38,1 \cdot 10^{-8} \text{ Гн,}$$

120

где

$$x = \frac{8 \cdot 10^{-2} - 3,3 \cdot 10^{-2}}{\pi} - \frac{0,4 \cdot 10^{-2}}{2} = 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Проводимость поля выпучивания Λ_{ν} определяется суммой двух последних слагаемых, стоящих в скобках, и равна $11,27 \cdot 10^{-8}$ Гн, что в данном случае при $d/\delta = 3,3 \cdot 10^{-2}/(0,4 \cdot 10^{-2})=8,25$ составляет 29,5% полной проводимости. Считая поле рассеяния вдоль оси электромагнита плоскопараллельным, определим λ по формуле (3) табл. П.23:

$$\lambda_{\sigma} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{2\pi}{\ln(8 \cdot 10^{-2}/3,3 \cdot 10^{-2})} = 9 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м.}$$

Ответ: $\Lambda_{\delta}'=26,9 \cdot 10^{-8}$ Гн; $\Lambda_{\delta}=38,1 \cdot 10^{-8}$ Гн; $\Lambda_{\nu}=29,5\%$ от Λ_{δ} ; $\lambda_{\sigma} = 9 \cdot 10^{-6}$ Гн/м.

О т в е т: $\Lambda_{\delta}'=26,9 \cdot 10^{-8}$ Гн; $\Lambda_{\delta} = 38,1 \cdot 10^{-8}$ Гн; $\Lambda_{\nu}=29,5\%$ от Λ_{δ} ; $\lambda_{\sigma} = 9 \cdot 10^{-6}$ Гн/м.

5.1.10. Для условий задачи 5.1.9 определить проводимость воздушного зазора Λ_{δ} по приближенной формуле (5.3) и сопоставить полученное значение с ответом задачи 5.1.9.

5.1.11. Найти суммарную проводимость магнитной системы, рассмотренной в задаче 5.1.9, с учетом паразитного зазора δ_e (рис. 5.6) при $\delta_e=0,15 \cdot 10^{-2}$ м и $b = 1,1 \cdot 10^{-1}$ м.

Решение. Проводимость паразитного зазора, площадь которого $S = \pi(d+\delta_e)b$, находим по формуле (5.1): $\Lambda_e = 4\pi 10^{-7} \cdot \pi(3,3 \cdot 10^{-2}+0,15 \cdot 10^{-2}) \cdot 1,1 \cdot 10^{-2}/(0,15 \cdot 10^{-2}) = 100 \mu 1 \cdot 10^{-8}$ Гн. Суммарную проводимость двух зазоров δ и δ_e определяем по (5.16):

$$\Lambda_{\Sigma} = \frac{38,1 \cdot 10^{-8} \cdot 100 \cdot 10^{-8}}{38,1 \cdot 10^{-8} + 100 \cdot 10^{-8}} = 27,6 \cdot 10^{-8} \text{ Гн,}$$

где проводимость рабочего зазора $\Lambda_{\delta}=38,1 \cdot 10^{-8}$ Гн (см. задачу 5.1.9).

О т в е т: $\Lambda_{\Sigma}=27,6 \cdot 10^{-8}$ Гн.

5.1.12. Решить задачу 5.1.11 при значениях рабочего зазора $\delta_1 = 1 \cdot 10^{-2}$ м и $\delta_2 = 0,1 \cdot 10^{-2}$ м, определив Λ_{δ_1} по формуле (5.4) и приняв $\Lambda_{\delta_2} = 120 \cdot 10^{-8}$ Гн.

О т в е т : $\Lambda_{\Sigma 1} = 16,53 \cdot 10^{-8}$ Гн; $\Lambda_{\Sigma 2} = 54,55 \cdot 10^{-8}$ Гн.

5.1.13. Для магнитной системы с втягивающимся якорем, имеющим конический торец (рис. 5.7, а) с углом при вершине конуса $2\alpha_1 = 60^\circ$, найти проводимость воздушного зазора при значении $\delta = 0,4 \cdot 10^{-2}$ м и диаметре $d = 3,3 \cdot 10^{-2}$ м. Как изменится проводимость, если угол

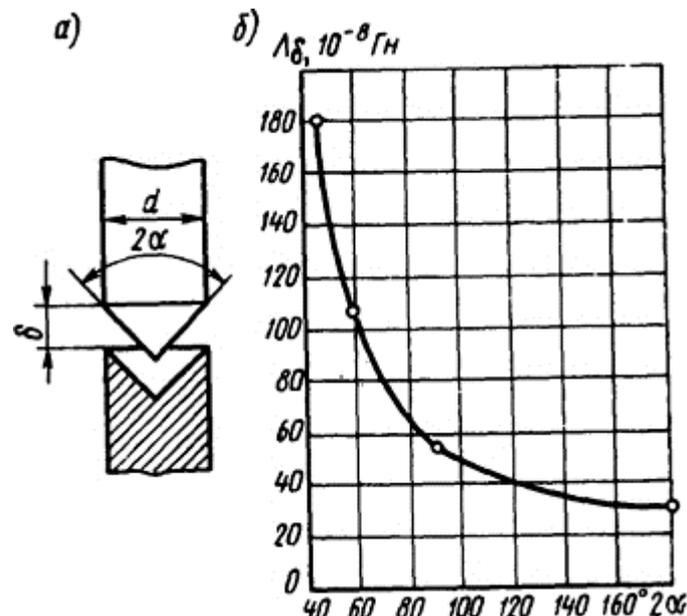


Рис. 5.7. Эскиз к расчету проводимости между полюсами с конической формой якоря и стопа: а - эскиз полюсов; б - зависимость $\Lambda_{\delta} = f(2\alpha)$

121

при вершине будет $2\alpha_2 = 180^\circ$ (полюс с плоским стопом)? Для сравнения проводимость в случае плоского стопа рассчитать по формуле (5.3).

Р е ш е н и е . По формуле (3) табл. П.25 определим при $2\alpha_1 = 60^\circ$ проводимость

$$\Lambda_{\delta_1} = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{\pi (3,3 \cdot 10^{-2})^2}{4 \cdot 0,4 \cdot 10^{-2} \sin^2 30^\circ} + 0,75 \cdot 3,3 \cdot 10^{-2} - \frac{0,157 \cdot 3,3 \cdot 10^{-2}}{\sin^2 30^\circ} \right] = 108 \cdot 10^{-8} \text{ Гн}$$

и при $2\alpha_2 = 180^\circ$ проводимость

$$\Lambda_{\delta_2} = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{\pi (3,3 \cdot 10^{-2})^2}{4 \cdot 0,4 \cdot 10^{-2} \cdot \sin^2 90^\circ} + 0,75 \cdot 3,3 \cdot 10^{-2} - \frac{0,157 \cdot 3,3 \cdot 10^{-2}}{\sin^2 90^\circ} \right] = 29,32 \cdot 10^{-8} \text{ Гн.}$$

По формуле (5.3)

$$\Lambda'_{\delta_2} = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{\pi (3,3 \cdot 10^{-2})^2}{4 \cdot 0,4 \cdot 10^{-2}} + 0,58 \cdot 3,3 \cdot 10^{-2} \right] = 29,3 \cdot 10^{-8} \text{ Гн,}$$

т.е. результаты расчета практически совпадают. Отношение $\Lambda_{\delta 1} / \Lambda_{\delta 2} = 108 \cdot 10^{-8} / (29,32 \cdot 10^{-8}) = 3,68$.

О т в е т : $\Lambda_{\delta 1} = 108 \cdot 10^{-8}$ Гн; при $2\alpha_2 = 180^\circ$ проводимость уменьшится в 3,68 раза.

5.1.14. Определить проводимость Лез и Лв4 воздушного зазора магнитной системы, рассмотренной в задаче 5.1.13, если угол при вершине конуса $2\alpha = 90^\circ, 45^\circ$. Построить зависимость $\Lambda_\delta = f(2\alpha)$, используя решения задач 5.1.13 и 5.1.14.

О т в е т : $\Lambda_{\delta 3} = 55,5 \cdot 10^{-8}$ Гн; $\Lambda_{\delta 4} = 182,1 \cdot 10^{-8}$ Гн. График зависимости $\Lambda_\delta = f(2\alpha)$ приведен на рис. 5.7, б.

5.1.15. Определить удельную проводимость рассеяния между полюсами призматической формы квадратного сечения со стороной $b = 14 \cdot 10^{-3}$ м, расстояние между которыми $H = 19 \cdot 10^{-3}$ м.

Р е ш е н и е . Искомую проводимость λ_σ находят по методу Ротерса (согласно уравнению 5.12) как сумму элементарных проводимостей, показанных на рис. 5.8. Удельные проводимости λ^I и λ^{II} определяются путем приведения полных проводимостей к единице длины полюса. Подставив в (5.1) $\delta = H$, $\Lambda = \lambda^I l$ и $S = bl$, где l - длина полюса, найдем $\lambda^I = \mu_0 b / H = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 14 \cdot 10^{-3} / (19 \cdot 10^{-3}) = 0,926 \cdot 10^{-6}$ Гн/м. Проводимость λ^{II} определим, преобразуя аналогично формулу (1) табл. П.28: $\lambda^{II} = \mu_0 \cdot 0,26 = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,26 = 0,327 \cdot 10^{-6}$ Гн/м. Проводимость λ^{III} находим, используя формулу (5.13), так как $H < 3b$; $\lambda^{III} = (4\pi \cdot 10^{-7} / \pi) \cdot \ln(1 + 2 \cdot 14 \cdot 10^{-3} / 19 \cdot 10^{-3}) = 0,362 \cdot 10^{-6}$ Гн/м. Тогда $\Lambda_\sigma = \lambda^I + 2\lambda^{II} + 2\lambda^{III} = 0,926 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 0,327 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 0,362 \cdot 10^{-6} = 2,3 \cdot 10^{-6}$ Гн/м

О т в е т : $\lambda_\sigma = 2,3 \cdot 10^{-6}$ Гн/м.

5.1.16. Определить удельную проводимость рассеяния между полюсами призматической формы прямоугольного сечения, обращенными друг к другу широкой стороной, расстояние между которыми $H = 20 \cdot 10^{-3}$ м. Ширина узкой стороны $a = 12 \cdot 10^{-3}$ м, широкой - $b = 20 \cdot 10^{-3}$ м.

О т в е т : $\lambda_\sigma = 2,54 \cdot 10^{-6}$ Гн/м.

122

5.1.17. Решить задачу 5.1.16 при $H = 40 \cdot 10^{-3}$ м.

5.1.18. Найти суммарную проводимость рабочего зазора $\delta = 12 \cdot 10^{-3}$ м, образованного полюсами призматической формы квадратного сечения со стороной $\delta = 14 \cdot 10^{-3}$ м (рис. 5.9). В нижнем полюсе имеется паз шириной $\Delta = 2 \cdot 10^{-3}$ м.

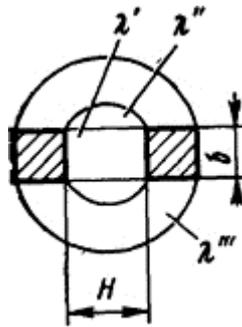


Рис. 5.8. Эскиз к определению проводимости между параллельными полюсами призматической формы

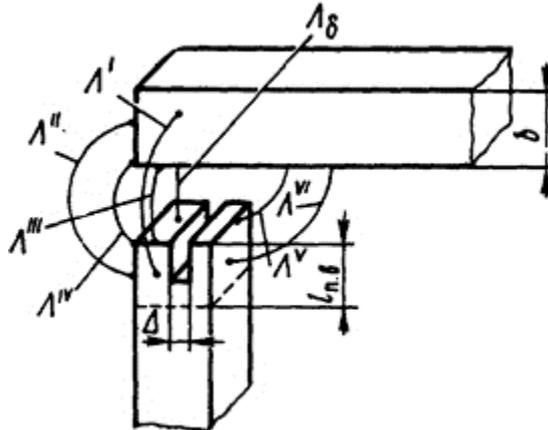


Рис. 5.9. Эскиз к определению проводимости между перпендикулярно расположенными призматическими полюсами

Решение. Выделим элементарные пути потока (см. рис. 5.9) и примем, что эффективная длина потока выпучивания на нижнем полюсе равна $l_{п.в} = b = 14 \cdot 10^{-3}$ м. Проводимость Λ_{δ} , учитывая, что $S = b^2 - b\Delta$, находим по (5.1):

$$\Lambda_{\delta} = 4\pi \cdot 10^{-7} [(14 \cdot 10^{-3})^2 - 14 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-3}] / (12 \cdot 10^{-3}) = 1,76 \cdot 10^{-8} \text{ Гн},$$

проводимость Λ^I - по (5.13), так как ($\delta < 3b$):

$$\Lambda^I = 4\pi \cdot 10^{-7} (14 \cdot 10^{-3} / \pi) \cdot \ln [1 + 2 \cdot 14 \cdot 10^{-3} / (12 \cdot 10^{-3})] = 0,674 \cdot 10^{-8} \text{ Гн}.$$

Проводимости Λ^{II} , Λ^{III} и Λ^{IV} определим по формулам (4), (1) и (3) табл. П.28; проводимость Λ^V и Λ^{VI} - по формулам (1) и (2) табл. П.28, увеличивая вдвое их правые части. После подстановок получим $\Lambda^{II} = 0,44 \cdot 10^{-8}$ Гн; $\Lambda^{III} = 0,457 \cdot 10^{-8}$ Гн; $\Lambda^{IV} = 0,116 \cdot 10^{-8}$ Гн; $\Lambda^V = 0,915 \cdot 10^{-8}$ Гн; $\Lambda^{VI} = 1,21 \cdot 10^{-8}$ Гн. Суммарная проводимость согласно (5.12) $\Lambda_{\delta\Sigma} = \Lambda_{\delta} + 3\Lambda^I + 2\Lambda^{II} + 3\Lambda^{III} + 2\Lambda^{IV} + \Lambda^V + \Lambda^{VI} = 1,76 \cdot 10^{-8} + 3 \cdot 0,674 \cdot 10^{-8} + 2 \cdot 0,44 \cdot 10^{-8} + 4 \cdot 3 \cdot 0,457 \cdot 10^{-8} + 2 \cdot 0,116 \cdot 10^{-8} + 0,915 \cdot 10^{-8} + 1,21 \cdot 10^{-8} = 8,39 \cdot 10^{-8}$ Гн.

О т в е т : $\Lambda_{\delta\Sigma} = 8,39 \cdot 10^{-8}$ Гн.

5.1.19. Решить задачу 5.1.18 при $\delta = 10 \cdot 10^{-3}$; $8 \cdot 10^{-3}$; $6 \cdot 10^{-3}$; $4 \cdot 10^{-3}$; $2 \cdot 10^{-3}$ м,

О т в е т : $\Lambda_{\delta\Sigma} = 9,02 \cdot 10^{-3}$; $9,92 \cdot 10^{-3}$; $11,28 \cdot 10^{-3}$; $13,76 \cdot 10^{-3}$; $20,28 \cdot 10^{-3}$ Гн.

5.1.20. Для магнитной системы П-образного электромагнита переменного тока (рис. 5.10) найти проводимости торцов Δ_{T1} незранированной (a_1) и Δ_{T2} экранированной (a_2) частей полюса при значении зазора по оси полюса $\delta=5 \cdot 10^{-3}$ м. Средние значения соответствующих зазоров δ_1 и δ_2 определить через плечи по

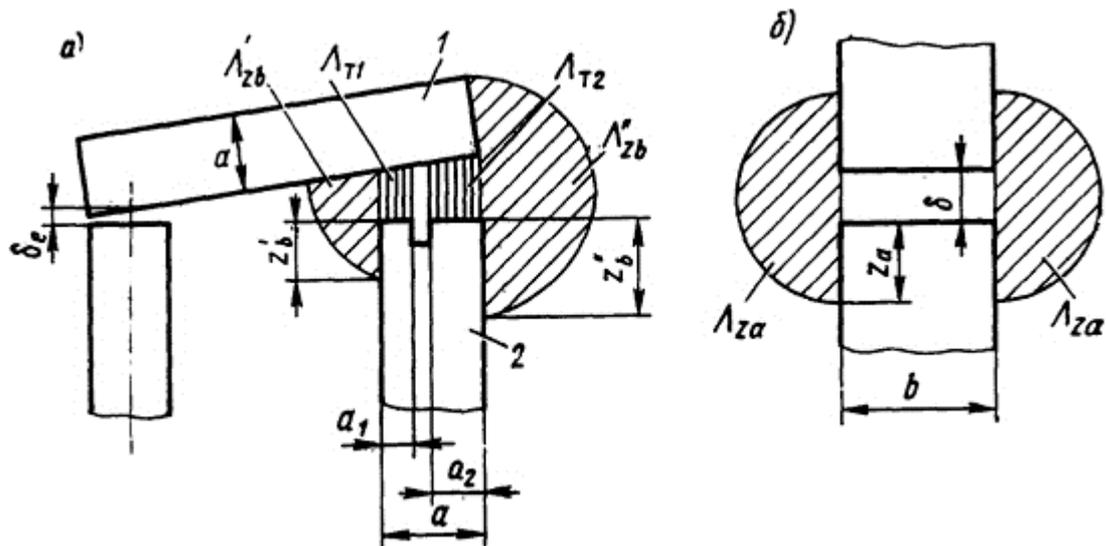


Рис. 5.10. Эскиз к расчету проводимости воздушных зазоров в электромагнитные переменного тока клапанного типа:

a - проводимости, Λ_{T1} , Λ_{T2} , Λ'_{zb} и Λ''_{zb} ; b - проводимости Λ_{za} ; 1 - якорь; 2 - сердечник

аналогии с решением задачи 5.1.5. Размеры $a_1=3 \cdot 10^{-3}$ м; $a_2=7 \cdot 10^{-3}$ м; $a=12 \cdot 10^{-3}$ м; $b=20 \cdot 10^{-3}$ м.

О т в е т : $\Lambda_{T1}=1,71 \cdot 10^{-8}$ Гн; $\Lambda_{T2}=3,3 \cdot 10^{-8}$ Гн.

5.1.21. Используя данные задачи 5.1.20, для магнитной системы рис. 5.10 определить полную проводимость рабочего зазора при $\delta=5 \cdot 10^{-3}$ м.

Решение. Основные составляющие магнитной проводимости показаны на рис. 5.10. При расчете проводимостей выпучивания воспользуемся кривыми Буля, приведенными на рис. П.20 [I]. С учетом наклонного положения якоря примем координаты $z_a=z_b''=5 \cdot 10^{-3}$ м; $z_b=10 \cdot 10^{-3}$ м. Влиянием паза в сердечнике на поля выпучивания пренебрегаем. Найдя отношения $b/(\delta/2) = 20 \cdot 10^{-3}/(2,5 \cdot 10^{-3}) = 8$ и $z_a/(\delta/2) = 5 \cdot 10^{-3}/(2,5 \cdot 10^{-3}) = 2$, по кривым рис. П.20, a, b определяем $\lambda_{pa}=0,29$; $\lambda_{za}=1,0$. Тогда $\Lambda_{za} = \mu_0 a (\lambda_{pa} + \lambda_{za}) / 2 = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 12 \cdot 10^{-3} (0,29 + 1) / 2 = 0,972 \cdot 10^{-8}$ Гн. Аналогично по отношениям $a/\delta = 12 \cdot 10^{-3} / 5 \cdot 10^{-3} = 2,4$ и $z_b'/\delta = 5 \cdot 10^{-3} / 5 \cdot 10^{-3} = 1$ находим коэффициенты $\lambda'_{pb}=0,35$ и $\lambda'_{zb}=0,9$ и проводимость $\Lambda'_{zb} = \mu_0 b (\lambda'_{pb} + \lambda'_{zb}) = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 20 \cdot 10^{-3} (0,35 + 0,9) = 3,14 \cdot 10^{-8}$ Гн, а по отношениям $a/(\delta/2) = 12 \cdot 10^{-3} / (2,5 \cdot 10^{-3}) = 4,8$ и $z_b''/(\delta/2) = 10 \cdot 10^{-3} / (2,5 \cdot 10^{-3}) = 4$ — коэффициенты $\lambda''_{pb} = 0,31$ и $\lambda''_{zb} = 1,7$ и проводимость.

$$\Lambda''_{zb} = \mu_0 b (\lambda''_{pb} + \lambda''_{zb}) / 2 = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 20 \cdot 10^{-3} (0,31 + 1,7) / 2 = 2,52 \cdot 10^{-8} \text{ Гн.}$$

В соответствии с (5.12) полная проводимость $\Lambda_3 = \Lambda_{T1} + \Lambda_{T2} + 2\Lambda_{za} + \Lambda'_{zb} + \Lambda''_{zb} = 1,71 \cdot 10^{-8} + 3,3 \cdot 10^{-8} + 2 \cdot 0,972 \cdot 10^{-8} + 3,14 \cdot 10^{-8} + 2,52 \cdot 10^{-8} = 12,61 \cdot 10^{-8}$ Гн, где значения Λ_{T1} и Λ_{T2} взяты из решения задачи 5.1.20.

О т в е т : $\Lambda_3 = 12,61 \cdot 10^{-8}$ Гн.

5.1.22. Решить предыдущую задачу при $\delta=2,5 \cdot 10^{-3}$ и $1,5 \cdot 10^{-3}$ м.

О т в е т : $\Lambda_{\delta} = 18,72 \cdot 10^{-8}$ и $26,42 \cdot 10^{-8}$ Гн.

5.1.23. Для магнитной системы, рассмотренной в задаче 5.1.20, определить проводимости рабочих (δ_1 и δ_2) и паразитного (δ_e) зазоров при $\delta_1 = \delta_2 = \delta_{\text{кон}} = 0,05 \cdot 10^{-3}$ м; $\delta_e = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м,

О т в е т : $\Lambda_{\delta_1} = 1,51 \cdot 10^{-6}$ Гн; $\Lambda_{\delta_2} = 3,52 \cdot 10^{-6}$ Гн; $\Lambda_e = 1,51 \cdot 10^{-6}$ Гн.

5.1.24. Для магнитной системы с двумя сердечниками и цилиндрическим постоянным магнитом (рис. 5.11), имеющим полюсный наконечник шириной $a_e = d_{\text{нос}}$ и толщиной b_e (в направлении, перпендикулярном чертежу), найти проводимость паразитного зазора δ_e между якорем и полюсным наконечником магнита. Размеры магнитной системы: $\delta_e = 4 \cdot 10^{-4}$ м; $d_{\text{шп}} = 1,1 \cdot 10^{-2}$ м; $d_c = 0,5 \cdot 10^{-2}$ м; $l_{\text{ц}} = 3 \cdot 10^{-2}$ м; $a_e = d_{\text{нос}} = 1 \cdot 10^{-2}$ м; $b_e = 1,2 \cdot 10^{-2}$ м; $\gamma_e = 100^\circ$.

Р е ш е н и е . Площадь зазора δ_e цилиндрической формы равна

$$S_e = b_e l_e = b_e \frac{\pi a_e \gamma_e}{\sin(\gamma_e/2) 360} = \frac{1,2 \cdot 10^{-2} \cdot \pi \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot 100}{\sin(100/2) \cdot 360} = 1,37 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

где длина дуги $l_e = 2\pi r_e \gamma_e / 360$; радиус окружности $r_e = a_e / 2 \sin(\gamma_e/2)$.

Проводимость зазора δ_e в соответствии с (5.1) $\Lambda_e = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,37 \cdot 10^{-4} / (4 \cdot 10^{-4}) = 43 \cdot 10^{-8}$ Гн.

О т в е т : $\Lambda_e = 43 \cdot 10^{-8}$ Гн.

5.1.25. Для магнитной системы предыдущей задачи определить проводимости Λ_1 и Λ_2 зазоров δ_1 и δ_2 при $\delta_1 = 1,5 \cdot 10^{-4}$ м и $\delta_2 = 18 \cdot 10^{-4}$ м.

О т в е т : $\Lambda_1 = 79,5 \cdot 10^{-8}$ Гн; $\Lambda_2 = 6,6 \cdot 10^{-8}$ Гн.

5.1.26. Решить задачу 5.1.24 при $a_e = 0,8 \cdot 10^{-2}$ м; $b_e = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м; $\gamma_e = 80^\circ$.

5.1.27. Определить удельные проводимости рассеяния между полюсным наконечником магнита и шляпкой сердечника ($\lambda_{\text{шп}}$) и между постоянным магнитом и сердечником ($\lambda_{\text{сп}}$) для магнитной системы рис. 5.11, размеры которой даны в задаче 5.1.24.

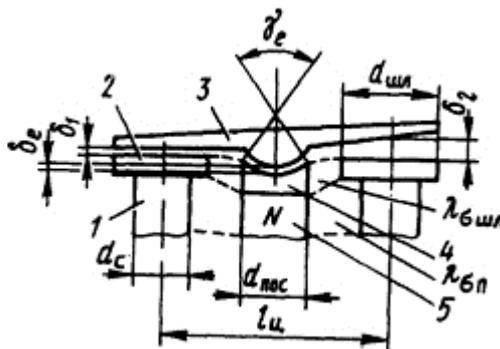


Рис. 5.11. Эскиз к расчету проводимостей воздушных зазоров в магнитной системе с постоянным

магнитом: 1-сердечник; 2- шляпка сердечника; 3 - якорь; 4 - полюсный наконечник постоянного магнита; 5-постоянный магнит

Решение. Удельную проводимость $\lambda_{\sigma_{\text{шл}}}$ находим по табл. П.23. В данном случае $h=l_{\text{ц}}/2-a_e/2 = 3 \cdot 10^{-2}/2 - 1 \cdot 10^{-2}/2 = 1 \cdot 10^{-2}$ м; $2r=a_{\text{шл}}=1,1 \cdot 10^{-2}$ м. При этом коэффициент $n=h/(2r) = 1 \cdot 10^{-2}/(1,1 \cdot 10^{-2})=0,91$, а проводимость λ_2 по формуле (2) табл. П.23 равна

$$\lambda_2 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{2\pi}{\ln(2 \cdot 0,91 + \sqrt{4 \cdot 0,91^2 - 1})} = 6,55 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м.}$$

125

Так как $b_e=1,2h$, то, пользуясь приближенно табл. П.23 для случая $a=1,25$, получим $\lambda_{\sigma^{\text{шл}}} = k_a \lambda_2 = 0,85 \cdot 6,55 \cdot 10^{-6} = 5,57 \cdot 10^{-6}$ Гн/м. Удельную проводимость $\lambda_{\sigma^{\text{п}}}$ находим по (5.10) и (5.11). В данном случае $h=0,5l_{\text{ц}} = 0,5 \cdot 3 \cdot 10^{-2} = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м, $r_1 = 0,5d_{\text{пос}} = 0,5 \cdot 1 \cdot 10^{-2} = 0,5 \cdot 10^{-2}$ м; $r_2=0,5d_e=0,5 \cdot 0,5 \cdot 10^{-2} = 0,25 \cdot 10^{-2}$ м; следовательно,

$$u = \frac{(1,5 \cdot 10^{-2})^2 - (0,5 \cdot 10^{-2})^2 - (0,25 \cdot 10^{-2})^2}{2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 0,25 \cdot 10^{-2}} = 7,75,$$

$$\lambda_{\sigma^{\text{п}}} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{2\pi}{\ln(7,75 + \sqrt{7,75^2 - 1})} = 2,88 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м.}$$

Так как постоянный магнит расположен между двумя цилиндрами (сердечниками) и сторона магнита, обращенная ко второму сердечнику, не участвует в рассеянии потока на первый сердечник, следует ввести поправочный коэффициент $k_2=0,6 \dots 0,1$. Тогда $\lambda_{\sigma^{\text{п}}} = k_2 \lambda = 0,75 \cdot 2,88 \cdot 10^{-6} = 2,16 \cdot 10^{-6}$ Гн/м, где $k_2=0,75$.

О т в е т : $\lambda_{\sigma^{\text{шл}}}=5,57 \cdot 10^{-6}$ Гн/м; $\lambda_{\sigma^{\text{п}}}= 2,16 \cdot 10^{-6}$ Гн/м.

5.1.28. Для магнитной системы с тремя цилиндрическими постоянными магнитами, основные элементы которой показаны на

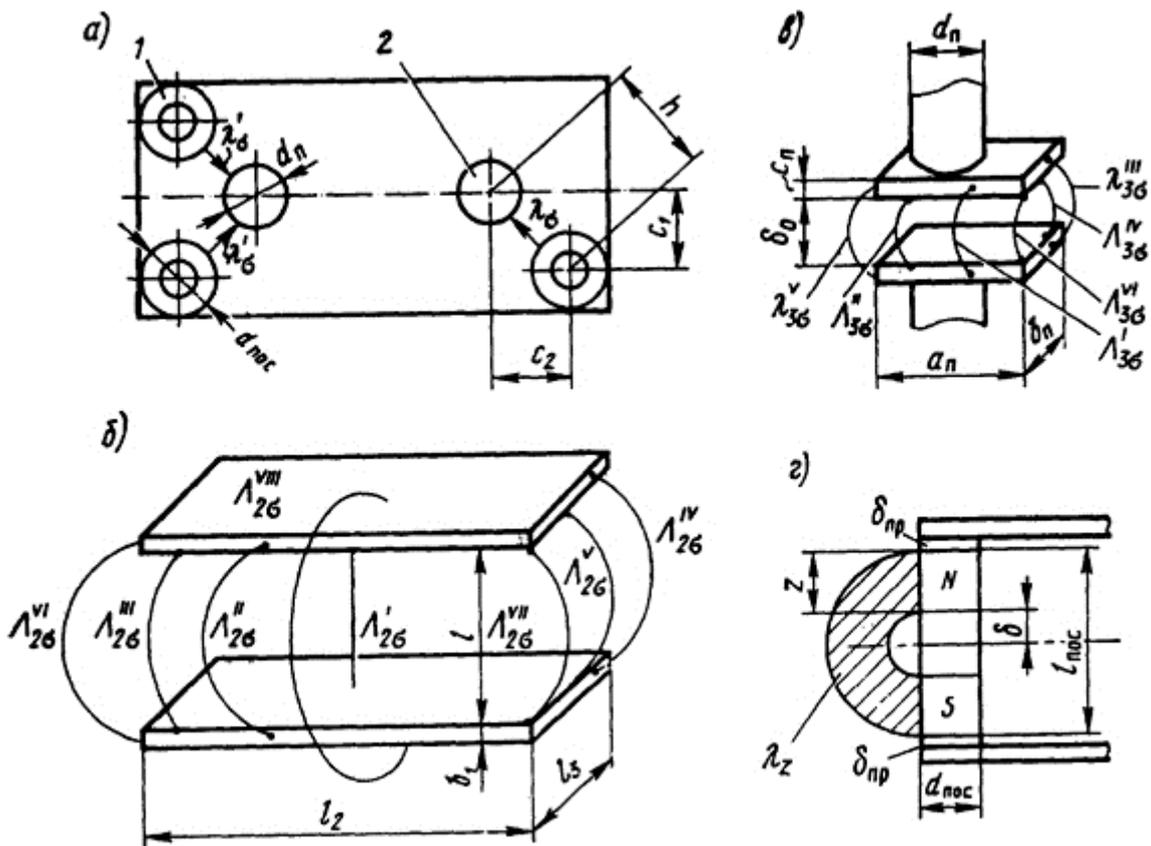


Рис. 5.12. Эскизы к расчету проводимостей воздушных промежутков в магнитной системе с тремя постоянными магнитами: а - между полюсами постоянными магнитами (1) и полюсами (2); б - между верхней и нижней плитами; в - между полюсными наконечниками; г - между полюсами магнита и в зазорах между магнитом и плитами

рис. 5.12, найти удельную проводимость рассеяния между полюсом и магнитом в правой (λ_{σ}) и левой (λ_{σ}') частях системы (рис. 5.12, а), внося во втором случае из-за наличия рядом с полюсом

126

двух постоянных магнитов поправку с помощью коэффициента, равного 0,75. Геометрические размеры: $d_{noc} = 1 \cdot 10^{-2}$ м; $d_n = 0,7 \cdot 10^{-2}$ м; $c_1 = 0,83 \cdot 10^{-2}$ м; $c_2 = 0,6 \cdot 10^{-2}$ м.

О т в е т : $\lambda_{\sigma} = 6,28 \cdot 10^{-6}$ Гн/м; $\lambda_{\sigma}' = 4,71 \cdot 10^{-6}$ Гн/м.

5.1.29. Пользуясь методом Ротерса, выделить составляющие проводимости между верхней и нижней пластинами магнитной системы, показанными на рис. 5.12, б, и получить по (5.12) выражение для полной проводимости $\Lambda_{2\sigma}$.

О т в е т : составляющие проводимости показаны на рис. 5.12, б;

$$\Lambda_{2\sigma} = \Lambda_{2\sigma}^I + 2\Lambda_{2\sigma}^{II} + 2\Lambda_{2\sigma}^{III} + 2\Lambda_{2\sigma}^{IV} + 2\Lambda_{2\sigma}^V + 4\Lambda_{2\sigma}^{VI} + 4\Lambda_{2\sigma}^{VII} + \Lambda_{2\sigma}^{VIII}.$$

5.1.30. Определить проводимость $\Lambda_{2\sigma}^{VIII}$ между противоположными сторонами пластин, показанных на рис. 5.12, б. Размеры: $l_2 = 6,4 \cdot 10^{-2}$ м; $l_3 = 3 \cdot 10^{-2}$ м; $l = 2,9 \cdot 10^{-2}$ м; $b_1 = 0,3 \cdot 10^{-2}$.

Решение. Проводимость $\Lambda_{2\sigma}^{\text{VIII}}$ можно найти по формуле (5.14), где λ^{I} и λ^{II} определяются по кривым рис. П.18 (в зависимости от коэффициентов m и n). В нашем случае $m=(l+2b_1)/l=(2,9 \cdot 10^{-2}+2 \cdot 0,3 \cdot 10^{-2})/(2,9 \cdot 10^{-2})=1,2$; $n'=l_2/l=6,4 \cdot 10^{-2}/(2,9 \cdot 10^{-2})=2,21$; $n''=l_3/l=3 \cdot 10^{-2}/(2,9 \cdot 10^{-2})=1,03$. Приблизительно при $m=1,5$ по графику находим $\lambda^{\text{I}}=0,23$ и $\lambda^{\text{II}}=0,16$. Тогда $\Lambda_{2\sigma}^{\text{VIII}}=4\pi \cdot 10^{-7}(0,23 \cdot 3 \cdot 10^{-2}+0,16 \cdot 6,4 \cdot 10^{-2})=2,2 \cdot 10^{-8}$ Гн.

О т в е т : $\Lambda_{2\sigma}^{\text{VIII}}=2,2 \cdot 10^{-8}$ Гн.

5.1.31. Учитывая решение задачи 5.1.30, найти остальные составляющие проводимости между пластинами рис. 5.12, б и суммарную проводимость $\Lambda_{2\sigma}$, воспользовавшись выражением, полученным в ответе задачи 5.1.29. Учесть, что между пластинами расположен якорь шириной $b_{\text{я}}=0,7 \cdot 10^{-2}$ м и длиной $l_{\text{я}}=5,6 \cdot 10^{-2}$ м (на рис. 5.12, б не показан), плоскость которого параллельна плоскостям обеих пластин (см. рис. 5.38). Остальные размеры те же, что в задаче 5.1.30.

О т в е т : $\Lambda_{2\sigma}^{\text{I}}=6,6 \cdot 10^{-8}$ Гн; $\Lambda_{2\sigma}^{\text{II}}=0,48 \cdot 10^{-8}$ Гн; $\Lambda_{2\sigma}^{\text{III}}=2,09 \cdot 10^{-8}$ Гн; $\Lambda_{2\sigma}^{\text{IV}}=0,226 \cdot 10^{-8}$ Гн; $\Lambda_{2\sigma}^{\text{V}}=0,98 \cdot 10^{-8}$ Гн; $\Lambda_{2\sigma}^{\text{VI}}=0,094 \cdot 10^{-8}$ Гн; $\Lambda_{2\sigma}^{\text{VII}}=0,281 \cdot 10^{-8}$ Гн; $\Lambda_{2\sigma}=18 \cdot 10^{-8}$ Гн.

5.1.32. Решить предыдущую задачу, взяв размеры из задачи 5.1.30 при толщине пластин $b_1=0,5 \cdot 10^{-2}$ м.

5.1.33. Выделить составляющие проводимости рассеяния и получить выражение для полной проводимости рассеяния $\Lambda_{3\sigma}$ между полюсными наконечниками, показанными на рис. 5.12, в, если в зазор между ними помещена пластина (якорь), выступающая с одной узкой стороны за пределы полюсных наконечников.

Решение. Основные составляющие проводимости рассеяния показаны на рис. 5.12, в. Из-за наличия якоря (не показанного на рисунке) элементарные пути $\Lambda_{3\sigma}^{\text{III}}$, $\Lambda_{3\sigma}^{\text{IV}}$, $\Lambda_{3\sigma}^{\text{V}}$ и $\Lambda_{3\sigma}^{\text{VI}}$ с той стороны, где якорь выступает за

127

пределы полюсных наконечников, не должны быть учтены. Поэтому суммарная проводимость $\Lambda_{3\sigma}=2\Lambda_{3\sigma}^{\text{I}}+2\Lambda_{3\sigma}^{\text{II}}+\Lambda_{3\sigma}^{\text{III}}+\Lambda_{3\sigma}^{\text{IV}}+2\Lambda_{3\sigma}^{\text{V}}+\Lambda_{3\sigma}^{\text{VI}}$.

О т в е т : составляющие проводимости показаны на рис. 5.12, в: $\Lambda_{3\sigma}=2\Lambda_{3\sigma}^{\text{I}}+2\Lambda_{3\sigma}^{\text{II}}+\Lambda_{3\sigma}^{\text{III}}+\Lambda_{3\sigma}^{\text{IV}}+2\Lambda_{3\sigma}^{\text{V}}+\Lambda_{3\sigma}^{\text{VI}}$.

5.1.34. Рассчитать величину элементарных проводимостей рассеяния, показанных на рис. 5.12, в, и суммарной проводимости $\Lambda_{3\sigma}$, используя ответ предыдущей задачи. Геометрические размеры: $\delta_0=0,4 \cdot 10^{-2}$ м; $a_{\text{п}}=0,9 \cdot 10^{-2}$ м; $b_{\text{п}}=0,7 \cdot 10^{-2}$ м; $c_{\text{п}}=0,25 \cdot 10^{-2}$ м.

О т в е т : $\Lambda_{3\sigma}^{\text{I}}=0,292 \cdot 10^{-8}$ Гн; $\Lambda_{3\sigma}^{\text{II}}=0,294 \cdot 10^{-8}$ Гн; $\Lambda_{3\sigma}^{\text{III}}=0,227 \cdot 10^{-8}$ Гн; $\Lambda_{3\sigma}^{\text{IV}}=0,229 \cdot 10^{-8}$ Гн; $\Lambda_{3\sigma}^{\text{V}}=0,078 \cdot 10^{-8}$ Гн; $\Lambda_{3\sigma}^{\text{VI}}=0,039 \cdot 10^{-8}$ Гн; $\Lambda_{3\sigma}=1,86 \cdot 10^{-8}$ Гн.

5.1.35. Определить магнитные проводимости Λ_1 и Λ_2 и сопротивления R_1 и R_2 зазоров δ_1 и δ_2 , образованных полюсными наконечниками (рис. 5.12, в), и плоским якорем, помещенным между ними параллельно поверхностям наконечников (см. рис. 5.38). Размеры полюсных наконечников взять из предыдущей задачи; зазоры $\delta_1=0,13 \cdot 10^{-2}$; $\delta_2=0,17 \cdot 10^{-2}$ м.

О т в е т: $\Lambda_1 = 6,1 \cdot 10^{-8} \text{ Гн}; \Lambda_2 = 4,65 \cdot 10^{-8} \text{ Гн}; R_1 = 16,4 \cdot 10^6 \text{ Гн}^{-1}; R_2 = 21,5 \cdot 10^6 \text{ Гн}^{-1}.$

5.1.36. Определить проводимости рассеяния цилиндрического постоянного магнита, помещенного между пластинами (см. рис. 5.12, г), при следующих его размерах: $d_{\text{пос}} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}; l_{\text{пос}} = 2,8 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$

Р е ш е н и е. Так как для постоянного магнита длиной $l_{\text{пос}}$ поверхность вблизи нейтрального сечения с точки зрения рассеяния неэффективна примерно на $(1/3)l_{\text{пос}}$, то путь потока рассеяния определяется зоной z , показанной на рис. 5.12, з, проводимость которой $\Lambda_{z\text{пос}} = \mu_0 \pi d_{\text{пос}} (\lambda_z/2)$, где удельную проводимость λ_z находят по кривым рис. П. 17. Для $z \approx (1/3)l_{\text{пос}}$ и $\delta = (1/6)l_{\text{пос}}$ имеем

$$z/\delta = \frac{l_{\text{пос}}/3}{l_{\text{пос}}/6} = 2,$$

где $d/\delta = d_{\text{пос}}/\delta = 1 \cdot 10^{-2}/(2,8 \cdot 10^{-2}/6) = 2,14$. По кривым рис. П.17 находим $\lambda_z = 1,4$; тогда

$$\Lambda_{z\text{пос}} = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 1 \cdot 10^{-2} (1,4/2) = 2,76 \cdot 10^{-8} \text{ Гн}.$$

О т в е т: $\Lambda_{z\text{пос}} = 2,76 \cdot 10^{-8} \text{ Гн}.$

5.1.37. Определить по формуле (5.2) магнитное сопротивление паразитного зазора между магнитом и пластиной (см. рис 5.12, з), образованного немагнитной прокладкой толщиной $\delta_{\text{пр}} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$ Размеры магнита даны в предыдущей задаче

О т в е т: $R_{\text{пр}} = 5,1 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}^{-1}.$

5.1.38. Определить суммарную магнитную проводимость < торца коаксиального цилиндра на кожух (система, характерная

128

для длинноходовых электромагнитов с незамкнутой магнитной цепью и приведенная в табл. П.29) при следующих размерах: $d = 11,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}; a = 14 \cdot 10^{-3} \text{ м}; b = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$

Р е ш е н и е. Расчет производят с помощью данных табл. П.29, предварительно определив необходимые соотношения размеров, характерные для каждого из приведенных в ней случаев. Так как в рассматриваемой задаче $a > d$ и $b < d/2$, используем формулы для эскиза 1 (табл. П.29). Подставив все необходимые значения, получаем: для магнитной проводимости с ребра $\Lambda_1 = 1,65 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} (11,25 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-3}) = 3,37 \cdot 10^{-8} \text{ Гн};$ для магнитной проводимости с поверхности торца

$$\Lambda_2 = \frac{4 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} [11,25 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} - \sqrt{2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} (11,25 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3})}]}{4 \cdot 5 \cdot 10^{-3} / (11,25 \cdot 10^{-3}) + 1} = 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ Гн}.$$

Учитывая, что магнитные проводимости соединены параллельно, получим $\Lambda_{\text{ТС}} = \Lambda_1 + \Lambda_2 = 3,37 \cdot 10^{-8} + 1,2 \cdot 10^{-8} = 4,57 \cdot 10^{-8} \text{ Гн}.$

О т в е т : $\Lambda_{T\Sigma}=4,57 \cdot 10^{-8}$ Гн.

5.1.39. Решить предыдущую задачу при $\delta=10 \cdot 10^{-3}$ м.

О т в е т : $\Lambda_{T\Sigma}=3,92 \cdot 10^{-8}$ Гн.

5.1.40. Решить задачу 5.1.38 при $a = 9 \cdot 10^{-3}$ м.

¹Авторы пятой главы выражают благодарность инж. О.Ю. Бродянскому, инж. С.А. Гордону и ст. преп. А.К. Федыкину за помощь при подготовке рукописи.

²Шубин Г.А., Сливийская А.Г. Расчет торцевой магнитной проводимости электродинамического преобразователя с подвижным постоянным магнитом//Электротехника, 1978. № 1. С. 34-35.

5.2. Электромагнитные механизмы постоянного тока

В параграфе приводятся задачи по расчету наиболее распространенных типов электромагнитных механизмов постоянного тока: с внешним притягивающимся и внутренним втягивающимся якорем. Даны задачи по расчету магнитных цепей, обмоточных данных и электромагнитных сил, а также по определению основных размеров электромагнита. Приведены задачи, в которых отражено влияние схемы включения и конструктивного исполнения электромагнитов на их характеристики. Основные используемые формулы и соотношения приведены ниже.

С у м м а р н а я МДС э л е к т р о м а г н и т а (А) равна

$$F = F_{\delta\Sigma} + F_{e\Sigma} + F_{\sigma\Sigma} \quad (5.17)$$

Составляющие этой суммы - результирующее падение магнитного потенциала в рабочих воздушных зазорах $F_{\delta\Sigma}$, падение магнитного потенциала в паразитных зазорах $F_{e\Sigma}$ и суммарное падение магнитного потенциала в стали FCTS при заданном потоке в рабочем зазоре Φ_{δ} (Вб) - определяются по нижеследующим формулам

$$F_{\delta\Sigma} = \Phi_{\delta} / \Lambda_{\delta\Sigma} \quad (5.18)$$

где $\Lambda_{\delta\Sigma}$ - суммарная проводимость рабочих зазоров, Гн.

С учетом уравнения (5.1) для одного зазора

$$F_{\delta} = B_{\delta} l / \mu_0 \quad (5.18a)$$

где $\mu_0=4\pi 10^{-7}$ Гн/м; δ - рабочий зазор, м; B_{δ} - индукция, Тл.

Аналогично уравнению (5.18)

$$F_{e\Sigma} = \Phi_{e\Sigma} / \Lambda_{e\Sigma} \quad (5.19)$$

где $\Lambda_{e\Sigma}$ - суммарная проводимость паразитных зазоров, Гн.

Последнее слагаемое в (5.17) равно

$$F_{\text{ст}i} = \sum_{\text{ст}i} F_{\text{ст}i}, \quad (5.20)$$

где падение МДС на отдельном i -м участке стали

$$F_{\text{ст}i} = H_{\text{ст}i} l_{\text{ст}i}, \quad (5.20a)$$

В (5.20a) $l_{\text{ст}i}$ - длина i -го участка магнитной цепи по стали, м; $H_{\text{ст}i}$ - напряженность магнитного поля i -го участка магнитной цепи, А/м, которую находят из кривых намагничивания материала магнитопровода (рис. П. 13) по значению индукции $B_{\text{ст}i}$ (Тл):

$$B_{\text{ст}i} = \Phi_{\text{ст}i} / S_{\text{ст}i}, \quad (5.21)$$

где $\Phi_{\text{ст}i}$ - поток на соответствующем участке магнитной цепи, Вб; $S_{\text{ст}i}$ - площадь его поперечного сечения, м².

При расчете магнитных цепей по участкам используют схему замещения. Разность магнитных потенциалов (А) между точками i - i' схемы замещения находят, используя второй закон Кирхгофа:

$$U_{\text{ст}(i-i')} = \sum_{\text{ст}i} (\Phi_{\text{ст}i} R_{\text{ст}i} - F_i), \quad (5.22)$$

где $\Phi_{\text{ст}i}$ - поток i -го участка, Вб; $R_{\text{ст}i}$ - магнитное сопротивление i -го участка, Гн⁻¹. Первый член в (5.22) представляет собой суммарное падение МДС в i -м, расположенном выше рассматриваемых точек, контуре схемы замещения [этот член определяют по уравнениям (5.18) ... (5.20)]; F_i - МДС i -го участка (А), которую находят по формуле

$$F_i = F / l_k, \quad (5.23)$$

где F - МДС катушки, А; l_i - длина i -го участка, м; l_k - длина катушки, м. Поток рассеяния (Вб) на i -м участке находят по закону Ома:

$$\Phi_{\text{ст}i} = U_{\text{ст}i} / \Lambda_{\text{ст}i}, \quad (5.24)$$

где $\Lambda_{\text{ст}i}$ - проводимость рассеяния i -го участка, Гн. Для t -го узла схемы замещения по первому закону Кирхгофа

$$\sum \Phi_i = 0. \quad (5.25)$$

При расчете магнитной цепи по коэффициентам рассеяния (σ_x) поток Φ_x (Вб) в сечении магнитной цепи, находящемся на расстоянии x от зазора (x выражается в м), определяют как

$$\Phi_x = \Phi_{\delta} \sigma_x. \quad (5.26)$$

Для клапанного электромагнита при длине катушки l_k (м), равной длине сердечника l_c ,

$$\sigma_x = 1 + \frac{\lambda_\sigma}{\Lambda_{\delta\Sigma}} \frac{x}{2} \left(2 - \frac{x}{l_k} \right). \quad (5.27)$$

Здесь и ниже λ_σ - удельная проводимость рассеяния, Гн/м; $\Lambda_{\delta\Sigma}$ - суммарная проводимость рабочего зазора, Гн.

Для броневого электромагнита, в котором рабочий воздушный зазор δ (м) расположен между якорем и неподвижным сердечником (стоном), длина якоря (м) равна:

$$l_x = l_k - (l_c + \delta). \quad (5.28)$$

130

Коэффициент рассеяния для якоря:

$$\sigma_x = 1 + \frac{\lambda_\sigma l_x}{\Lambda_\delta l_k} \frac{x}{2} \left(2 - \frac{x}{l_x} \right), \quad (5.29)$$

где Λ_δ - проводимость рабочего зазора, Гн. Коэффициент рассеяния для стопа

$$\sigma_y = 1 + \frac{\lambda_\sigma l_c}{\Lambda_\delta l_k} \frac{y}{2} \left(2 - \frac{y}{l_c} \right), \quad (5.30)$$

где y - расстояние от сечения стопа до рабочего зазора, м.

Для сердечника (или якоря и стопа) среднее значение напряженности поля может быть найдено по формуле Симпсона

$$H_{cp} = (H_1 + 4H_2 + H_3)/6, \quad (5.31)$$

где H_1, H_2, H_3 - соответственно напряженности поля для первого, второго и третьего сечения, А/м.

Э л е к т р о м а г н и т н а я с и л а для равномерного поля в зазоре и ненасыщенной магнитной системе определяется по формуле Максвелла:

$$P_\Sigma = B_\delta^2 S / (2\mu_0), \quad (5.32)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; B_δ - индукция в рабочем зазоре, Тл; S - площадь полюса, м². Здесь и далее сила выражается в ньютонах.

В остальных случаях используют энергетические формулы.

1. Для электромагнитов с внешним притягивающимся якорем

$$P_\Sigma = \frac{1}{2} F_\delta^2 \left| \frac{d\Lambda_{\delta\Sigma}}{d\delta} \right|; \quad (5.33)$$

здесь и ниже F_{δ} -МДС рабочего зазора, $A; \frac{d\Lambda_{\delta\Sigma}}{d\delta}$ -производная суммарной проводимости по зазору, Гн/м.

2. Для электромагнита с поворотным якорем электромагнитный момент (Н·м) равен

$$M_{\Sigma} = \frac{1}{2} F_{\delta}^2 \left| \frac{d\Lambda_{\delta\Sigma}}{d\beta} \right|, \quad (5.33a)$$

где $\frac{d\Lambda_{\delta\Sigma}}{d\beta}$ - суммарная производная проводимости рабочих зазоров по углу наклона якоря над полюсом, Гн/рад.

3. Для броневого электромагнита

$$P_{\Sigma} = \frac{1}{2} F_{\delta}^2 \left[\left| \frac{d\Lambda_{\delta}}{d\delta} \right| + \lambda_{\sigma} \left(\frac{l_{\text{я}}}{l_{\text{к}}} \right)^2 \right], \quad (5.34)$$

где λ_{σ} - удельная проводимость рассеяния, Гн/м; $l_{\text{я}}$ и $l_{\text{к}}$ - длина якоря и катушки, м.

Производные проводимостей рабочих зазоров (Гн/м) равны:

для подковообразного электромагнита, имеющего шляпки с диаметром $d_{\text{шл}}$ и толщиной $h_{\text{шл}}$ (м),

$$\frac{d\Lambda_{\delta\Sigma}}{d\delta} = -\frac{\mu_0}{2} \left[\frac{\pi d_{\text{шл}}^2}{4\delta^2} + \frac{0,22d_{\text{шл}}h_{\text{шл}}}{(0,22\delta + 0,4h_{\text{шл}})^2} \right], \quad (5.35)$$

где $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; δ - рабочие зазоры, м;

131

для цилиндрического полюса с диаметром d и зазором δ (м) без учета поля выпучивания

$$\frac{d\Lambda_{\delta}}{d\delta} = -\mu_0 \frac{\pi d^2}{4\delta^2}, \quad (5.35a)$$

где $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

для электромагнита с поворотным якорем и двумя зазорами δ (постоянной величины) при угле наклона β

$$\frac{d\Lambda_{\delta\Sigma}}{d\beta} = -\frac{\mu_0 a}{2 \ln(1 + \delta/r)}, \quad (5.36)$$

где $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; δ , a и r - зазор, толщина и радиус полюса, м.

Знак минус в формулах (5.35), (5.35а) и (5.36) указывает на то, что сила, определяемая производной от проводимости, направлена в сторону уменьшения зазора.

Для соленоидного электромагнита сила определяется по приближенной формуле¹:

$$P_3 = P_{3\text{макс}} f(x), \quad (5.37)$$

где $P_{3\text{макс}}$ - максимальная электромагнитная сила, равная

$$P_{3\text{макс}} = abc\beta_c \alpha^2 F_0^2 S_6. \quad (5.38)$$

Здесь F_0 - удельная МДС катушки на единицу длины катушки, А/м; S_6 - боковая поверхность сердечника, м²; a - выраженный в ньютонах, деленных на амперы в квадрате, коэффициент, учитывающий влияние на величину силы размеров сердечника диаметром d_c (м) при условии равенства его длины l_c (м) длине катушки l_k :

$$a = 7,85 \cdot 10^{-6} (l_c/d_c - 2,9). \quad (5.39)$$

Безразмерные коэффициенты b , c , β_c , a , определяющие влияние остальных размеров на величину силы, равны

$$b = 1,2 (l_c/l_k) - 0,18; \quad (5.40)$$

$$c = 0,7 [1,29 + (d_c/d_{cp})^{2,75}]; \quad (5.41)$$

$$\beta_c = d_c/4l_c; \quad (5.42)$$

$$\alpha = \sqrt{1 + (d_{cp}/2l_k)^2} - d_{cp}/2l_k, \quad (5.43)$$

где d_{cp} - средний диаметр катушки электромагнита, равный полусумме ее наружного (d_n) и внутреннего (d_b) диаметров, м.

Выражение для функции $f(x)$ (где x - глубина погружения подвижного сердечника в катушку, м), обуславливающей знакопеременную характеристику $P_3=f(x)$, имеет следующий вид:

$$f(x) = k_1 \sin \left[\pi \left(\varphi + \frac{0,95x}{\sqrt{l_k l_c}} \right) \right] - k_2 \sin \left[2\pi \left(\varphi + \frac{0,95x}{\sqrt{l_k l_c}} \right) \right], \quad (5.44)$$

где $k_1=0,91$, $k_2=0,25$, а коэффициент φ равен

$$\varphi = 0,8 (d_{cp}/2l_k)^2. \quad (5.45)$$

Значение x , соответствующее максимуму силы, равно

$$x_{\text{макс}} = \sqrt{l_c l_k} (0,626 - \varphi)/0,95. \quad (5.46)$$

Выбор типа электромагнита и определение его размеров можно производить в зависимости от величины конструктивного показателя Π_k по данным табл. П. 27. Выражение для Π_k (в ньютонах в степени 0,5, деленных на метр), имеет вид

$$\Pi_k = \sqrt{P_{э.н}/\delta_n}, \quad (5.47)$$

где $P_{э.н}$ - электромагнитная сила, Н, при начальном рабочем зазоре δ_n , м.

Длину цилиндрической бескаркасной катушки при длительном режиме работы определяют по формуле

$$l_k = \sqrt[3]{\frac{F_y^2 \rho_\theta n}{2k_{3м} k_T (\theta_{доп} - \theta_0)}}; \quad (5.48)$$

здесь и ниже F_y - установившееся значение МДС катушки, А;

$$F_y = k_3 F_{тр}, \quad (5.49)$$

где k_3 - коэффициент запаса, равный 1,1÷2; МДС трогания

$$F_{тр} = k_n F_\delta, \quad (5.50)$$

где k_n - коэффициент, учитывающий падение магнитного потенциала в стали и паразитных зазорах, равный 1,2... 1,5; F_δ - падение магнитного потенциала в рабочем зазоре.

Для броневых электромагнитов отношение длины бескаркасной катушки к ее высоте ($n=l_k/h_k$) и индукцию в зазоре B_n определяют по графику рис. П. 14 в зависимости от величины Π_k . Для клапанных электромагнитов [24] $n=2,5... 7$. Остальные составляющие, входящие в формулу (5.48): ρ_θ - удельное электрическое сопротивление провода в нагретом состоянии, Ом·м; $k_{3м}$ - коэффициент заполнения по меди (см. табл. П.24) ; k_T - коэффициент теплопередачи [для катушек электромагнитов $k_T=9... 14$ Вт/(м²·°С)]; $\theta_{доп}$ - допустимая температура, °С; θ_0 - температура окружающей среды, °С.

При расчете обмоточных данных используются следующие формулы. Диаметр провода, м:

$$d = \sqrt{4\rho_\theta I_{ср} F_y / (\pi U)}, \quad (5.51)$$

где F_y - МДС, определяемая по (5.49) , А; U - напряжение питания обмотки, В; $I_{ср}$ - средняя длина витка, м, равная

$$l_{ср} = \pi (d_o + h_o). \quad (5.52)$$

Здесь и ниже d_o - диаметр обмотки (для бескаркасной катушки $d_o=d_c$), м; h_o - толщина обмотки, м. Число витков обмотки

$$N = 4Q_o k_{3м} / (\pi d^2), \quad (5.53)$$

где Q_o - площадь обмоточного окна, м²; $k_{3м}$ - коэффициент заполнения по меди.

При $d > 0,3 \cdot 10^{-3}$ м (для рядовой обмотки) число витков

$$N = N_1 N_2, \quad (5.53a)$$

где число витков в слое при длине окна l_0 и диаметре провода с изоляцией d_1 (м) равно

$$N_1 = 0,95 (l_0/d_1) - 1, \quad (5.54)$$

число слоев

$$N_2 = h_0/d_1. \quad (5.55)$$

133

Площадь обмоточного окна (m^2)

$$Q_0 = h_0 l_0. \quad (5.56)$$

Сопротивление обмотки (Ом)

$$r = 4 \rho_{\theta} l_{\text{ср}} N / (\pi d^2). \quad (5.57)$$

Мощность, потребляемая катушкой (Вт)

$$P = U^2/r. \quad (5.58)$$

Формулы для пересчета обмоточных данных катушки с напряжением U на напряжение U' (при $F'_y = F_y$ и $k_{з.м} = \text{const}$) имеют вид:

для диаметра провода

$$d' = d \sqrt{U/U'}; \quad (5.59)$$

для числа витков

$$N' = N (U'/U); \quad (5.60)$$

для сопротивления

$$r' = r (U'/U)^2; \quad (5.61)$$

для мощности

$$P' \approx P. \quad (5.62)$$

Коэффициент возврата электромагнитов равен²:

$$k_B = \sqrt{1 - \Delta P/P_{\text{ЭК}}}, \quad (5.63)$$

где ΔP - разность электромагнитной и противодействующей сил при конечном зазоре, Н;
 $P_{\text{ЭК}}$ - электромагнитная сила при конечном зазоре, Н.

5.2.1. Найти падение магнитного потенциала в рабочих зазорах П-образного электромагнита с поворотным якорем (рис. 5.13) и электромагнитный момент, развиваемый при зазоре $\delta = 0,6 \cdot 10^{-3}$ м, угле $\alpha = 15^\circ$ и потоке $\Phi_{\delta} = 2 \cdot 10^{-4}$ Вб; размеры электромагнита: $a = b = r = 2 \cdot 10^{-2}$ м; $d_c = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м; $l = l_k = 6 \cdot 10^{-2}$ м; $h = 6 \cdot 10^{-2}$ м; проводимость $\Lambda_{\delta\Sigma} = 33,4 \cdot 10^{-8}$ Гн;

Решение. Падение магнитного потенциала находим по формуле (5.18) $F_{\delta\Sigma} = 2 \cdot 10^4 / 33,4 \cdot 10^{-8} = 599$ А, а электромагнитный момент - по

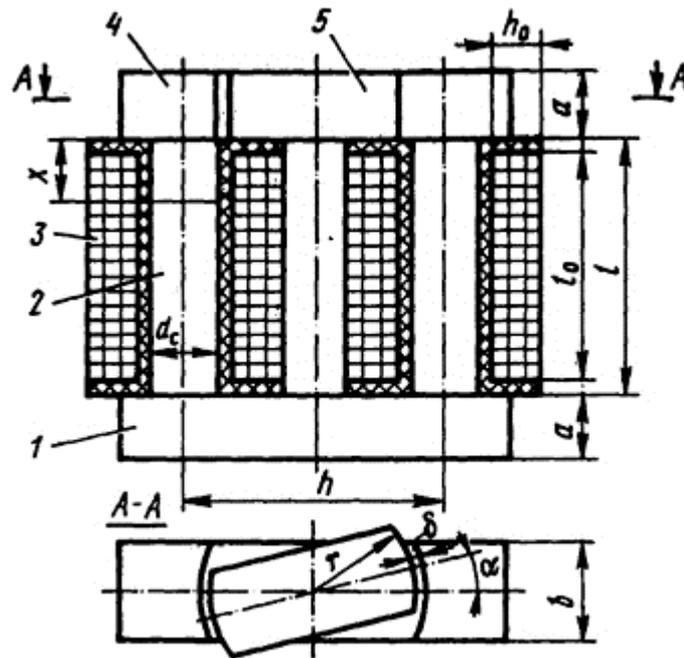


Рис. 5.13. П-образный электромагнит постоянного тока с внешним поперечно-движущимся якорем: 1 - основание; 2 - сердечник; 3 - двухсекционная катушка; 4 - полюсный наконечник; 5 - якорь

134

(5.33a) $M_3 = 0,5(599)^2 \cdot 42,5 \cdot 10^{-8} = 7,6 \cdot 10^{-2}$ Н·м, где в соответствии с (5.36) производная

$$\frac{d\Lambda_{\delta\Sigma}}{d\beta} = - \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^{-2}}{2 \ln(1 + 0,6 \cdot 10^{-3} / 2 \cdot 10^{-2})} = - 42,5 \cdot 10^{-8} \text{ Гн/рад.}$$

5.2.2. Решить задачу 5.2.1 при $\alpha=0^\circ$ ($\Lambda_{\delta\Sigma}=44,5 \cdot 10^{-8}$ Гн).

5.2.3. Для электромагнита (рис. 5.13), размеры которого даны в задаче 5.2.1, определить МДС трогания, если магнитопровод выполнен из электротехнической нелегированной стали, угол $\alpha=15^\circ$, удельная проводимость рассеяния $\lambda_\delta=1,91 \cdot 10^{-6}$ Гн/м; проводимость $\Lambda_{\delta\Sigma}=33,4 \cdot 10^{-8}$ Гн, МДС $F_{\delta\Sigma} = 599$ А, поток $\Phi_\delta=2 \cdot 10^{-4}$ Вб. Выбрав коэффициент запаса $k_3=1,5$, найти установившуюся МДС обмотки F_y .

Решение. В данном электромагните поток в якорь и полюсных наконечниках одинаков: $\Phi_y = \Phi_{п.н} = \Phi_\delta$; соответствующие площади сечения также равны: $S_y = S_{п.н} = ab = 2 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 10^{-2} = 4 \cdot 10^{-4}$ м². По формуле (5.21) индукция $B_y = B_{п.н} = 2 \cdot 10^{-4} / 4 \cdot 10^{-4} = 0,5$ Тл. По кривой намагничивания материала (кривая I на рис. П13) находим напряженность поля $H_y = H_{п.н} = 1,3 \cdot 10^2$ А/м. Так как $l_y = 2r = 2 \cdot 2 \cdot 10^{-2} = 4 \cdot 10^{-2}$ м, а $l_{п.н} = 0,5(h - l_y + a) = 0,5(6 \cdot 10^{-2} - 4 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 10^{-2}) = 2 \cdot 10^{-2}$ м, то в соответствии с (5.20a) $F_y = 1,3 \cdot 10^2 \cdot 4 \cdot 10^{-2} = 5,2$ А; $F_{п.н} = 1,3 \cdot 10^2 \cdot 2 \cdot 10^{-2} = 2,6$ А. Вследствие рассеяния поток вдоль сердечника к основанию увеличивается. Для определения МДС сердечников F_c с помощью формулы (5.27) найдем коэффициент рассеяния для сечений $x_1 = 0$, $x_2 = 0,5l$ и $x_3 = l$:

$$\sigma_{x1} = 1; \sigma_{x2} = 1 + \frac{1,91 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5 \cdot 6 \cdot 10^{-2}}{33,4 \cdot 10^{-8} \cdot 2} \left(2 - \frac{0,5 \cdot 6 \cdot 10^{-2}}{6 \cdot 10^{-2}} \right) = 1,13;$$

$$\sigma_{x3} = 1 + \frac{1,91 \cdot 10^{-6} \cdot 6 \cdot 10^{-2}}{33,4 \cdot 10^{-8} \cdot 2} = 1,17.$$

По формуле (5.26) определим соответствующие потоки $\Phi_1 = 2 \cdot 10^{-4} \cdot 1 = 2 \cdot 10^{-4}$ Вб; $\Phi_2 = 2 \cdot 10^{-4} \cdot 1,13 = 2,26 \cdot 10^{-4}$ Вб; $\Phi_3 = 2 \cdot 10^{-4} \cdot 1,17 = 2,34 \cdot 10^{-4}$ Вб. Так как площадь сечения сердечника $S_c = \pi(1,5 \cdot 10^{-2})^2 / 4 = 1,77 \cdot 10^{-4}$ м², то индукции, определяемые по (5.21), и соответствующие им напряженности поля (кривая *I* рис. П.13) равны:

$$B_1 = 2 \cdot 10^{-4} / 1,77 \cdot 10^{-4} = 1,13 \text{ Тл}; H_1 = 2,5 \cdot 10^2 \text{ А/м};$$

$$B_2 = 2,26 \cdot 10^{-4} / 1,77 \cdot 10^{-4} = 1,28 \text{ Тл}; H_2 = 4 \cdot 10^2 \text{ А/м};$$

$$B_3 = 2,34 \cdot 10^{-4} / 1,77 \cdot 10^{-4} = 1,32 \text{ Тл}; H_3 = 4,3 \cdot 10^2 \text{ А/м}.$$

Среднее значение напряженности поля по (5.31) $H_{cp} = (2,5 \cdot 10^2 + 4 \cdot 4 \cdot 10^2 + 4,3 \cdot 10^2) / 6 = 3,8 \cdot 10^2$ А/м; тогда по (5.20а) $F_c = H_{cp} \cdot l_c = 3,8 \cdot 10^2 \cdot 6 \cdot 10^{-2} = 22,8$ А. Поток в основании $\Phi_0 = \Phi_3$, площадь $S_0 = ab = 2 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 10^{-2} = 4 \cdot 10^{-4}$ м²; при этом $B_0 = 2,34 \cdot 10^{-4} / 4 \cdot 10^{-4} = 0,585$ Тл; $h_0 = 1,3 \cdot 10^2$ А/м, а $F_0 = H_0 l_0 = 1,3 \cdot 10^2 \cdot 8 \cdot 10^{-2} = 10,4$ А, где $l_0 = h + a = 6 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 10^{-2} = 8 \cdot 10^{-2}$ м. Суммарное падение магнитного потенциала в стали согласно (5.20) $F_{СТΣ} = 5,2 + 2 \cdot 2,6 + 2 \cdot 22,8 + 10,4 = 66,4$ А. Пренебрегая падением магнитного потенциала в паразитные зазоры, по (5.17) получим $F_{ТР} = 599 + 66,4 = 665,4$ А. Установившееся значение МДС обмотки найдем по (5.49): $F_y = 1,5 \cdot 665,4 \approx 1000$ А

О т в е т : $F_{ТР} = 665,4$ А; $F_y = 1000$ А.

135

5.2.4. Решить задачу 5.2.3 при $\alpha = 0^\circ$ ($\Lambda_{\delta\Sigma} = 44,5 \cdot 10^{-8}$ Гн).

5.2.5. Рассчитать параметры двухсекционной обмотки электромагнита, рассмотренного в задаче 5.2.3 (см. рис. 5.13). МДС $F_y = 1000$ А, напряжение $U = 12$ В; размеры одной секции обмотки: длина $l_0 = 5,5 \cdot 10^{-2}$ м, толщина $h_0 = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м, Диаметр $d_c = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м. Секции соединены последовательно и согласно. Удельное сопротивление $\rho = 2,4 \cdot 10^{-8}$ Ом·м ($\vartheta = 105^\circ\text{C}$). Каковы будут обмоточные данные при напряжении $U = 24$ В?

Р е ш е н и е. МДС каждой секции обмотки $F_{y,c} = 1000/2 = 500$ А, напряжение $U_c = 12/2 = 6$ В, средняя длина витка по (5.52) $l_{cp} \approx \pi(1,5 \cdot 10^{-2} + 1,5 \cdot 10^{-2}) = 9,4 \cdot 10^{-2}$ м. По (5.51) определим диаметр провода:

$$d = \sqrt{4 \cdot 2,4 \cdot 10^{-8} \cdot 9,4 \cdot 10^{-2} \cdot 500 / (\pi \cdot 6)} = 0,49 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Согласно табл. П.24 выбираем провод марки ПЭВ1 диаметром $d = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м (по изоляции $d_1 = 0,55 \cdot 10^{-3}$ м); коэффициент $k_{3,м} = 0,663$. Число витков каждой секции найдем по (5.53), рассчитав предварительно по (5.56) площадь

$$Q_0 = 1,5 \cdot 10^{-2} \cdot 5,5 \cdot 10^{-2} = 8,25 \cdot 10^{-4} \text{ м};$$

$$N_c = 4 \cdot 8,25 \cdot 10^{-4} \cdot 0,663 / [\pi (0,5 \cdot 10^{-3})^2] = 2786;$$

тогда число витков обмотки $N = 2 \cdot 2786 = 5572$. Сопротивление обмотки согласно (5.57)

$$r = 4 \cdot 2,4 \cdot 10^{-8} \cdot 9,4 \cdot 10^{-2} \cdot 5572 / [\pi (0,5 \cdot 10^{-3})^2] = 64 \text{ Ом.}$$

Потребляемую мощность найдем по (5.58): $P=12^2/64 = 2,25$ Вт. Обмоточные данные при переходе на напряжение $U'=24$ В определяют по формулам

$$d' = 0,5 \cdot 10^{-3} \times \sqrt{12/24} \approx 0,355 \cdot 10^{-3} \text{ м;}$$

$$N' = 5572 \cdot 24/12 = 11144 \text{ (} N_c = 5572 \text{);}$$

$$r' = 64 (24/12)^2 = 256 \text{ Ом; } P' = 2,25 \text{ Вт.}$$

О т в е т: для напряжения $U=12$ В: $d=0,5 \cdot 10^{-3}$ м; $N=5572$; $r=64$ Ом; $P=2,25$ Вт; при $U'=24$ В: $d'=0,355 \cdot 10^{-3}$ м; $N'=11144$; $r'=256$ Ом; $P'=P$.

5.2.6. Решить задачу 5.2.5 при $F_y=2400$ А, считая обмотку рядовой и используя формулы (5.53а)...(5.55).

О т в е т: при $U=12$ В: $d=0,8 \cdot 10^{-3}$ м; $N=2040$; $r=9,2$ Ом; $P=15,6$ Вт; при $U'=24$ В: $d'=0,56 \cdot 10^{-3}$ м; $N'=4080$; $r' = 36,8$ Ом; $P' = P$.

5.2.7. Определить поток Φ_δ в рабочем зазоре $\delta=0,1 \cdot 10^{-2}$ м подковообразного электромагнита (рис. 5.14) с учетом насыщения стали и рассеяния. Удельная проводимость рассеяния $\lambda_\sigma=2,7 \cdot 10^{-6}$ Гн/м, суммарная проводимость рабочих зазоров $\Lambda_{\delta\Sigma} = 32,5 \cdot 10^{-8}$ Гн, МДС обмотки $E=1000$ А; материал магнитопровода - сталь марки 10. Размеры электромагнита: $d_{\text{шп}}=2,4 \cdot 10^{-2}$ м; $d_c = 1,6 \cdot 10^{-2}$ м; $a_y=0,6 \cdot 10^{-2}$ м; $a_0=1 \cdot 10^{-2}$ м; $b_y=b_0 = 2,4 \cdot 10^{-2}$ м; $h=3,6 \cdot 10^{-2}$ м; $h_{\text{шп}}=0,3 \cdot 10^{-2}$ м; $l=5 \cdot 10^{-2}$ м.

Р е ш е н и е. Разобьем длину сердечника на несколько, в данном случае на две³, равных частей ($l_1=l_2=0,5 l=0,5 \cdot 5 \cdot 10^{-2}=2,5 \cdot 10^{-2}$ м) и используем

136

схему замещения, данную на рис. 5.15. Без учета насыщения стали и рассеяния находим приближенно по (5.18) поток $\Phi'_\delta = 1000 \cdot 32,5 \cdot 10^{-8} = 3,25 \cdot 10^{-4}$ Вб. С учетом названных факторов поток будет меньше. Задаемся потоком первого приближения $\Phi_\delta < \Phi'_\delta$. Принимая $\Phi_\delta = 2,3 \cdot 10^{-4}$ Вб, получим по (5.18): $F_{\delta\Sigma} = 2,3 \cdot 10^{-4} / (32,5 \cdot 10^{-8}) = 708$ А. Индукция в якоре по (5.21) $B_y = 2,3 \cdot 10^{-4} / (1,44 \cdot 10^{-4}) = 1,6$ Тл, где $S_y = a_y b_y = 0,6 \cdot 10^{-2} \cdot 2,4 \cdot 10^{-2} = 1,44 \cdot 10^{-4}$ м².

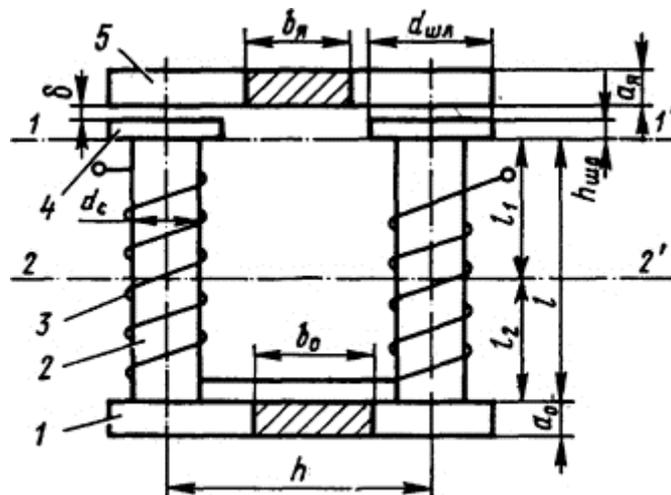


Рис. 5.14. Подковообразный электромагнит: 1 - основание; 2 - сердечник; 3 - двухсекционная обмотка; 4 - полюсный наконечник (шляпка); 5 - ярмо

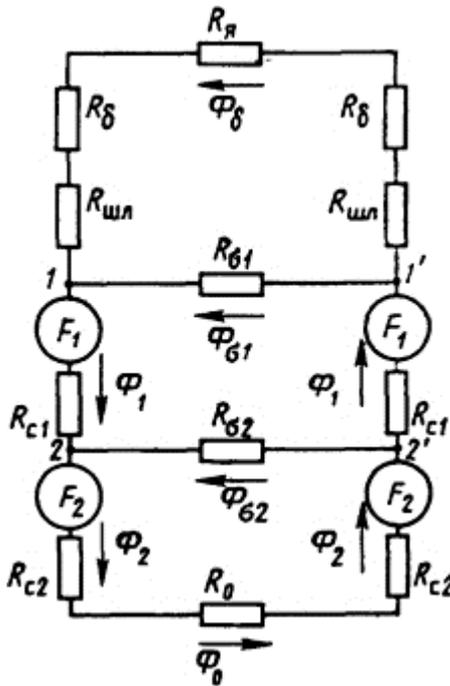


Рис. 5.15. Схема замещения для подковообразного электромагнита

По кривой 2 рис. П.13 находим $H_{\pi} = 25 \cdot 10^2$ А/м и, определив $l_{\pi} = h + a_{\pi} = 3,6 \cdot 10^{-2} + 0,6 \cdot 10^{-2} = 4,2 \cdot 10^{-2}$ м, по (5.20а) находим $F_{\pi} = 25 \cdot 10^2 \cdot 10^2 \cdot 4,2 \times 10^{-2} = 105$ А.

Аналогично для шляпки сердечника: $B_{шл} = 2,3 \cdot 10^{-4} \cdot 4 / [\pi(2,4 \cdot 10^{-2})^2] = 0,51$ Тл; $H_{шл} = 1,7 \cdot 10^2$ А/м; $F_{шл} = 1,7 \cdot 10^2 \cdot 0,3 \cdot 10^{-2} = 0,51$ А. Между точками 1—1' разность магнитных потенциалов согласно (5.22) при условии, что $F_i = 0$, $U_{M1-1'} = 708 + 105 + 2 \cdot 0,51 = 814$ А. Поток рассеяния Φ_{σ_1} по (5.24) $\Phi_{\sigma_1} = 814 \cdot 6,75 \cdot 10^{-8} = 0,55 \cdot 10^{-4}$ Вб, где $\Lambda_{\sigma_1} = \lambda_{\sigma} l_1 = 2,7 \cdot 10^{-8} \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} = 6,75 \times 10^{-8}$ Гн. Поток первого участка по (5.25) $\Phi_1 = 2,3 \cdot 10^{-4} + 0,55 \cdot 10^{-4} = 2,85 \times 10^{-4}$ Вб. Индукция по (5.21) $B_{c1} = 2,85 \cdot 10^{-4} \cdot 4 / [\pi(1,6 \cdot 10^{-2})^2] = 1,42$ Тл, напряженность поля $H_{c1} = 10 \cdot 10^2$ А/м, МДС $F_{c1} = H_{c1} l_1 = 10 \cdot 10^2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} = 25$ А. Разность магнитных потенциалов между точками 2—2' определим по (5.22), предварительно найдя по (5.23) $F_1 = 500 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} / (5 \cdot 10^{-2}) = 250$ А: $U_{M2-2'} = 814 + 2 \cdot 25 - 2 \cdot 250 = 364$ А. Аналогично, для второго участка: $\Phi_{\sigma_2} = 364 \cdot 6,75 \times 10^{-8} = 0,25 \cdot 10^{-4}$ Вб, где $\Lambda_{\sigma_2} = \Lambda_{\sigma_1} = 6,75 \cdot 10^{-8}$ Гн; $\Phi_2 = 2,85 \cdot 10^{-4} + 0,25 \cdot 10^{-4} = 3,1 \cdot 10^{-4}$ Вб; $B_{c2} = 3,1 \cdot 10^{-4} \cdot 4 / [\pi(1,6 \cdot 10^{-2})^2] = 1,54$ Тл; $H_{c2} = 17 \cdot 10^2$ А/м; $F_{c2} = H_{c2} l_2 = 17 \cdot 10^2 \times 2,5 \cdot 10^{-2} = 42,5$ А. Для основания: $\Phi_o = \Phi_2$; $B_o = 3,1 \times 10^{-4} / (2,4 \cdot 10^{-4}) = 1,29$ Тл, где $S_o = a_o b_o = 1 \cdot 10^{-2} \cdot 2,4 \cdot 10^{-2} = 2,4 \cdot 10^{-4}$ м²; $H_o = 6 \cdot 10^2$ А/м; $F_o = H_o l_o = 6 \cdot 10^2 \cdot 4,6 \cdot 10^{-2} = 27,6$ А, где $l_o = h + a_o = 3,6 \cdot 10^{-2} + 1 \cdot 10^{-2} = 4,6 \cdot 10^{-2}$ м. Суммарная МДС по (5.17) равна $F = 708 + 105 + 2 \cdot 0,51 +$

$+ 2 \cdot 25 + 2 \cdot 42,5 + 27,6 = 976$ А. Как видно, принятый нами поток Φ_{δ} с достаточной точностью соответствует заданной МДС $F = 1000$ А и задаваться потоком второго приближения не нужно.

О т в е т: $\Phi_{\delta} = 2,3 \cdot 10^{-4}$ Вб.

5.2.8. Используя энергетическую формулу (5.33), найти электромагнитную силу подковообразного электромагнита, рассмотренного в задаче 5.2.7, при $\delta = 0,1 \cdot 10^{-2}$ м и $F_{\delta} = 708$ А.

О т в е т : $P_3=72,5$ Н.

5.2.9. Выбрать тип электромагнита и определить приближенно его размеры, если при рабочем зазоре $\delta=0,25 \cdot 10^{-2}$ м и длительном режиме работы он должен развивать силу $P_3=5$ Н.

Р е ш е н и е . Вычислив по (5.47) показатель

$$P_k = \sqrt[5]{P_3 / (0,25 \cdot 10^{-2})} = 894 \text{ Н}^{0,5} / \text{м},$$

выбираем согласно табл. П.27 клапанный электромагнит, а по кривой 2 рис. П. 14 - индукцию $B_\delta=0,265$ Тл. Используем полюсный наконечник (шляпку) (рис. 5.16), площадь которого находим из формулы (5.32)

$$S_{шл} = 2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5 / 0,265^2 = 1,79 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

тогда диаметр

$$d_{шл} = \sqrt{4 \cdot S_{шл} / \pi} = \sqrt{4 \cdot 1,79 \cdot 10^{-4} / \pi} = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

По (5.21) находим поток $\Phi_\delta=0,265 \cdot 1,79 \cdot 10^{-4}=0,47 \cdot 10^{-4}$ Вб, а затем по (5.26) поток в сердечнике, задавшись коэффициентом рассеяния $\sigma = 1,3$: $\Phi_c = 13 \cdot 0,47 \cdot 10^{-4}=0,61 \cdot 10^{-4}$ Вб. Задаемся значением $B_c = 0,8$ Тл [14] и из (5.21) находим площадь $S_c=0,61 \cdot 10^{-4} / 0,8=0,76 \cdot 10^{-4}$ м²; тогда диаметр

$$d_c = \sqrt{4 \cdot 0,76 \cdot 10^{-4} / \pi} = 0,98 \cdot 10^{-2} \approx 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Для нахождения остальных размеров, приняв коэффициенты $k_n=1,25$ и $k_z = 1,4$, определим с помощью формул (5.18а), (5.49) и (5.50)

$$F_y = 1,4 \cdot 1,25 \cdot 0,265 \cdot 0,25 \cdot 10^{-2} / (4\pi \cdot 10^{-7}) = 923 \text{ А}.$$

Задаввшись коэффициентами $k_{зм}=0,6$, $k_t=10$ Вт/(м²·°С), $n=4$ и превышением температуры ($\vartheta_{доп} - \vartheta_0$)=70°С ($\rho \vartheta = 2,34 \cdot 10^{-8}$ Ом·м), находим по (5.48)

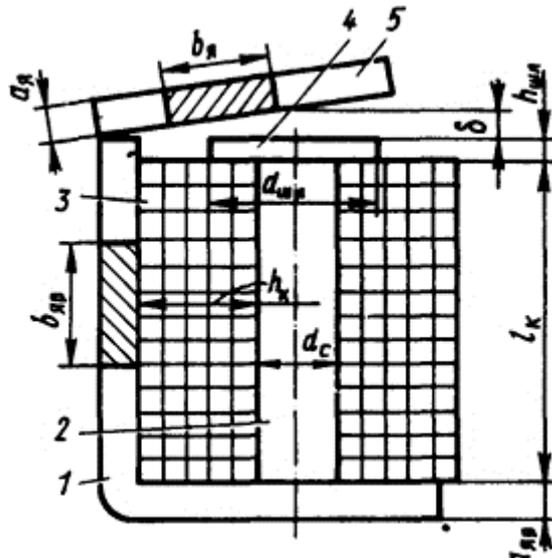


Рис. 5.16. Клапанный электромагнит постоянного тока: 1 - ярмо (корпус); 2 - сердечник; 3 - намагничивающая катушка; 4 - полюсный наконечник (шляпка); 5 - якорь

$$l_k = \sqrt[3]{\frac{923^2 \cdot 2,34 \cdot 10^{-8.4}}{2 \cdot 0,6 \cdot 10 \cdot 70}} = 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

при этом

$$h_k = 4,5 \cdot 10^{-2} / 4 = 1,125 \cdot 10^{-2} \approx 1,15 \cdot 10^{-2} \text{ м,}$$

а диаметр катушки

$$D_k = d_c + 2h_k = 1 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 1,15 \cdot 10^{-2} = 3,3 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

138

Используем рекомендуемые соотношения размеров [14]: ширина ярма $b_{я} = D_k$; толщина ярма $a_{я} \geq S_c / b_{я}$; ширина якоря (над шляпкой) $b_{я} \geq d_{шл}$, площадь сечения якоря $S_{я} = (0,5 \dots 0,8) S_c$; толщина якоря $a_{я} = S_{я} / b_{я}$; толщина $h_{шл} \geq d_c / 4$. Вычисляем искомые размеры:

$$b_{я} = 3,3 \cdot 10^{-2} \text{ м; } a_{я} \geq 0,785 \cdot 10^{-4} / (3,3 \cdot 10^{-2}) \geq 0,24 \cdot 10^{-2} \approx 0,3 \cdot 10^{-2} \text{ м,}$$

где

$$S_c = \pi d_c^2 / 4 = \pi (1 \cdot 10^{-2})^2 / 4 = 0,785 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \quad b_{я} \geq 1,5 \cdot 10^{-2} = 1,7 \cdot 10^{-2} \text{ м;}$$

$$S_{я} = 0,6 \cdot 0,785 \cdot 10^{-4} = 0,47 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$a_{я} = 0,47 \cdot 10^{-4} / (1,7 \cdot 10^{-2}) = 0,28 \cdot 10^{-2} \text{ м;}$$

$$h_{шл} \geq 1 \cdot 10^{-2} / 4 = 0,25 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Производя проверочный расчет магнитной цепи и обмоточных данных, можно уточнить выбранные коэффициенты и искомые размеры.

$$\text{Ответ: } d_c = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м; } d_{шл} = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м; } h_{шл} = 0,25 \cdot 10^{-2} \text{ м; } l_c = l_k = 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ м; } h_k = 1,15 \cdot 10^{-2} \text{ м; } b_{я} = D_k = 3,3 \cdot 10^{-2} \text{ м; } a_{я} = 0,3 \cdot 10^{-2} \text{ м; } b_{я} = 1,7 \cdot 10^{-2} \text{ м; } a_{я} = 0,28 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

5.2.10. Решить задачу 5.2.9 при $P_3=15$ Н и $\delta=0,2 \cdot 10^{-2}$ м.

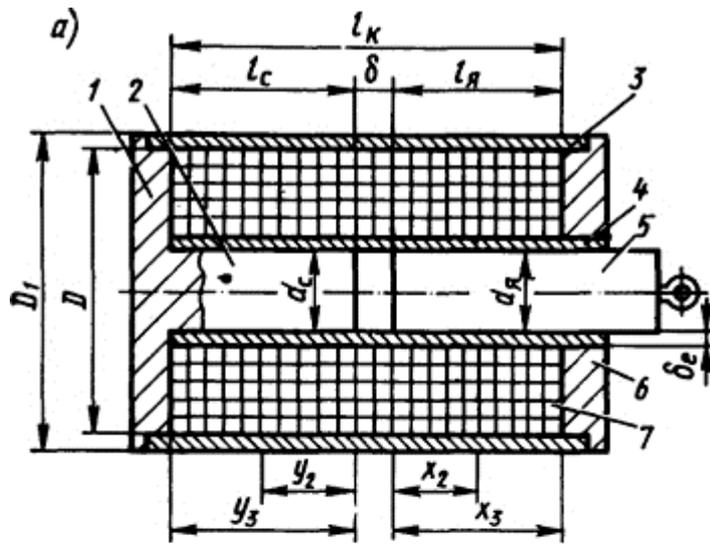
5.2.11. Для броневоегo электромагнита (рис. 5.17, а) рассчитать по коэффициентам рассеяния и построить эпюру распределения потока вдоль его оси, взяв координаты сечения якоря $x_1=0$; $x_2=0,5 l_{я}$; $x_3=l_{я}$ и стопа - $y_1=0$; $y_2=0,5 l_c$; $y_3 = l_c$. Рабочий зазор $\delta=0,4 \cdot 10^{-2}$ м, паразитный зазор $\delta_e=0,15 \cdot 10^{-2}$ м; $l_k=8,8 \cdot 10^{-2}$ м; $l_c=4,2 \cdot 10^{-2}$ м; $d=3,3 \cdot 10^{-2}$ м; проводимости рабочего и паразитного зазоров: $\Lambda_\delta=38,1 \cdot 10^{-8}$ Гн и $\Lambda_e=100 \cdot 10^{-8}$ Гн; их суммарная проводимость $\Lambda_\Sigma=27,6 \cdot 10^{-8}$ Гн; удельная проводимость рассеяния $\lambda_\sigma=9 \cdot 10^{-6}$ Гн/м. Число витков обмотки $N=2420$, ток трогания $I=1$ А. Падение МДС в стали не учитывать.

О т в е т : $\Phi_{x1}=\Phi_{y1}=\Phi_\delta=6,7 \cdot 10^{-4}$ Вб; $\Phi_{x2}=\Phi_{y2}=8 \cdot 10^{-4}$ Вб; $\Phi_{x3} = \Phi_{y3} = \Phi_e = \Phi_0 = 8,3 \cdot 10^{-4}$ Вб. Эпюра потоков показана на рис. 5.17, б.

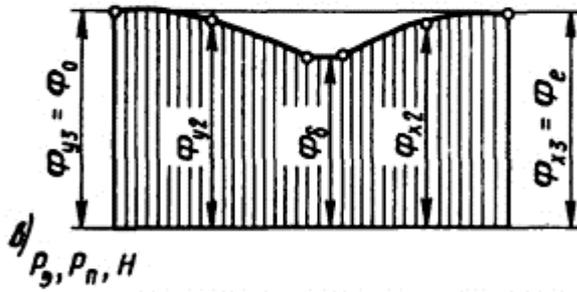
5.2.12. Определить МДС броневоегo электромагнита с плоским торцом якоря (см. рис. 5.17, а), который должен развивать при конечном зазоре $\delta_k=0,1 \cdot 10^{-2}$ м силу $P_3=480$ Н. Параметры Λ_e и λ_σ , а также размеры электромагнита взять из задачи 5.2.11; проводимость конечного зазора $\Lambda_{\delta k}=117 \cdot 10^{-8}$ Гн; материал магнитопровода - сталь марки 10. Магнитный поток во всех сечениях магнитопровода считать одинаковым и равным потоку в зазоре δ_e .

О т в е т : $F=2450$ А.

5.2.13. Используя условия задачи 5.2.11 для броневоегo электромагнита ($\delta = 0,4 \cdot 10^{-2}$ м; $F=2450$ А) и учитывая влияние паразитного зазора и рассеяния, вычислить по энергетической формуле электромагнитную силу. Падением МДС в стали пренебречь. Максимальный коэффициент рассеяния якоря $\sigma_{x3} = 1,24$.



б)



в)

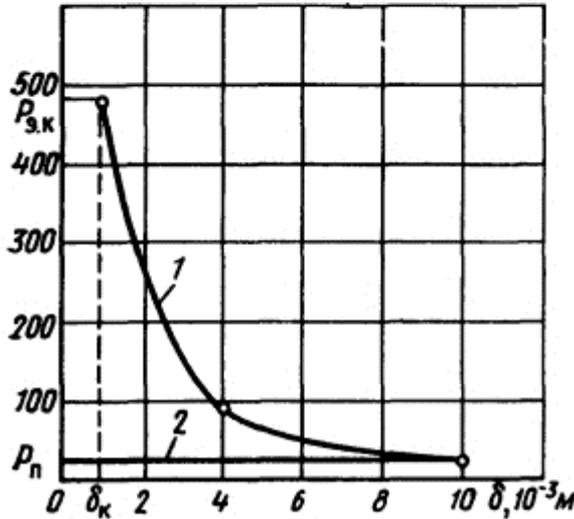


Рис. 5.17. Броневого электромагнит постоянного тока:

a - эскиз электромагнита: 1 - фланец (основание) с неподвижным сердечником (стопом) 2; 3 - корпус в виде полого цилиндра; 4 - немагнитная направляющая втулка (являющаяся на длине $l_я$ подшипником скольжения); 5 - подвижный сердечник (якорь); 6 - фланец; 7 - намагничивающая обмотка; б - эпюра распределения магнитного потока вдоль оси электромагнита; в - тяговая (1) и противодействующая (2) характеристики броневого электромагнита с якорем, имеющим плоский конец ($d_я=d_c=d$)

Решение. По формулам (5.18) и (5.19) выразим через поток в рабочем зазоре составляющие МДС $F_{\delta} = \Phi_{\delta} / (38,1 \cdot 10^{-8})$ и $F_e = \Phi_{\delta} \cdot 1,24 / (100 \cdot 10^{-8})$, причем Λ_{δ} и Λ_e взяты из задачи 5.2.11, и подставим их в (5.17):

$$2450 = \Phi_{\delta} / (38,1 \cdot 10^{-8}) + (\Phi_{\delta} \cdot 1,24) / (100 \cdot 10^{-8}),$$

откуда

$$\Phi_{\delta} = 2450 \frac{38,1 \cdot 10^{-8} \cdot 100 \cdot 10^{-8}}{100 \cdot 10^{-8} + 38,1 \cdot 10^{-8} \cdot 1,24} = 6,3 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$$

Тогда электромагнитная сила согласно (5.34) равна

$$P_3 = \frac{1}{2} \cdot (1653,5)^2 \left[67,2 \cdot 10^{-6} + 9 \cdot 10^{-6} \left(\frac{4,2 \cdot 10^{-2}}{8,8 \cdot 10^{-2}} \right)^2 \right] = 94,7 \text{ Н,}$$

где

$$F_{\delta} = 6,3 \cdot 10^{-4} / (38,1 \cdot 10^{-8}) = 1653,5 \text{ А, производная}$$

$$\left| \frac{d\Lambda_{\delta}}{d\delta} \right| = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\pi (3,3 \cdot 10^{-2})^2}{4 \cdot (0,4 \cdot 10^{-2})^2} = 67,2 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$$

в соответствии с формулой (5.35а), а $l_{я} = 8,80 \cdot 10^{-2} - (4,2 \cdot 10^{-2} + 0,4 \cdot 10^{-2}) = 4,2 \cdot 10^{-2}$ м - согласно (5.28).

О т в е т : $P_3 = 94,7$ Н.

5.2.14. Определить электромагнитную силу броневого электромагнита (условия те же, что в задаче 5.2.13) при $\delta =$

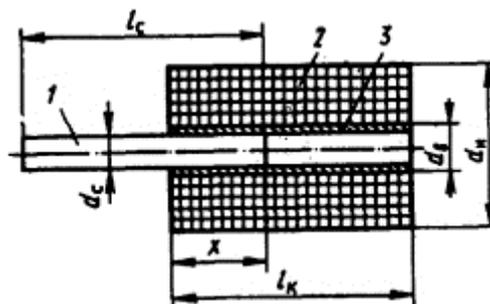


Рис. 5.18. Соленоидный электромагнит постоянного тока: 1 - подвижный сердечник (якорь); 2 - катушка намагничивания; 3 - немагнитная (латунная) направляющая втулка

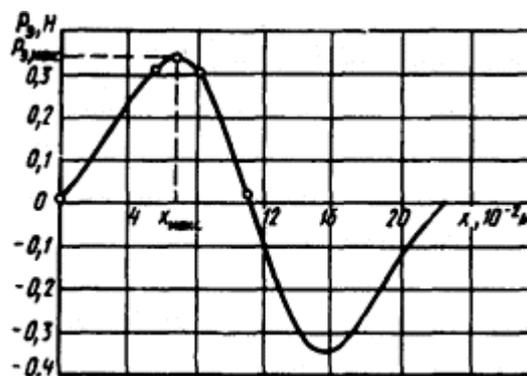


Рис. 5.19. Знакопеременная тяговая характеристика соленоидного электромагнита (сила меняет знак и кривая располагается симметрично)

$= 1 \cdot 10^{-2}$ м; $\Lambda_\delta = 19,8 \cdot 10^{-8}$ Гн; $\Lambda_\epsilon = 100 \cdot 10^{-8}$ Гн; $\lambda_\sigma = 9 \cdot 10^{-6}$ Гн/м. По данным задач 5.2.12...5.2.14 построить зависимость $P_3 = f(\delta)$.

О т в е т : $P_3 = 23$ Н; зависимость $P_3 = f(\delta)$ показана на рис. 5.17, в.

5.2.15. Для соленоидного электромагнита, показанного на рис. 5.18, найти максимальное значение силы $P_{3 \text{ макс}}$ и соответствующую координату $x_{\text{макс}}$ (рис. 5.19). Размеры электромагнита: диаметр и длина сердечника $d_c = 1,7 \cdot 10^{-2}$ м, $l_c = 11 \cdot 10^{-2}$ м; длина катушки $l_k = l_c$; наружный диаметр катушки $d_n = 7 \cdot 10^{-2}$ м,

141

внутренний - $d_b = 2 \cdot 10^{-2}$ м. Число витков обмотки $N = 2000$, ток обмотки $I = 0,5$ А.

Р е ш е н и е . Вычислим по (5.39)...(5.43) коэффициенты

$$a = 7,85 \cdot 10^{-6} \times [(11 \cdot 10^{-2} / 1,7 \cdot 10^{-2}) - 2,9] = 28 \cdot 10^{-6} \text{ Н/А}^2;$$

$$b = 1,2 (11 \cdot 10^{-2} / 11 \cdot 10^{-2}) - 0,18 = 1,02;$$

$$c = 0,7 [1,29 + (1,7 \cdot 10^{-2} / 4,5 \cdot 10^{-2})^{2,75}] = 0,95$$

здесь $d_{\text{ср}} = 0,5 (7 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 10^{-2}) = 4,5 \cdot 10^{-2}$ м;

$$\beta_c = 1,7 \cdot 10^{-2} / (4 \cdot 11 \cdot 10^{-2}) = 0,039;$$

$$\alpha = \sqrt{1 + (4,5 \cdot 10^{-2} / 2 \cdot 11 \cdot 10^{-2})^2} - (4,5 \cdot 10^{-2} / 2 \cdot 11 \cdot 10^{-2}) = 0,82.$$

Подставив их в (5.38), получим

$$P_{3 \text{ макс}} = 28 \cdot 10^{-6} \cdot 1,02 \cdot 0,95 \cdot 0,039 \cdot 0,82^2 \times (0,5 \cdot 2000 / 11 \cdot 10^{-2})^2 \times \\ \times \pi \cdot 1,7 \cdot 10^{-2} \cdot 11 \cdot 10^{-2} = 0,34 \text{ Н.}$$

Соответствующее положение сердечника находим по (5.46):

$$x_{\text{макс}} = \sqrt{11 \cdot 10^{-2} \cdot 11 \cdot 10^{-2}} (0,626 - 0,033) / 0,95 = 6,9 \cdot 10^{-2} \text{ м,}$$

где коэффициент φ согласно (5.45) равен

$$\varphi = 0,8 [4,5 \cdot 10^{-2} / (2 \cdot 11 \cdot 10^{-2})]^2 = 0,033.$$

5.2.16. Решить задачу 5.2.15 при условии, что $l_c = 1,2 l_k$.

5.2.17. Для соленоидного электромагнита, рассмотренного в задаче 5.2.15, рассчитать электромагнитную силу при $x = 0,75 l_c$.

Р е ш е н и е . Так как $P_{3 \text{ макс}} = 0,34$ Н, а $\varphi = 0,033$, то, используя формулы (5.44) и (5.37), определим при $x = 0,75 \cdot 11 \cdot 10^{-2} = 8,25 \cdot 10^{-2}$ м:

$$f(x) = 0,91 \sin \left[\pi \left(0,033 + \frac{0,95 \cdot 8,25 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{11 \cdot 10^{-2} \cdot 11 \cdot 10^{-2}}} \right) \right] - \\ - 0,25 \sin \left[2\pi \left(0,033 + \frac{0,95 \cdot 8,25 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{11 \cdot 10^{-2} \cdot 11 \cdot 10^{-2}}} \right) \right] = 0,9;$$

5.2.18. Решить предыдущую задачу при $x=0; 0,5 l_k; l_k; 1,5 l_k; 2l_k$. По результатам решения задач 5.2.15, 5.2.17 и 5.2.18 построить зависимость $P_3=f(x)$.

О т в е т: $P_3 = 0,015; 0,31; 0,025; -0,33$ и $-0,03$ Н. Зависимость $P_3=f(x)$ приведена на рис. 5.19.

5.2.19. Определить коэффициент возврата k_b броневого электромагнита по его тяговой характеристике $P_3=f(\delta)$ и характеристике противодействующих сил $P_{пр}=f(\delta)$ (см. рис. 5.17, в).

Р е ш е н и е. При конечном зазоре в соответствии с рис. 5.17, в электромагнитная и противодействующая силы соответственно равны: $P_{3к}=480$ Н.

142

$P_{пр} = 23$ Н; тогда их разность $\Delta P = P_{3к} - P_{пр} = 480 - 23 = 457$ Н. Коэффициент возврата находим по (5.63):

$$k_b = \sqrt{1 - (457/480)} = 0,22.$$

О т в е т: $k_b=0,22$.

5.2.20. Решить задачу 5.2.19 для случая, когда противодействующая характеристика является касательной к тяговой в точке

143

¹См.: С ливанская А.Г., Федькина А.А. Расчет электромагнитной силы соленоидных; электромагнитов//Электромеханика. 1975. № 11. С. 39-40.

²См.: С ливийская А.Г., Бородин М.Г. Оценка применимости упрощенных аналитических формул для определения коэффициента возврата и временных параметров электромагнитов постоянного тока//Тр. МЭИ. Производство, электрические свойства и эксплуатация элементов электромеханических устройств. 1975. Вып. 211. С. 91-99.

³При увеличении числа участков точность расчета повышается, при этом используются расчеты на вычислительных машинах [25, 26].