

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»**

Н.Ю. Сипайлова, Р.Я. Кляйн, Е.П. Богданов

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2012

УДК 621.31(075.8)

ББК 31.264я73

С39

Электрические аппараты: учебное пособие / сост.: Н.Ю. Сипайлова, Р.Я. Кляйн, Е.П. Богданов; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 88 с.

Пособие содержит краткие методические рекомендации по изучению физических явлений в электрических аппаратах, теоретический материал, примеры решения задач, задачи для решения, а также справочный материал. Пособие способствует укреплению знаний в области физических процессов, протекающих в электрических аппаратах, получению навыков решения практических задач и подготовке к проектированию электрических аппаратов.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника».

УДК 621.31(075.8)

ББК 31.264я73

Рецензенты

Кандидат технических наук,
директор по технологии и качеству ОАО «Сибэлектромотор»

А.Э. Гусельников

Кандидат технических наук,
зам. директора по технике и управлению качеством
ОАО «Томский электромеханический завод»

В.В. Големгрейн

Кандидат технических наук, доцент ТПУ

С.Г. Обухов

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2012

© Сипайлова Н.Ю., Кляйн Р.Я., Богданов Е.П., 2012

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	4
1. Электрические контакты аппаратов.....	4
1.1. Методические указания.....	4
1.2. Краткие теоретические сведения.....	5
1.3. Примеры решения задач.....	8
1.4. Задачи для решения.....	11
2. Электрическая дуга и дугогашение.....	12
2.1. Методические указания.....	12
2.2. Краткие теоретические сведения.....	12
2.3. Примеры решения задач.....	16
2.4. Задачи для решения.....	18
3. Нагрев и охлаждение электрических аппаратов.....	20
3.1. Методические указания.....	20
3.2. Краткие теоретические сведения.....	20
3.3. Примеры решения задач.....	26
3.4. Задачи для решения.....	32
4. Электродинамические силы.....	34
4.1. Методические указания.....	34
4.2. Краткие теоретические сведения.....	35
4.3. Примеры решения задач.....	40
4.4. Задачи для решения.....	44
5. Магнитные цепи электрических аппаратов.....	46
5.1. Методические указания.....	46
5.2. Краткие теоретические сведения.....	47
5.3. Примеры решения задач.....	50
5.4. Задачи для решения.....	52
6. Электромагниты.....	54
6.1. Методические указания.....	54
6.2. Краткие теоретические сведения.....	55
6.3. Примеры решения задач.....	62
6.4. Задачи для решения.....	65
Приложение.....	68
Список литературы.....	87

ПРЕДИСЛОВИЕ

Решение задач по курсу «Электрические и электронные аппараты» способствует повышению качества усвоения теоретического материала, более глубокому пониманию физических процессов, протекающих в электрических аппаратах, а также моделей, описывающих эти процессы.

Приобретение навыков в расчетах элементов электрических аппаратов позволяет студентам подготовиться к проектированию электрических аппаратов.

Актуальность учебного пособия обусловлена переходом на новые образовательные программы, введением в образовательную программу практических занятий и необходимостью акцентировать внимание на формировании практических навыков и умений при обучении студентов.

Настоящее пособие предназначено как для аудиторных занятий, так и для организации самостоятельной работы студентов.

Пособие включает шесть разделов и приложение, в котором содержится справочный материал, необходимый для решения задач.

Каждый раздел предваряется краткими методическими рекомендациями по подготовке к решению задач и теоретическим материалом, а также содержит необходимые расчетные формулы и примеры решения типовых задач.

1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ АППАРАТОВ

1.1. Методические указания

Для решения задач данного раздела необходимо:

уяснить понятия переходного сопротивления и факторы, влияющие на его величину;

изучить модели и формулы для определения сопротивления стягивания;

усвоить условия выбора контактного нажатия, сущность таких явлений, как сваривание контактов, вибрация (дребезг) при замыкании, коррозия, эрозия и дуговой износ;

изучить режимы работы контактов (замыкание, замкнутое состояние, размыкание);

усвоить модели и формулы для определения температуры контактов и тока сваривания [1-5].

1.2. Краткие теоретические сведения

Сопротивление контакта (переходное сопротивление) R_k складывается из сопротивления стягивания R_c и сопротивления пленок $R_{пл}$

$$R_k = R_c + R_{пл}. \quad (1.1)$$

Сопротивление стягивания обусловлено стягиванием линий тока к местам истинного касания контактирующих проводников и зависит от материала и обработки контактирующих проводников, числа площадок касания, силы сжатия.

Сопротивление пленок обусловлено загрязнением или окислением поверхностей контактирующих проводников и может меняться в процессе эксплуатации. Возникновение пленок на поверхности контактов зависит от материала контактов, температуры среды, в которой находятся контакты.

Для расчета сопротивления стягивания разработаны различные упрощающие модели контактирования.

В одной из простейших моделей Хольма площадка касания представляет собой круг радиуса a .

Сопротивление стягивания при этом определяется выражением

$$R_c = \rho / (2na), \quad (1.2)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала контактов; n – число одинаковых площадок касания.

Радиус площадки касания в случае упругой деформации при сжатии контактов силой F гладких поверхностей шар – плоскость из одинаковых материалов определяется формулой Герца

$$a_{шп} = 1,11 \sqrt[3]{Fr / (En)}, \quad (1.3)$$

где r – радиус шара; E – модуль упругости;

при сжатии двух одинаковых шаровых поверхностей – выражением

$$a_{шш} = 0,86 \sqrt[3]{Fr / (En)}. \quad (1.4)$$

Если деформация при сжатии контактов носит пластический характер, то радиус площадки касания определяется как

$$a = \sqrt{F / (\pi \sigma_{см})}, \quad (1.5)$$

где $\sigma_{см}$ – временное сопротивление смятия материала контактов.

Для практических расчетов сопротивления контакта часто используют эмпирическую формулу

$$R_k = K_0 / F^m. \quad (1.6)$$

Значения коэффициента K_0 приводятся в справочных таблицах (табл. П.6). Показатель степени m принимается равным: для точечного

контакта ($n = 1$) – 0,5; для линейного ($n = 2$) – 0,5-0,8; для плоскостного ($n \geq 3$) – 1.

В контактном соединении можно выделить зону стягивания, протяженность которой невелика и в которой сосредоточено переходное сопротивление. Теплота, генерируемая в этой зоне, распространяется от площадки касания в прилегающие части проводников только за счет теплопроводности, а затем – в окружающую среду.

Уравнение распределения превышения температуры вдоль проводника выглядит следующим образом

$$\tau(x) = \tau_n + \frac{1}{2} I^2 R_k \frac{1}{p \lambda q} e^{-px}, \quad (1.7)$$

где τ_n – превышение температуры проводника над температурой окружающей среды при $x \rightarrow \infty$; $p = \sqrt{k_{то} \Pi_0 / (\lambda \cdot q)}$; $k_{то}$ – коэффициент теплоотдачи с боковой поверхности проводника; Π_0 – периметр боковой поверхности проводника; λ – теплопроводность проводника; q – площадь поперечного сечения проводника.

Превышение температуры тела контакта (превышение температуры границы области стягивания $x = 0$)

$$\tau_k = \tau_n + \frac{1}{2} I^2 R_k \frac{1}{p \lambda q}. \quad (1.8)$$

Если расстояние между двумя соседними контактами удовлетворяет условию $l > 5 \sqrt{\lambda q / (k_{то} \Pi_0)}$, то взаимным тепловым влиянием контактов можно пренебречь.

На основании теоремы Кольрауша и Диссельхорста для идеализированной модели контактирования (в симметричной области стягивания все эквипотенциальные поверхности являются изотермическими) выводится уравнение, связывающее падение напряжения на контакте U_k с температурой площадки касания θ_a

$$U_k^2 / 4 = L(\theta_a^2 - \theta_k^2), \quad (1.9)$$

где θ_k – температура на границе зоны стягивания ($x = 0$), L – постоянная, для большинства металлов близкая к $L = 24 \times 10^{-8} \text{ В}^2 \text{ К}^{-2}$.

Температура площадки касания связана с температурой тела контакта

$$\theta_a = \theta_k \sqrt{1 + tg^2 \left(\frac{I}{4a} \sqrt{\frac{\lambda \rho_0}{\alpha}} \right)}, \quad (1.10)$$

где α – температурный коэффициент сопротивления.

Из (1.9) следует, что для данного материала существуют определенные падения напряжения на контакте, при которых температура площадки касания достигает значений, определяющих фазовое состояние материала (рекристаллизации или размягчения, плавления, кипения).

Для слаботочных контактов принимают, что допустимое падение напряжения не должно превосходить напряжения размягчения $U_{к.доп} \leq (0,5 - 0,8)U_p$.

Если известен ток I , который должны пропускать контакты, то можно найти допустимое сопротивление контакта

$$R_{к.доп} = U_{к.доп} / I. \quad (1.11)$$

При выбранном материале контактов знание сопротивления контактов позволяет отыскать необходимую силу сжатия контактов.

Расчет одноточечных контактов на большие токи ведется по выражению

$$F = I_n^2 \frac{B\pi HV}{16\lambda^2 (\arccos \frac{\theta}{a})^2}, \quad (1.12)$$

где I_n – номинальный ток; F – сила контактного нажатия; HV – твердость по Виккерсу; B – число Лоренца.

Токи короткого замыкания и длительные токи перегрузки могут привести к расплавлению материала контактов и их свариванию.

Минимальный плавящий ток определяется выражением

$$I_{пл\infty} = a_{пл} \sqrt{\frac{32\lambda_{пл} \theta_{к}}{\rho_{пл}}}. \quad (1.13)$$

В этом выражении все величины должны быть взяты при температуре плавления. Размеры площадки касания при температуре плавления $a_{пл} = 1,5a$.

Минимальный плавящий ток с учетом изменения температуры во времени

$$I_{пл}(t) = I_{пл\infty} F(\xi), \quad (1.14)$$

где функция $F(\xi)$ выбирается по рисункам в зависимости от $\xi = \frac{a}{2} \sqrt{\frac{c\gamma}{\lambda t}}$,

c – удельная теплоемкость материала; γ – плотность материала.

При практических расчетах используют эмпирическую зависимость между минимальным током сваривания $I_{св.мин}$ и силой сжатия контактов

$$I \leq I_{\text{св.мин}} = k\sqrt{F}. \quad (1.15)$$

Коэффициент k зависит от свойств материала и конструкции контактов (табл. П.8). Для медных и латунных контактов по опытным данным величина $k = 1000 - 2000 \text{ А/Н}^{1/2}$.

1.3. Примеры решения задач

1.1. Два круглых медных стержня на торцах обработаны под сферу $r = 40 \text{ мм}$ и стянуты силой $F = 100 \text{ Н}$. Определить сопротивление стягивания R_c .

Решение. Найдём радиус площади касания при условии, что имеет место упругая деформация (1.4)

$$a = 0,86 \cdot \sqrt[3]{\frac{F \cdot r}{E}} = 0,86 \cdot \sqrt[3]{\frac{100 \cdot 40 \cdot 10^{-3}}{10,8 \cdot 10^{10}}} = 2,87 \cdot 10^{-4} \text{ м},$$

где $E = 10,8 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ – модуль упругости меди (табл. П.4).

Механическое напряжение в контактной площадке

$$\sigma = \frac{F}{\pi \cdot a^2} = \frac{100}{3,14 \cdot (2,87 \cdot 10^{-4})^2} = 38,7 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2.$$

Это напряжение больше, чем напряжение смятия меди $\sigma_{\text{см}} = 38,3 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$ и, следовательно, будет иметь место пластическая деформация.

Радиус площадки касания при пластической деформации определим по формуле (1.5)

$$a = \sqrt{F / (\pi \cdot \sigma_{\text{см}})} = \sqrt{100 / (3,14 \cdot 38,3 \cdot 10^7)} = 2,88 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

Сопротивление стягивания будет равно

$$R_c = \frac{\rho}{2a} = \frac{1,62 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 2,88 \cdot 10^{-4}} = 0,28 \cdot 10^{-4} \text{ Ом},$$

где $\rho = 1,62 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ – удельное сопротивление меди (табл. П.4).

Ответ: $R_c = 0,28 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$.

1.2. Определить величину F контактного нажатия мостикового контакта, если через контакт протекает ток $I = 5 \text{ А}$, а контакты изготовлены из серебряных накладок полусферической формы радиуса $r = 1 \text{ см}$.

Решение. Для надежной работы контактов необходимо, чтобы падение напряжения на них было меньше напряжения размягчения $U_{\text{к.доп}} \leq (0,5 - 0,8) \cdot U_{\text{разм}}$.

Примем, что $U_{\text{к.доп}} = 0,5U_{\text{разм}}$ (по табл. П.7 для серебра $U_{\text{разм}} = 0,09 \text{ В}$).

Допустимое сопротивление контактов

$$R_{\text{к.доп}} = \frac{U_{\text{к.доп}}}{I} = \frac{0,5 \cdot 0,09}{5} = 9 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Определим радиус площадки касания (1.2)

$$a = \frac{\rho}{2R_{\text{к.доп}}} = \frac{1,5 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 9 \cdot 10^{-3}} = 0,083 \cdot 10^{-5} \text{ м,}$$

где $\rho = 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ – удельное сопротивление серебра.

В случае упругой деформации при контактировании двух сферических поверхностей радиус площади касания (1.4)

$$a = 0,86 \cdot \sqrt[3]{\frac{F \cdot r}{E}}.$$

Откуда сила нажатия на один контакт

$$F = \frac{a^3 \cdot E}{0,86^3 \cdot r} = \frac{(0,083 \cdot 10^{-5})^3 \cdot 7,4 \cdot 10^{10}}{0,86^3 \cdot 10^{-2}} = 6,65 \cdot 10^{-6} \text{ Н,}$$

где $E = 7,4 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ – модуль упругости серебра.

Так как мостик имеет два контакта, суммарная сила контактов

$$F_{\text{к}} = 2 \cdot F = 2 \cdot 6,65 \cdot 10^{-6} = 13,3 \cdot 10^{-6} \text{ Н.}$$

Ответ: $F_{\text{к}} = 13,3 \cdot 10^{-6} \text{ Н.}$

1.3. Определить температуру контакта, выполненного в виде двух плоских медных шин размером $60 \times 10 \text{ мм} \times \text{мм}$, составленных встык и сжатых силой $F = 300 \text{ Н}$. Через контакт протекает ток $I = 1600 \text{ А}$, шины находятся в воздухе, температуре которого $\theta_0 = 35 \text{ }^\circ\text{С}$, коэффициент теплоотдачи с поверхностей шин $k_{\text{то}} = 16 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{С})$. Шины бесконечно длинные.

Решение. Определим установившееся значение температуры шины в точках, удаленных от места контактирования из условия (раздел 3)

$$\theta - \theta_0 = I^2 \rho_0 (1 + \alpha \theta) / (q \cdot k_{\text{то}} \cdot \Pi_0),$$

где $\theta - \theta_0$ – превышение температуры тела над температурой окружающей среды; $\alpha = 0,0043 \text{ 1/}^\circ\text{С}$ – температурный коэффициент меди; $q = 600 \text{ мм}^2$ – сечение проводника; $\Pi_0 = 2 \cdot (60 + 10) = 140 \text{ мм}$ – периметр проводника.

Получим температуру проводника

$$\theta_{\text{пр}} = \frac{\theta_0 \cdot k_{\text{то}} \cdot q \cdot \Pi_0 + I^2 \cdot \rho_0}{k_{\text{то}} \cdot q \cdot \Pi_0 - I^2 \cdot \rho_0 \cdot \alpha} =$$

$$= \frac{35 \cdot 16 \cdot 600 \cdot 10^{-6} \cdot 140 \cdot 10^{-3} + 1600^2 \cdot 1,62 \cdot 10^{-8}}{16 \cdot 600 \cdot 10^{-6} \cdot 140 \cdot 10^{-3} - 1600^2 \cdot 1,62 \cdot 10^{-8} \cdot 0,0043} = 75,9^\circ \text{C}.$$

Температура контакта в соответствии с (1.7)

$$\theta_{\text{к}} = \theta_{\text{пр}} + \frac{1}{2} I^2 \cdot R_{\text{к}} \cdot \frac{1}{p \lambda q} =$$

$$= 75,9 + \frac{1}{2} 1600^2 \cdot 1,33 \cdot 10^{-6} \frac{1}{3,094 \cdot 390 \cdot 600 \cdot 10^{-6}} = 78^\circ \text{C},$$

где $p = \sqrt{k_{\text{то}} \cdot \Pi_0 / (\lambda \cdot q)} = \sqrt{16 \cdot 140 \cdot 10^{-3} / (390 \cdot 600 \cdot 10^{-6})} = 3,094 \text{ 1/м}^2$;

$R_{\text{к}} = K_0 / F = 400 \cdot 10^{-6} / 300 = 1,33 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$ – сопротивление плоскостного контакта, рассчитанное по эмпирической формуле (1.6);
 $\lambda = 390 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ \text{C)}$ – теплопроводность меди.

Ответ: $\theta_{\text{к}} = 78^\circ \text{C}$.

1.4. Определить минимальный сваривающий ток розеточного контакта из меди, если сила $F = 50 \text{ Н}$ на одну ламель, всего ламелей 6 штук.

Решение. В практических расчетах можно воспользоваться формулой Буткевича, которая непосредственно связывает минимальный сваривающий ток и силу контактного нажатия.

Для одной ламели по (1.15)

$$I_{\text{св.мин1}} = k \sqrt{F} = 6000 \sqrt{50 / 9,81} = 13545,7 \text{ А},$$

где $k = 6000 \text{ А/кг}^{0,5}$ – коэффициент, выбираемый из справочника по типу контакта и материалу, из которого сделан контакт (табл. П.8).

Для всего контакта

$$I_{\text{св.мин6}} = 6 \cdot 13545,7 = 81274 \text{ А}.$$

Ответ: $I_{\text{св.мин6}} = 81274 \text{ А}$.

1.5. Два медных стержня диаметром $d = 20 \text{ мм}$ сжаты силой $F = 390 \text{ Н}$. Торцы обработаны под сферу $r = 10 \text{ мм}$. Определить какой постоянный ток в течение времени $t = 0,2 \text{ с}$ контакты выдержат без сваривания.

Решение. Минимальный плавящий ток можно определить по формуле (1.13)

$$I_{\text{пл}\infty} = a_{\text{пл}} \sqrt{\frac{32\lambda\theta_{\text{пл}}}{\rho_{\text{пл}}}} = 8,55 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{32 \cdot 390 \cdot 1083}{9,164 \cdot 10^{-8}}} = 10383,5 \text{ А},$$

где $\theta_{\text{пл}} = 1083 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – температура плавления меди;
 $\rho_{\text{пл}} = \rho_0(1 + \alpha\theta_{\text{пл}}) = 1,62 \cdot 10^{-8}(1 + 0,0043 \cdot 1083) = 9,164 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ – удельное сопротивление меди при температуре плавления;
 $a = \sqrt{F/(\pi \cdot \sigma_{\text{см}})} = \sqrt{390/(3,14 \cdot 38,3 \cdot 10^7)} = 5,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ – радиус площадки касания (при температуре плавления радиус площадки касания $a_{\text{пл}} = 1,5a = 1,5 \cdot 5,7 \cdot 10^{-4} = 8,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$).

Изменение температуры во времени определяется безразмерным комплексом ξ

$$\xi = \frac{a_{\text{пл}}}{2} \sqrt{\frac{c\gamma}{\lambda t}} = \frac{8,55 \cdot 10^{-4}}{2} \sqrt{\frac{390 \cdot 8700}{390 \cdot 0,2}} = 0,0892,$$

где $c = 390 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$ – удельная теплоемкость меди; $\gamma = 8700 \text{ кг}/\text{м}^3$ – плотность меди.

Ток, плавящий площадку за время t по (1.14)

$$I_{\text{пл}} = I_{\text{пл}\infty} \cdot F(\xi) = 10383,5 \cdot 1,1 = 11421,9 \text{ А},$$

где $F(\xi) = 1,1$ – функция, определяемая по графику (рис. П.1).

Ответ: $I_{\text{пл}} = 11421,9 \text{ А}$.

1.4. Задачи для решения

1.6. Между двумя плоскими медными шинами находятся два медных шарика с радиусом $r = 10 \text{ мм}$. Шины стянуты силой $F = 200 \text{ Н}$. Определить величину сопротивления стягивания.

1.7. Контакты реле выполнены в виде напаяк серебром, радиус их кривизны $r = 5 \text{ мм}$. Определить величину сопротивления стягивания этих контактов, если сила контактного нажатия $F = 10^{-2} \text{ Н}$.

1.8. Определить величину контактного сопротивления розеточного контакта выключателя, если розетка состоит из шести самоустанавливающихся ламелей, а сила, прижимающая ламель к контактному стержню, $F = 50 \text{ Н}$. Материал розетки и стержня – медь. Использовать эмпирическую формулу.

1.9. Определить величину контактного сопротивления пальцевого самоустанавливающегося контакта, если контактное нажатие $F = 250 \text{ Н}$, подвижный контакт выполнен из латуни, неподвижный – из стали. Использовать эмпирическую формулу.

1.10. Определить величину контактного нажатия пакетно-пластинчатого контакта пускового реостата, если контактное сопротивление $R = 10^{-5}$ Ом, материал контактов – медь.

1.11. Два круглых медных стержня диаметром $d = 15$ мм на торцах обработаны под сферу радиуса $r = 30$ мм и стянуты силой $F = 300$ Н. Определить величину сопротивления стягивания в месте контакта, если температура контакта $\theta_k = 100^\circ$ С.

1.12. Определить требуемую с точки зрения сваривания величину контактного нажатия медного щеточного контакта пускового реостата, если максимальное значение амплитуды ударного тока короткого замыкания $I_{уд} = 10$ кА.

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА И ДУГОГАШЕНИЕ

2.1. Методические указания

Для решения задач данного раздела необходимо:

уяснить положительную роль дуги при размыкании контактов и ее вредное воздействие на детали аппарата, условия образования дуги при коммутации электрической цепи];

изучить физические процессы в электрической дуге и модели, описывающие дугу;

усвоить понятие вольтамперной характеристики дуги, условия и способы гашения дуги на постоянном и переменном токе [1-5].

2.2. Краткие теоретические сведения

Электрическая дуга является одним из видов газового разряда (явление прохождения тока через газ).

Дуга возникает при размыкании (замыкании) электрических цепей с помощью контактов электрических аппаратов, если величины токов и напряжений превосходят некоторые критические значения. Эти значения зависят от материала контактов, параметров цепи, свойств среды и т.д. Дуговой разряд имеет место при относительно больших токах (для металлов примерно 0,5 А) и при напряжении в цепи не менее 15 В.

Дуга приводит к значительному износу аппарата. Но, с другой стороны, играет положительную роль. При отключении постоянного тока значительная часть электромагнитной энергии, запасенной в цепи, преобразуется в тепловую энергию дуги, которая отводится в окружающую

среду. Это ведет к снижению перенапряжений, опасных для изоляции оборудования.

При переменном токе процесс гашения дуги проходит вблизи нулевой паузы тока, когда электромагнитная энергия цепи близка к нулю. В результате этого вероятность появления опасных перенапряжений резко уменьшается.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) дуги устанавливают связь между значением тока и падением напряжения между электродами (контактами) при неизменной длине дуги и неизменных условиях ее горения. Они позволяют представить дугу при гашении как нелинейное изменяющееся во времени сопротивление, включенное в размыкаемую цепь.

ВАХ, снятая при медленном изменении тока, называется статической. *Статическая ВАХ* зависит от расстояния между контактами, материала контактов, параметров среды, в которой горит дуга и условий охлаждения.

Одно из возможных выражений для статической вольт-амперной характеристики дуги выглядит следующим образом

$$U_{\text{д}} = El = Ci^{-a}l, \quad (2.1)$$

где $U_{\text{д}}$ – напряжение дуги; i – ток дуги; E – напряженность электрического поля в столбе дуги; l – длина дуги; C и a – числовые коэффициенты, определяемые экспериментально.

Гашение дуги постоянного тока обеспечивается, если ВАХ дуги лежит выше реостатной характеристики отключаемой сети.

Для цепи с дугой справедливо уравнение равновесия напряжений

$$U = iR + Ldi/dt + u_{\text{д}}, \quad (2.2)$$

где U – напряжение источника; R и L – активное сопротивление и индуктивность отключаемой цепи.

Условие уменьшения тока дуги во времени $Ldi/dt < 0$ (условие гашения дуги)

$$u_{\text{д}} > U - iR. \quad (2.3)$$

Напряжение на контактах в момент достижения током нулевого значения называется *напряжением гашения дуги*.

При $i = 0$ уравнение (2.2) имеет вид

$$U = Ldi/dt + u_{\text{гаш}}; u_{\text{гаш}} = U - Ldi/dt. \quad (2.4)$$

Так как $Ldi/dt < 0$, можно написать

$$u_{\text{гаш}} = U + \left| Ldi/dt \right|_{i=0}. \quad (2.5)$$

Для оценки перенапряжения вводится понятие *коэффициента перенапряжений*

$$k = u_{\text{гаш}} / U = 1 + \left| L di / dt \right|_{i=0} / U. \quad (2.6)$$

Из выражения для перенапряжения $\Delta U = -L di / dt$ можно определить время угасания дуги

$$t_{\text{д}} = -\frac{L}{\Delta U} \int_l^0 di. \quad (2.7)$$

Длина дуги, при которой статическая вольт-амперная характеристика дуги касается прямой $U - iR$, называется *критической*.

Решая уравнение (2.1) совместно с уравнением устойчивого состояния дуги $U = U_{\text{д}} + iR$, получим значение l в функции i :

$$l = \frac{i^a U}{C} \left(1 - \frac{iR}{U}\right) = \frac{i^a U}{C} \left(1 - \frac{i}{I}\right), \quad (2.8)$$

где I – ток цепи, ограниченный собственным сопротивлением цепи R .

Если взять производную от l по i (2.8) и приравнять ее нулю (условие максимума), то получим критический ток

$$i = i_{\text{кр}} = I \frac{a}{1+a} = \frac{U}{R} \left(\frac{a}{1+a}\right). \quad (2.9)$$

Подстановкой (2.9) в (2.8) можно определить критическую длину дуги

$$l_{\text{кр}} = \frac{a^a}{(1+a)^{1+a}} \cdot \frac{I^a U}{C}. \quad (2.10)$$

Умножив обе части уравнения (2.2) на idt и проинтегрировав полученное выражение, будем иметь

$$\int_0^t U idt = \int_0^t i^2 R dt + \int_0^t u_{\text{д}} idt + \int_{I_{\text{к}}}^0 Lidt \quad (2.11)$$

После преобразований получим выражение для определения энергии дуги

$$A_{\text{д}} = \int_0^{t_{\text{д}}} u_{\text{д}} idt = \int_0^{t_{\text{д}}} U idt - \int_0^{t_{\text{д}}} i^2 R dt + LI^2 / 2. \quad (2.12)$$

Условие гашение дуги переменного тока определяется на основе сопоставления кривых восстанавливающегося напряжения сети и восстанавливающейся прочности за переходом тока через нулевое значение. Для гашения дуги необходимо, чтобы кривая восстанавливающейся прочности лежала выше кривой восстанавливающегося напряжения.

Оценка возможных условий гашения дуги переменного тока основывается на решении системы дифференциальных уравнений, описывающих динамические свойства области столба дуги, и уравнений, характеризующих переходные электромагнитные процессы в размыкае-

мой цепи для околонулевой области тока. Для решения системы уравнений применяются различные приближенные методы: аналитические, численные, графо-аналитические, методы теории устойчивости.

При размыкании электрической цепи на контактах восстанавливается напряжение. В зависимости от параметров цепи процесс восстановления напряжения может быть аperiodическим или колебательным.

Аperiodический процесс имеет место, если

$$\frac{1}{4} \left(\frac{R}{L} - \frac{1}{rC} \right)^2 > \frac{1}{LC}, \quad (2.13)$$

где r и C – активное сопротивление и емкость, включенные параллельно с контактами.

В случае аperiodического процесса восстанавливающееся напряжение u_b изменяется следующим образом

$$u_b = U_0 \left[1 + \frac{1}{p_1 - p_2} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}) \right], \quad (2.14)$$

где U_0 – мгновенное значение напряжения источника в момент перехода тока через нуль.

Корни характеристического уравнения определяются на основе решения характеристического уравнения

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2} \left(\frac{R}{L} + \frac{1}{rC} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{R}{L} + \frac{1}{rC} \right)^2 - \frac{1}{LC}}. \quad (2.15)$$

Скорость восстанавливающегося напряжения определяется как

$$du_b / dt = U_0 \frac{p_1 p_2}{p_1 - p_2} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}). \quad (2.16)$$

Колебательный процесс имеет место, если

$$\frac{1}{4} \left(\frac{R}{L} - \frac{1}{rC} \right)^2 < \frac{1}{LC}. \quad (2.17)$$

Изменение напряжения на контактах при колебательном процессе имеет вид

$$u_b = U_0 \left[1 + \left(\frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 t - \cos \omega_0 t \right) e^{-\alpha t} \right], \quad (2.18)$$

где $\omega_0 = \sqrt{1/LC - (1/4)[R/L - 1/(rC)]^2}$ – угловая частота свободных колебаний; $\alpha = -(1/2)[R/L + 1/(rC)]$ – показатель затухания.

При $\omega_0 \gg \alpha$

$$u_b = U_0 [1 - e^{-\alpha t} \cos \omega_0 t]. \quad (2.19)$$

Наибольшее значение восстанавливающегося напряжения характеризуется коэффициентом превышения амплитуды

$$K = U_{\text{в.макс}} / U_0 = 1 + e^{\alpha \frac{\pi}{\omega_0}}. \quad (2.20)$$

Средняя скорость восстановления напряжения (первая четверть периода собственных колебаний T)

$$v_{\text{ср}} = du_{\text{в}} / dt_{\text{ср}} = 4 f_0 U_0, \quad (2.21)$$

где $f_0 = \omega_0 / 2\pi$.

2.3. Примеры решения задач

2.1. Определить энергию, поглощенную дугой постоянного тока при её гашении, если напряжение источника $U = 200$ В, сопротивление $R = 1$ Ом, индуктивность $L = 100$ мГн, время угасания дуги $t_{\text{д}} = 0,1$ с, спад тока происходит по прямой.

Решение. Исходя из уравнения равновесия напряжений при гашении дуги постоянного тока $U = iR + u_{\text{д}} + L di/dt$, получаем выражение энергии дуги

$$A_{\text{д}} = \int_0^{t_{\text{д}}} u_{\text{д}} i dt = \int_0^{t_{\text{д}}} U i dt - \int_0^{t_{\text{д}}} i^2 R dt + LI^2 / 2,$$

где $I = U / R = 200 / 1 = 200$ А – ток в цепи.

По условию задачи ток в зависимости от времени спадает по прямой линии, т.е. $i = I(1 - t/t_{\text{д}})$.

Тогда

$$A_{\text{д}} = UI t_{\text{д}} / 6 + LI^2 / 2 = 200 \cdot 200 \cdot 0,1 / 6 + 100 \cdot 10^{-3} \cdot 200^2 / 2 = 2667 \text{ Дж.}$$

Ответ: $A_{\text{д}} = 2667$ Дж.

2.2. Определить время угасания дуги постоянного тока, если индуктивность цепи $L = 0,1 \cdot 10^{-3}$ Гн, перенапряжение $\Delta U = 30$ В остается величиной постоянной, напряжение источника $U = 400$ В, сопротивление цепи $R = 2$ Ом.

Решение. Установившийся ток цепи $I = U / R = 400 / 2 = 200$ А.

Из выражения для перенапряжения $\Delta U = -L di/dt$ определим время угасания дуги (2.7)

$$t_{\text{д}} = - \frac{L}{\Delta U} \int_i^0 di = \frac{LI}{\Delta U} = \frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{30} 200 = 0,67 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Ответ: $t_{\text{д}} = 0,67 \cdot 10^{-3}$ с.

2.3. Определить критическую длину дуги постоянного тока и критический ток дуги для цепи с общим сопротивлением $R = 1,2$ Ом при

напряжении источника $U = 400$ В. Выражение вольт-амперной характеристики имеет вид $U_d = Ci^{-a}l$, где $C = 80$, $a = 0,5$.

Решение. Из выражения для вольт-амперной характеристики определяем критические значения длины и тока дуги (2.10, 2.9)

$$l_{\text{кр}} = \frac{a^a}{(1+a)^{1+a}} \cdot \frac{I^a U}{C} = \frac{0,5^{0,5}}{(1+0,5)^{1+0,5}} \cdot \frac{333^{0,5} 400}{80} = 35 \text{ см},$$

$$i_{\text{кр}} = \frac{U}{R} \cdot \frac{a}{1+a} = \frac{400}{1,2} \cdot \frac{0,5}{1+0,5} = 111 \text{ А}.$$

Ответ: $l_{\text{кр}} = 35$ см, $i_{\text{кр}} = 111$ А.

2.4. Определить возможное напряжение в цепи постоянного тока, если происходит её размыкание без дуги, при условии, что к зажимам индуктивности $L = 1,5$ Гн подключена ёмкость $C = 0,1$ мкФ. Ток в цепи $I = 20$ А.

Решение. Если пренебречь активным сопротивлением цепи, то ожидаемое напряжение может быть определено из условия, что вся электромагнитная энергия переходит в электростатическую $LI^2/2 = CU^2/2$, откуда

$$U = I\sqrt{L/C} = 20\sqrt{1,5/(0,1 \cdot 10^{-6})} = 77460 \text{ В}.$$

Ответ: $U = 77460$ В.

2.5. Определить число стальных пластин в дугогасительной решетке, учитывая, что прочность должна нарастать во времени и увеличиться в два раза по сравнению с начальной величиной через 100 мкс. 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 $U_{\text{пр1}} = 120$ В.

Решение. Амплитуда восстанавливающегося напряжения определяется по формуле $U_{\text{в.макс}} = K\sqrt{2}U = 1,4 \cdot \sqrt{2} \cdot 600 = 1188$ В.

Через 100 мкс пробивное напряжение единичного промежутка составит $U_{\text{пр1}(t=100 \text{ мкс})} = 2U_{\text{пр1}} = 2 \cdot 120 = 240$ В.

Полупериод собственной частоты $\tau = 1/(2f_0) = 1/(2 \cdot 5000) = 10^{-4}$ с.

Таким образом, через 100 мкс пробивное напряжение единичного промежутка составляет 240 В, а амплитуда восстанавливающегося напряжения – 1188 В.

Число пластин в дугогасительной решетке (при 20 %-ном запасе)

$$m = 1 + 1,2U_{\text{в.макс}} / U_{\text{пр1}(t=100 \text{ мкс})} = 1 + 1,2 \cdot 1188 / 240 \approx 6.$$

Ответ: $m = 6$.

2.6. Определить частоту собственных колебаний восстанавливающегося напряжения выключателя, декремент затухания колебаний и коэффициент превышения амплитуды при условии, что индуктивное сопротивление контура $x = \omega L = 30 \text{ Ом}$, емкость $C = 20000 \text{ пФ}$, активное сопротивление $R = 400 \text{ Ом}$, шунтирующее контакты сопротивление $r = \infty$, частота напряжения питания $f = 50 \text{ Гц}$.

Решение. Индуктивность контура $L = x / \omega = 30 / 314 = 0,0955 \text{ Гн}$.

Процесс восстановления напряжения будет колебательным, так как

$$\frac{1}{4} \left(\frac{R}{L} - \frac{1}{rC} \right)^2 = \frac{1}{4} (400 / 0,0955 - 0)^2 = 4,4 \cdot 10^6 < \frac{1}{LC} = 1 / (0,0955 \cdot 20000 \cdot 10^{-12}) = 523,6 \cdot 10^6.$$

Угловая частота колебаний восстанавливающегося напряжения

$$\omega_0 \approx \sqrt{\frac{1}{LC}} \approx \sqrt{\frac{1}{0,0955 \cdot 20000 \cdot 10^{-12}}} = 23000 \text{ 1/с}.$$

Частота собственных колебаний восстанавливающегося напряжения

$$f_0 = \omega_0 / (2\pi) = 23000 / (2 \cdot 3,14) = 3662,4 \text{ Гц}.$$

Декремент затухания при $r = \infty$

$$\alpha = - \frac{R}{2L} = - \frac{400}{2 \cdot 0,095} = -2105 \text{ 1/с}.$$

Коэффициент превышения амплитуды (2.20)

$$K = U_{\text{в.макс}} / U_0 = 1 + e^{\frac{\alpha \pi}{\omega_0}} = 1 + e^{-2105 \frac{3,14}{23000}} = 1,75.$$

Ответ: $f_0 = 3662,4 \text{ Гц}$, $\alpha = -2105 \text{ 1/с}$, $K = 1,75$.

2.4. Задачи для решения

2.7. Определить энергию, поглощенную дугой постоянного тока при её гашении, если напряжение источника $U = 200 \text{ В}$, сопротивление $R = 1,5 \text{ Ом}$, индуктивность $L = 80 \text{ мГн}$, время угасания дуги $t_d = 0,09 \text{ с}$, спад тока имеет прямолинейный характер.

2.8. Общее количество энергии, поглощенное дугой за один цикл отключения $A_d = 3000 \text{ Дж}$. Определить, какое количество энергии потребляется из сети за время одного отключения, если начальный отключаемый ток $I = 200 \text{ А}$, индуктивность цепи $L = 80 \text{ мГн}$.

2.9. Определить графоаналитическим методом время угасания дуги постоянного тока, если сопротивление $R = 3 \text{ Ом}$, индуктивность $L = 120 \text{ мГн}$, напряжение источника $U = 400 \text{ В}$, а вольт-амперная характеристика дуги описывается уравнением $U_{\text{д}} = Ci^{-a}l$, где $l = 1,2l_{\text{кр}}$ ($l_{\text{кр}}$ – критическая длина дуги); $C = 80$, $a = 0,5$.

2.10. Определить полное время угасания дуги постоянного тока, если напряжение на дуге $U_{\text{д}} = 250 \text{ В}$ в зависимости от тока остается постоянным, напряжение источника $U = 200 \text{ В}$, сопротивление $R = 1 \text{ Ом}$, индуктивность $L = 15 \text{ мГн}$.

2.11. Определить время угасания дуги постоянного тока при условии, что перенапряжение $\Delta U = 35 \text{ В}$ остается величиной постоянной в течение всего времени гашения. Напряжение источника $U = 400 \text{ В}$, сопротивление $R = 4 \text{ Ом}$, индуктивность $L = 15 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$.

2.12. Определить критическую длину дуги и ее критический ток, если сопротивление цепи $R = 1,5 \text{ Ом}$, напряжение источника $U = 600 \text{ В}$. Вольт-амперная характеристика дуги описывается уравнением $U_{\text{д}} = Ci^{-a}l$, где $C = 90$, $a = 0,4$.

2.13. Определить напряжение на индуктивности $L = 1 \text{ Гн}$ при разрыве тока $I = 25 \text{ А}$ без дуги при параллельной емкости $C = 0,15 \text{ мкФ}$.

2.14. Определить значение емкости, которая должна быть подключена параллельно индуктивности $L = 1 \text{ Гн}$ с тем, чтобы при обрыве цепи без дуги напряжение на индуктивности не превышало $U = 10 \text{ кВ}$. Ток цепи $I = 15 \text{ А}$.

2.15. 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 $U_{\text{макс}} = 500 \text{ В}$.

2.16. 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 $L = 0,5 \text{ Гн}$, начальный ток возбуждения $I = 1000 \text{ А}$, а наибольшее напряжение на обмотке генератора $U_{\text{макс}} = 600 \text{ В}$.

2.17. Определить число стальных пластин дугогасительной камеры, если начальное пробивное напряжение единичного промежутка $U_{\text{пр1}} = 120 \text{ В}$, напряжение восстанавливается с частотой $f_0 = 5000 \text{ Гц}$, коэффициент превышения амплитуды восстанавливающегося напряже-

ния $K = 1,6$. Рабочее возвращающееся напряжение $U_p = 600$ В. Известно также, что за 50 мкс пробивное напряжение единичного промежутка достигает двойной величины по сравнению с начальной.

2.18. Оценить кратность напряжения, возникающего на выключателе при отключении участка линии емкостью $C = 1,5$ мкФ, если каждая фаза выключателя зашунтирована сопротивлением $r = 3000$ Ом (повторные пробои и замыкания не принимать во внимание).

3. НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

3.1. Методические указания

Для решения задач данного раздела необходимо:
ознакомиться с нормами нагрева аппаратов, уяснить понятия допустимой температуры и допустимого превышения температуры;
уяснить способы передачи тепла и определения потерь;
изучить нагрев в установившемся, переходных режимах и при коротком замыкании;
усвоить понятие термической устойчивости [1-5].

3.2. Краткие теоретические сведения

Задачей теплового расчета является определение мощности потерь и расчет температурного поля, которое является функцией координат и времени $\theta = f(x, y, z, t)$. В установившемся (статическом) режиме температура зависит только от координат точки в пространстве. В переходном (неустановившемся) режиме температурное поле изменяется во времени.

Для решения задач теплового расчета используются аналитические методы при различных упрощающих предположениях и вычислительные методы математики (методы сеток, конечных элементов).

В токоведущих системах электрических аппаратов *теплоотдача путем теплопроводности* в основном происходит: от элементов этих систем к соприкасающимся металлическим нетоковедущим конструктивным или изоляционным элементам; от наиболее нагретых элементов токоведущих систем к менее нагретым, включенным последовательно; к специальным радиаторам; к элементам системы принудительного, как правило жидкостного, охлаждения в аппаратах с искусственным охлаждением.

Процесс теплопроводности описывается *уравнением Фурье*

$$p = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n}, \quad (3.1)$$

где $p = P/S$ – плотность теплового потока в какой-либо точке на поверхности S ; P – мощность потерь; $\partial \theta / \partial n$ – градиент температуры (производная от температуры вдоль нормали n к площадке S); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м⁰ С).

Коэффициент теплопроводности различных веществ зависит от их физических свойств и выбирается по таблицам (табл. П.4).

При решении задачи теплопроводности в каждом конкретном случае задаются условия однозначности, т.е. начальные и граничные условия.

Конвективный теплообмен (теплоотдача конвекцией) всегда сопровождается теплопроводностью, играющей существенную роль только в непосредственной близости к поверхности нагретого тела. Конвекция возможна лишь в жидкостях и газах, частицы которых могут легко перемещаться. Различают два вида движения: свободное (естественное), создаваемое разностью плотностей нагретых и холодных частиц, и вынужденное, которое возникает под действием посторонних возбудителей (ветра, насоса, вентилятора).

Теплоотдача с поверхности большинства токоведущих систем аппаратов осуществляется путем свободной конвекции. Вынужденное движение приобретает в последнее время большое значение в связи с достаточно широким применением токоведущих систем с искусственным охлаждением.

Движение жидкости может быть ламинарным (частицы жидкости движутся параллельно стенкам канала) и турбулентным (частицы жидкости движутся хаотически, неупорядоченно). Наилучшая теплоотдача от труб с жидкостью происходит при турбулентном движении при относительно больших скоростях. Следует отметить, что водяное охлаждение усложняет конструкцию аппарата и применяется только при больших токах.

Теплообмен (теплоотдача) излучением сопровождается двойственным превращением энергии: тепловой в лучистую и лучистой в тепловую, при этом тепло может передаваться через вакуум. В наибольшей степени тепловую энергию переносят инфракрасные лучи и в меньшей степени – световые. В теплоотдаче от токоведущих систем с температурой порядка 100–120⁰ С теплоотдача путем излучения может составлять 40–50 %.

В токоведущих системах электрических аппаратов, как правило, все виды теплоотдачи существуют одновременно. Только в некоторых

случаях можно выделить отдельные виды теплоотдачи, например, перенос тепла путем излучения в вакуумных выключателях на стенки и путем теплопроводности через контактные выводы.

Мощность, отдаваемая телом за счет конвекции и излучения окружающей среде, определяется *законом Ньютона*

$$P = k_{\tau_0} S (\theta - \theta_0). \quad (3.2)$$

Здесь k_{τ_0} – коэффициент теплоотдачи, учитывающий отдачу тепла конвекцией и излучением, Вт/(м² С); θ – температура поверхности, °С; θ_0 – температура окружающей среды, °С.

Коэффициент теплоотдачи зависит от физических постоянных (удельного веса, теплопроводности, вязкости, теплоемкости, температуропроводности жидкой или газообразной среды, окружающей тело), от формы и расположения тела в среде, от состояния поверхности тела, его размеров, скорости движения среды, температуры и т.д.

Значения коэффициента теплоотдачи определяются экспериментально с применением теории подобия и приводятся в справочной литературе (табл. П.9-П.11).

Следует отметить, что большую точность обеспечивает отдельный учет конвекции и теплового излучения.

Зависимость (3.2) является упрощенной и используется при инженерных расчетах. Уравнение Ньютона можно рассматривать также как тепловой закон Ома

$$P = \frac{(\theta - \theta_0)}{1/(k_{\tau_0} S)} = \frac{(\theta - \theta_0)}{R_{\tau}}, \quad (3.3)$$

где $R_{\tau} = 1/(k_{\tau_0} S)$ – тепловое сопротивление.

Понятие теплового сопротивления позволяет решать многие задачи, не прибегая к решению непосредственно уравнения теплопроводности, а с помощью схем замещения.

Мощность потерь в случае однородного по всей длине проводника и установившейся температуры нагрева для постоянного тока I проводится по формуле

$$P = I^2 R, \quad (3.4)$$

где $R = \rho l / q$ – активное сопротивление проводника поперечного сечения q , длиной l ; ρ – удельное электрическое сопротивление проводника.

Для большинства проводников при температурах до 200 – 300 °С в практических расчетах можно считать, что $\rho = \rho_0 (1 + \alpha_{\theta} \theta)$. Здесь ρ_0 –

удельное сопротивление проводника при 0°C , α_{θ} – температурный коэффициент сопротивления.

При переменном токе потери увеличиваются из-за неравномерного распределения тока по сечению проводника, которое зависит от магнитного поля внутри проводника (поверхностный эффект) и от поля, создаваемого другими проводниками (эффект близости). Сопротивление проводника на переменном токе определяют как

$$R = k_{\text{доб}} R_{\text{п}}, \quad (3.5)$$

где $R_{\text{п}}$ – активное сопротивление проводника на постоянном токе.

Коэффициент добавочных потерь $k_{\text{доб}}$ учитывает поверхностный эффект и эффект близости и определяется как

$$k_{\text{доб}} = k_{\text{п}} k_{\text{б}}. \quad (3.6)$$

Коэффициенты поверхностного эффекта и эффекта близости $k_{\text{п}}$ и $k_{\text{б}}$ зависят от частоты тока, геометрии и формы проводника, свойств материала проводника; коэффициент $k_{\text{б}}$ зависит также от расстояния между проводниками, от направления и фазы токов в них.

При практических расчетах коэффициенты $k_{\text{п}}$ и $k_{\text{б}}$ определяются по номограммам и кривым, приведенным в справочной литературе (рис. П.2-П.4).

При переменном токе появляются активные *потери в ферромагнитных нетоковедущих деталях*, расположенных в переменном магнитном поле (потери от вихревых токов и потери на гистерезис).

Мощность потерь в стали магнитопровода на гистерезис и вихревые токи может быть определена по формуле

$$P = (\chi_{\text{г}} B_m^{1.6} + \chi_{\text{в}} f B_m^2) f M, \quad (3.7)$$

где B_m – максимальное значение магнитной индукции, Тл; $\chi_{\text{г}}$ и $\chi_{\text{в}}$ – коэффициенты потерь от гистерезиса и вихревых токов; M – масса магнитопровода, кг; f – частота тока.

В аппаратах переменного тока высокого напряжения необходимо учитывать *потери в изоляции проводов и изолирующих деталях*.

Мощность, выделяемая в активном слое изоляции в переменном электрическом поле

$$P = \omega C U^2 \text{tg} \delta, \quad (3.8)$$

где C – емкость изолятора, Ф; U – напряжение, приложенное к изолятору, В; $\text{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь изолятора.

Для расчета температуры в переходном режиме используют уравнение теплового баланса

$$P dt = k_{\tau_0} S (\theta - \theta_0) dt + C d\theta. \quad (3.9)$$

Здесь, кроме указанных выше обозначений, C – теплоемкость тела, Вт·с; t – время, с. Первый член правой части уравнения (3.9) есть количество тепла, отдаваемое телом в окружающую среду за время dt ; второй член – количество тепла, воспринимаемого телом при изменении его температуры на $d\theta$.

Решением уравнения (3.9) при постоянстве подводимой мощности P , теплоемкости C , температуре окружающей среды и коэффициенте теплоотдачи является

$$\tau = \tau_0 e^{-t/T} + \tau_y (1 - e^{-t/T}), \quad (3.10)$$

где $\tau_0 = \theta - \theta_0$ – превышение температуры в начале процесса; $\tau_y = \theta_y - \theta_0$ – установившееся превышение температуры; $T = C / (k_{\tau_0} S)$ – постоянная времени нагрева.

Типичными для аппаратов являются: *длительный, кратковременный, повторно-кратковременный режимы работы.*

Длительный режим возможен, если время действия нагрузки (время работы) в 4–5 раз превышает постоянную времени нагрева $t_p > 4T$.

Температура достигает установившегося значения.

В *кратковременном режиме* при работе аппарата температура не достигает установившегося значения, а при отключении (пауза) аппарат охлаждается до температуры окружающей среды ($t_p < 4T$, $t_n > 4T$).

Для *повторно-кратковременного режима* работы $t_p < 4T$, $t_n < 4T$.

При отключении аппарат не успевает охладиться до температуры окружающей среды, а за время работы t_p не достигает θ_y . Простейший случай повторно-кратковременного режима наблюдается, когда интервалы работы t_p и паузы t_n постоянны в следующих друг за другом циклах работы и отключения $t_{\text{ц}} = t_p + t_n$.

К повторно-кратковременному режиму относится *перемежающийся режим*. При этом режиме ток циклически меняется, не спадая до нулевого значения. В течение времени работы t_{p1} проходит неизменный ток I_{p1} . Установившееся превышение температуры при этом токе равно τ_{y1} . В течение времени работы t_{p2} через аппарат проходит неизменный ток I_{p2} . Установившееся превышение температуры при этом токе равно τ_{y2} . Поскольку $I_{p1} > I_{p2}$, то в течение времени t_{p2} аппарат охлаждается.

При кратковременном и повторно-кратковременном режимах величина тока может быть принята большей, чем при длительном. Однако

максимальное превышение температуры в таких режимах не должно превосходить допустимых значений.

Для аппаратов, предназначенных для работы в повторно-кратковременном режиме, нормируется продолжительность включения и допустимое число включений в единицу времени (обычно в час). Продолжительность включения ПВ % определяется как

$$\text{ПВ}\% = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}} 100\% . \quad (3.11)$$

Стандартами установлены следующие значения продолжительности включения и максимально допустимой частоты включений в час n : ПВ% = 15, 25, 40 и 60 %; n = 6, 30, 150, 600, 1200, 2400, 3600.

Коэффициент перегрузки по току рассчитывается в соответствии с ПВ% и частотой включений в час n

$$k_I = I_{\text{кр}} / I_{\text{дл}} = \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{3600}{T \cdot n}}}{1 - e^{-\frac{3600 \text{ ПВ}\%}{T \cdot n \cdot 100\%}}} . \quad (3.12)$$

Так как время действия токов короткого замыкания значительно меньше постоянной времени нагрева токоведущих частей ($t_{\text{кз}} < 0,05T$), процесс нагрева является адиабатическим (тепло не отдается в окружающую среду, а все идет на нагрев). Уравнение теплового баланса преобразуется к виду

$$\int_0^{t_{\text{кз}}} j^2 dt = \int_{\theta_{\text{нач}}}^{\theta_{\text{кз}}} \frac{c\gamma}{\rho} = B(\theta_{\text{кз}}), \quad (3.13)$$

где j – плотность тока; c – удельная теплоемкость; γ – плотность материала проводника; $\theta_{\text{нач}}$ – начальная температура; $\theta_{\text{кз}}$ – температура в конце короткого замыкания.

По известной зависимости удельной теплоемкости, плотности и удельного сопротивления от температуры для некоторых широко распространенных материалов (сталь, алюминий, медь) построены графики $B(\theta_{\text{кз}})$, которые позволяют определить температуру в конце процесса

короткого замыкания. При этом значение интеграла $\int_0^{t_{\text{кз}}} j^2 dt$ может быть

определено по кривой изменения тока короткого замыкания во времени, либо другими методами (например, заменой реального процесса короткого замыкания некоторым фиктивным, эквивалентным реальному по тепловому действию). С помощью кривых $B(\theta_{\text{кз}})$ можно определить допустимую плотность тока в проводнике, либо длительность процесса короткого замыкания при известной допустимой температуре. Допу-

стимые температуры в конце короткого замыкания: для медных неизолированных проводников или проводников с изоляцией органического происхождения – 250 °С, для медных проводников с неорганической изоляцией – 350 °С, для алюминиевых проводников – 200 °С.

Токоведущие элементы аппарата, рассчитанные для длительного режима, должны быть проверены на термическую стойкость при коротком замыкании. При расчете берется наиболее тяжелый случай – к моменту начала короткого замыкания элемент нагрет длительным током до предельно допустимой температуры номинального режима.

Термическая стойкость аппарата и его токоведущих частей определяется действующим значением тока термической стойкости, протекающего в течение времени термической стойкости (1,3,5 и 10 секунд) не вызывает нагрева выше допустимых температур. Связь между токами термической стойкости для различных времен выражается равенством

$$I_1^2 \times 1 = I_3^2 \times 3 = I_5^2 \times 5 = I_{10}^2 \times 10 = I_t^2 \times t. \quad (3.14)$$

3.3. Примеры решения задач

3.1. Определить коэффициент поверхностного эффекта для алюминиевого шинпровода, нагретого протекающим по нему переменным током промышленной частоты до температуры $\theta = 95^\circ\text{C}$, для следующих случаев:

а) шинпровод круглый $d = 80$ мм;

б) шинпровод трубчатый с наружным диаметром $d_{\text{нар}} = 80$ мм, внутренним диаметром $d_{\text{вн}} = 50$ мм;

в) шинпровод трубчатый с наружным диаметром $d_{\text{нар}} = 80$ мм, внутренним диаметром $d_{\text{вн}} = 74$ мм.

Решение. Коэффициент поверхностного эффекта можно определить по графикам, изображенным на рис. П.2 и П.3. Для этого вычисляется величина $\sqrt{f / R_{100}}$, где f – частота переменного тока, Гц; R_{100} – активное сопротивление постоянному току проводника длиной $l = 100$ м, Ом.

Для условия а) рассматриваемой задачи

$$R_{100} = \rho_0 (1 + \alpha_\theta \theta) l / q =$$

$$= 2,62 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0042 \cdot 95) \cdot 100 / (3,14 \cdot 40^2 \cdot 10^{-6}) = 7,3 \cdot 10^{-4} \text{ Ом},$$

$$\sqrt{f / R_{100}} = \sqrt{50 / (7,3 \cdot 10^{-4})} = 262 \text{ Гц}^{1/2} \text{ Ом}^{-1/2}.$$

Коэффициент поверхностного эффекта $k_n = 1,8$ (рис. П.2).

Для условия б) задачи

$$R_{100} = \rho_0 (1 + \alpha_\theta) l / q =$$

$$= 2,62 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0042 \cdot 95) \cdot 100 / (3,1 \cdot 10^{-3}) = 11,82 \cdot 10^{-4} \text{ Ом},$$

где $q = \pi (d_{\text{нар}}^2 - d_{\text{вн}}^2) / 4 = 3,14 \cdot (0,08^2 - 0,05^2) / 4 = 3,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ – сечение трубчатого шинпровода;

$$\sqrt{f / R_{100}} = \sqrt{50 / (11,82 \cdot 10^{-4})} = 205,7 \text{ Гц}^{1/2} \text{ Ом}^{-1/2};$$

$\delta = (d_{\text{нар}} - d_{\text{вн}}) / 2 = (0,08 - 0,05) / 2 = 0,015 \text{ м}$ – толщина стенки трубы;

$$D = d_{\text{нар}}; \delta / D = 0,015 / 0,08 = 0,1875.$$

Коэффициент поверхностного эффекта $k_n = 1,1$ (рис. П.3).

Для условия в) задачи

$$R_{100} = \rho_0 (1 + \alpha_\theta) l / q =$$

$$= 2,62 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0042 \cdot 95) \cdot 100 / (7,253 \cdot 10^{-4}) = 50,54 \cdot 10^{-4} \text{ Ом},$$

где $q = \pi (d_{\text{нар}}^2 - d_{\text{вн}}^2) / 4 = 3,14 \cdot (0,08^2 - 0,074^2) / 4 = 7,253 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ – сечение трубчатого шинпровода;

$$\sqrt{f / R_{100}} = \sqrt{50 / (50,54 \cdot 10^{-4})} = 99,5 \text{ Гц}^{1/2} \text{ Ом}^{-1/2};$$

$\delta = (d_{\text{нар}} - d_{\text{вн}}) / 2 = (0,08 - 0,074) / 2 = 0,003 \text{ м}$ – толщина стенки трубы;

$$D = d_{\text{нар}}; \delta / D = 0,003 / 0,08 = 0,0375.$$

Коэффициент поверхностного эффекта $k_n = 1,02$ (рис. П.3).

Ответ: а) $k_n = 1,75$; б) $k_n = 1,1$ в) $k_n = 1,02$.

3.2. Определить мощность потерь в магнитопроводе, выполненном из трансформаторной листовой стали марки 1511 с толщиной листа $\Delta = 0,35 \text{ мм}$, если по катушке, имеющей число витков $w = 1250$, протекает переменный ток $I = 0,6 \text{ А}$ частотой $f = 50 \text{ Гц}$. Размеры магнитопровода приведены на рисунке 3.1.

Решение. Определим массу стали магнитопровода с учетом коэффициента заполнения поперечного сечения сталью $k_s = 0,9$

$$M = k_s \gamma V = 0,9 \cdot 7800 \cdot 35 \cdot 35 \cdot 280 \cdot 10^{-9} = 2,41 \text{ кг},$$

где $\gamma = 7800 \text{ кг/м}^3$ – плотность стали (табл. П.4); V – объем стали.

Напряженность магнитного поля

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

где $l_{\text{cp}} = 280 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – средняя длина магнитной силовой линии (рис. 3.1).

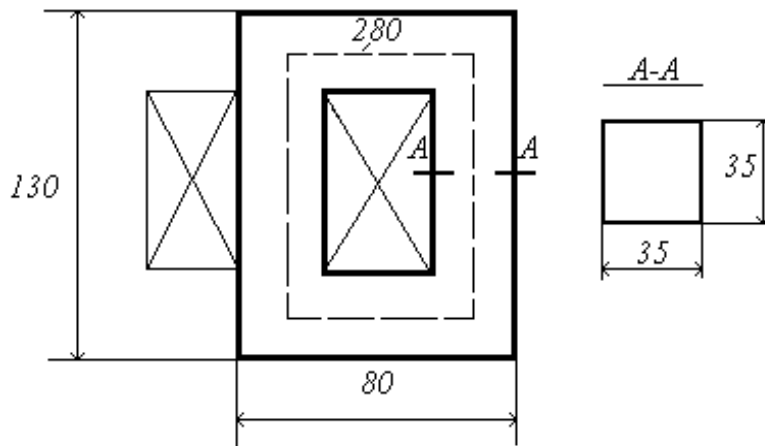


Рис. 3.1. Эскиз магнитопровода с катушкой

Значение индукции $B = 1,46$ Тл для $H = 2700$ А/м; удельные тепловые потери $p_{уд} = 3$ Вт/кг. (табл. П.5).

Потери в сердечнике

$$P = p_{уд} M = 3 \cdot 2,41 = 7,2 \text{ Вт.}$$

Ответ: $P = 7,2$ Вт.

3.3. Рассчитать значение установившейся температуры медного круглого окрашенного краской проводника диаметром $d = 25$ мм, по которому протекает постоянный ток $I = 1000$ А. Температура окружающего воздуха $\theta_0 = 35^\circ\text{C}$.

Решение. Исходным уравнением для решения задачи является равенство теплоты, выделяемой в проводнике $P = I^2 R$ и теплоты, отдаваемой в окружающую среду с его боковой поверхности S (3.2)

$$I^2 \cdot \rho_0 (1 + \alpha_\theta \theta) l / q = k_{то} S (\theta - \theta_0).$$

Коэффициент теплоотдачи (табл. П.10)

$$k_{то} = k_1 \cdot 10 \cdot [1 + k_2 \cdot 10^{-2} \cdot (\theta - \theta_0)] \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}),$$

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

Принимаем расчетную длину шины равной 1 метру и подставляем числовые значения в исходное уравнение

$$\begin{aligned} 1000^2 \cdot 1,62 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0043\theta) 1 / (3,14 \cdot 25^2 \cdot 10^{-6} / 4) = \\ = 1,17 \cdot 10 [1 + 10^{-2} (\theta - 35)] \cdot 3,14 \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot (\theta - 35). \end{aligned}$$

Решая последнее (квадратное) уравнение, находим $\theta = 70^\circ\text{C}$.

Ответ: $\theta = 70^\circ\text{C}$.

3.4. Определить длительно допустимую величину плотности переменного тока частотой 50 Гц катушки электромагнита. Катушка намотана медным круглым проводом, диаметр которого $d = 4$ мм; изоляция хлопчатобумажная без пропитки. Число витков катушки $w = 250$, высота катушки $H = 170$ мм, внутренний и наружный диаметры катушки $D_{\text{вн}} = 100$ мм и $D_{\text{нар}} = 155$ мм соответственно (рис. 3.2). Катушка находится в спокойном воздухе при $\theta_o = 35^\circ \text{C}$.

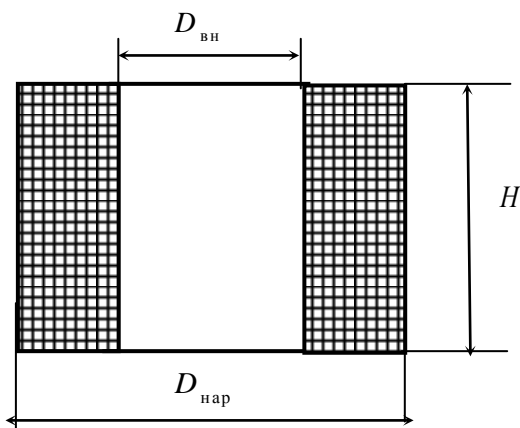


Рис. 3.2. Эскиз катушки

Решение. Для решения задачи воспользуемся формулами Ньютона $P = k_{\text{то}} S(\theta - \theta_o)$, расчета мощности потерь $P = I^2 R$, сопротивления на переменном токе $R_{\square} = k_{\square} R_{\text{п}}$ и сопротивления на постоянном токе $R_{\text{п}} = \rho l / q$.

Коэффициент теплоотдачи для цилиндрических катушек при площади поверхности охлаждения $100 < S < 5000 \text{ см}^2$ [5]

$$k_{\text{то}} \approx 2,3 \cdot 10^{-3} [1 + 0,005(\theta - \theta_o)] / \sqrt[5]{S} =$$

$$= 2,3 \cdot 10^{-3} [1 + 0,005(90 - 35)] / \sqrt[5]{1580} = 0,67 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{град}),$$

где площадь поверхности охлаждения

$$S = 2\left(\frac{\pi D_{\text{нар}}^2}{4} - \frac{\pi D_{\text{вн}}^2}{4}\right) + \pi (D_{\text{нар}} + D_{\text{вн}}) H =$$

$$= 2\left(\frac{3,14 \cdot 15,5^2}{4} - \frac{3,14 \cdot 10^2}{4}\right) + 3,14 \cdot (15,5 + 10) \cdot 17 = 1580 \text{ см}^2,$$

допустимая температура для данного класса изоляции $\theta_{\text{доп}} = 90^\circ \text{C}$ (табл. П.1).

Допустимый длительный ток определяется из равенства выделяемой и отводимой с поверхности мощностями потерь $P = k_{\text{то}} S (\theta - \theta_0) = I^2 R$

$$I = \sqrt{\frac{k_{\text{то}} S (\theta - \theta_0)}{R}} = \sqrt{\frac{0,67 \cdot 10^{-3} \cdot 1580 \cdot (90 - 35)}{0,179}} = 18 \text{ А.}$$

Здесь активное сопротивление

$$R = k_{\text{доб}} R_{\text{с}} = k_{\text{доб}} \rho_0 (1 + \alpha_{\theta} \theta) l / q = \\ = 1 \cdot 1,62 \cdot 10^{-6} (1 + 0,0043 \cdot 90) \cdot 10000 / 0,1256 = 0,179 \text{ Ом,}$$

где $\rho_0 = 1,62 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ – удельное сопротивление проводника при 0°C , $\alpha_{\theta} = 0,0043 \text{ 1/град}$ – температурный коэффициент сопротивления, $l = w l_{\text{ср}} = 250 \cdot 40 = 10000 \text{ см}$ – длина проводников катушки, $l_{\text{ср}} = \pi (D_{\text{нар}} + D_{\text{вн}}) / 2 = \pi (15,5 + 10) / 2 = 40 \text{ см}$ – средняя длина витка катушки, $q = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (4 \cdot 10^{-1})^2}{4} = 0,1256 \text{ см}^2$ – площадь поперечного сечения провода.

Допустимая плотность тока в катушке

$$j = \frac{I}{q} = \frac{18}{0,1256} = 143 \text{ А/см}^2.$$

Ответ: $j = 143 \text{ А/см}^2$.

3.5. Написать уравнение кривой нагрева круглого медного проводника диаметром $d = 10 \text{ мм}$, по которому протекает постоянный ток $I = 400 \text{ А}$, если коэффициент отдачи с поверхности проводника $k_{\text{то}} = 10 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)}$, температура окружающей среды, которой является спокойный воздух, $\theta_0 = 35^{\circ}\text{C}$. Значение удельного сопротивления меди за время нарастания температуры $\rho = 1,75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Решение. Уравнение кривой нагрева

$$\tau = \tau_y (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}),$$

где $\tau_y = P / (k_{\text{то}} \cdot S) = I^2 \rho l / (q \cdot k_{\text{то}} \cdot S)$ – установившееся превышение температуры.

Расчет проведем для проводника длиной $l = 1 \text{ м}$

$$\tau_y = 400^2 \cdot 1,75 \cdot 10^{-8} \cdot 1 / (3,14 \cdot 5^2 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 1) = 114^{\circ}\text{C}.$$

Постоянная времени нагрева

$$T = C / (k_{\text{то}} S) = cM / (k_{\text{то}} S) =$$

$$= 390 \cdot 8700 \cdot 3,14 \cdot 5^2 \cdot 10^{-6} / (10 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 1) = 850 \text{ с.}$$

Здесь c – удельная теплоемкость меди; $M = \gamma V$ – масса проводника длиной в 1 м; γ – плотность меди; V – объем проводника.

Уравнение кривой нагрева

$$\tau = 114(1 - e^{-\frac{t}{850}}).$$

Ответ: $\tau = 114(1 - e^{-\frac{t}{850}}).$

3.6. Определить допустимое число включений n в час катушки постоянного тока в повторно-кратковременном режиме нагрева, если время работы катушки $t_{\text{раб}} = 150 \text{ с}$ и по ней протекает допустимый ток повторно-кратковременного режима работы $I_{\text{п.кр}} = 12 \text{ А}$.

Катушка цилиндрическая, намотана круглым проводником, диаметр которого $d = 2 \text{ мм}$, число витков катушки $w = 500$, внутренний диаметр катушки $D_{\text{вн}} = 70 \text{ мм}$, наружный диаметр катушки $D_{\text{нар}} = 140 \text{ мм}$, высота катушки равна $H = 70 \text{ мм}$. Катушка находится в спокойном воздухе, температура которого $\theta_o = 35^\circ \text{ С}$. Коэффициент теплоотдачи $k_{\text{то}} = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{ С})$. Изоляция проводника – хлопчатобумажная, без пропитки.

Решение. Длительно допустимая величина тока определяется из равенства

$$\frac{I_{\text{дл}}^2 \cdot \rho_0 (1 + \alpha \cdot \theta_{\text{доп}}) \cdot w \cdot \pi \cdot D_{\text{ср}}}{(\pi \cdot d^2 / 4)} = k_{\text{то}} (\theta_{\text{доп}} - \theta_o) S.$$

Для хлопчатобумажной изоляции допустимая температура $\theta_{\text{доп}} = 90^\circ \text{ С}$.

Ток длительного режима

$$I_{\text{дл}} = \sqrt{\frac{k_{\text{то}} (\theta_{\text{доп}} - \theta_o) S \cdot \pi \cdot d^2}{\rho_0 (1 + \alpha \cdot \theta_{\text{доп}}) \cdot w \cdot \pi \cdot D_{\text{ср}} \cdot 4}}$$

$$= \sqrt{\frac{20(90 - 35) \cdot 0,069 \cdot 3,14 \cdot (2 \cdot 10^{-3})^2}{1,62 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0043 \cdot 90) 500 \cdot 3,14 \cdot 0,105 \cdot 4}} = 8 \text{ А,}$$

где средний диаметр катушки

$$D_{\text{ср}} = \frac{D_{\text{вн}} + D_{\text{нар}}}{2} = \frac{0,07 + 0,14}{2} = 0,105 \text{ м,}$$

площадь поверхности охлаждения

$$S = 2\left(\frac{\pi D_{\text{нар}}^2}{4} - \frac{\pi D_{\text{вн}}^2}{4}\right) + \pi(D_{\text{нар}} + D_{\text{вн}})H =$$

$$= 2\left(\frac{3,14 \cdot 0,14^2}{4} - \frac{3,14 \cdot 0,07^2}{4}\right) + 3,14 \cdot (0,14 + 0,07) \cdot 0,07 = 0,068 \text{ м}^2.$$

Коэффициент перегрузки по току

$$k_I = I_{\text{нкр}} / I_{\text{дл}} = 12 / 8 = 1,5.$$

Постоянную времени нагрева катушки определим из условия, что способностью воспринимать теплоту обладают только токопроводящие элементы

$$T = c\gamma(\pi d^2 / 4)w\pi D_{\text{ср}} / k_{\text{то}} S =$$

$$= 390 \cdot 8700 \cdot (3,14 \cdot 2^2 \cdot 10^{-6} / 4) \cdot 500 \cdot 3,14 \cdot 0,105 / (20 \cdot 0,069) = 1273 \text{ с.}$$

Здесь c – удельная теплоемкость меди; γ – плотность меди.

Подставив в равенство $k_I = I_{\text{кр}} / I_{\text{дл}} = \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{3600}{T \cdot n}}}{1 - e^{-\frac{3600 \text{ ПВ} \%}{T \cdot n \cdot 100\%}}}}$ выражения для $\text{ПВ} \% = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}} 100 \%$ и $n = 3600 / t_{\text{ц}}$ получим

$$k_I = \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_{\text{ц}}}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}}.$$

Из последнего уравнения определим время цикла

$$t_{\text{ц}} = -T \cdot \ln[1 - k_I^2 (1 - e^{-\frac{t_p}{T}})] = -1273 \cdot \ln[1 - 1,5^2 (1 - e^{-\frac{150}{1273}})] = 366 \text{ с.}$$

Допустимое число включений катушки в час

$$n = 3600 / t_{\text{ц}} = 3600 / 366 = 9,8 \approx 9.$$

Ответ: $n = 9$.

3.4. Задачи для решения

3.7. Определить коэффициент поверхностного эффекта и мощность потерь в одном метре длины круглого шинпровода диаметром $d = 45$ мм, по которому протекает переменный ток $I = 2400$ А промышленной частоты. Решить задачу для случаев, когда шинпровод выполнен из меди и алюминия.

3.8. Определить коэффициент поверхностного эффекта и мощность потерь электрической энергии в одном метре длины стальной трубчатой шины, имеющей наружный диаметр $d_{\text{нар}} = 137$ мм, внутренний диаметр

$d_{\text{вн}} = 127$ мм. По шине, температура которой $\theta = 110^\circ\text{C}$, протекает ток $I = 800$ А промышленной частоты $f = 50$ Гц.

3.9. Определить мощность потерь в одном метре длины медного шинпровода распределительного устройства, по которому протекает ток $I = 840$ А, если шинпровод нагрет до температуры $\theta = 90^\circ\text{C}$, его диаметр $d = 20$ мм.

3.10. Определить коэффициент теплоотдачи конвекцией с боковой наружной поверхности цилиндрической катушки индуктивности высотой $H = 200$ мм, расположенной вертикально в спокойном воздухе, температура которого $\theta_o = 35^\circ\text{C}$. Катушка достаточно удалена от других аппаратов и устройств. В результате протекания по ней тока температура ее поверхности $\theta = 105^\circ\text{C}$.

3.11. Рассчитать значение установившейся температуры круглого медного проводника, окрашенного краской, расположенного в спокойном воздухе, температура которого $\theta_o = 35^\circ\text{C}$; по проводнику диаметром $d = 45$ мм протекает постоянный ток $I = 2500$ А.

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

3.13. Определить допустимую величину переменного тока круглой медной шины диаметром $d = 40$ мм, установленной горизонтально в спокойном воздухе, температура которого $\theta_o = 35^\circ\text{C}$, если частота тока $f = 50$ Гц, а допустимая температура поверхности шины $\theta_{\text{доп}} = 85^\circ\text{C}$.

3.14. Определить температуру цилиндрической катушки без магнитопровода, через которую протекает постоянный ток $I = 20$ А. Катушка с внутренним диаметром $D_{\text{вн}} = 100$ мм, наружным диаметром $D_{\text{нар}} = 160$ мм, высотой $H = 170$ мм, числом витков $w = 250$ расположена в спокойном воздухе, температура которого $\theta_o = 35^\circ\text{C}$. Диаметр провода $d = 4$ мм.

3.15. Написать уравнение кривой охлаждения медного проводника диаметром $d = 10$ мм, по которому в течении 40 минут протекал постоянный ток $I = 400$ А, если коэффициент отдачи с поверхности проводника $k_{\text{то}} = 10$ Вт/(м²·°C), температура окружающей среды, которой яв-

ляется спокойный воздух, $\theta_o = 35^\circ\text{C}$. Значение удельного сопротивления меди за время нарастания температуры $\rho = 1,75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

3.16. Определить постоянную времени нагрева и построить кривую нагрева стальной шины прямоугольного сечения $90 \times 4 \text{ мм} \times \text{мм}$, если по ней протекает $I = 500 \text{ А}$, шина расположена в спокойном воздухе, температура которого $\theta_o = 35^\circ\text{C}$. Коэффициент теплоотдачи с поверхности шины $k_{\text{то}} = 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. Удельное сопротивление стали принять $\rho = 12 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

3.17. Написать уравнение кривой нагрева медного проводника диаметром $d = 40 \text{ мм}$ с учетом изменения удельного сопротивления от температуры, если в момент времени $t = 0$ он нагружается током $I = 2250 \text{ А}$. Проводник расположен в спокойном воздухе, температура которого $\theta_o = 35^\circ\text{C}$, а коэффициент теплоотдачи с поверхности проводника $k_{\text{то}} = 16 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

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

3.19. Определить эквивалентный длительный ток ступени пускового сопротивления двигателя постоянного тока.

Условия пуска: число пусков в час 240, длительность протекания тока через сопротивление при одном пуске 1,5 секунды, ток $I = 160 \text{ А}$. Сопротивление набирается из фехралевых элементов, постоянная времени элементов – $T = 300 \text{ сек}$.

4. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СИЛЫ

4.1. Методические указания

Для решения задач данного раздела необходимо:

уяснить методы расчета электродинамических сил (усилий – ЭДУ) и способы определения направлений действия сил;

изучить модели для расчета электродинамических сил между проводниками, между контактами, между проводником и ферромагнитным телом; ЭДУ в витке, катушке, между витками и катушками на постоянном и переменном токе;

изучить физические процессы в электрической дуге и модели, описывающие дугу;

усвоить понятие электродинамической стойкости электрических аппаратов [1-5].

4.2. Краткие теоретические сведения

Расчет электродинамических сил базируется на *уравнении Ампера* или *уравнении энергетического баланса*.

Первый метод удобно использовать, если известна индукция в любой точке проводника, для которого необходимо определить силу.

Полная сила F , действующая на проводник длиной l , определяется по закону Ампера (4.1), а направление силы – по правилу левой руки

$$F = \int_0^l B i \sin \beta dl, \quad (4.1)$$

где dl – элемент проводника с током; l – длина проводника; B – индукция магнитного поля, создаваемого другими проводниками; i – ток проводника; $\sin \beta$ – угол между элементом проводника и вектором индукции.

При расчете электродинамических сил токоведущих контуров, выполненных в виде витков или катушек (дугогасительные обмотки контакторов, автоматов, обмотки трансформаторов тока, реакторов) используют энергетический метод и выражение

$$F = \partial W / \partial x, \quad (4.2)$$

где W – электромагнитная энергия; x – координата, в направлении которой действует определяемая сила (обобщенная координата).

Уравнение (4.2) выражено в частных производных, так как изменение магнитной энергии нужно находить при изменении лишь той координаты, которую стремится изменить определяемая электродинамическая сила. Например, при определении силы,рывающей виток с током, обобщенной координатой является радиус витка; при определении силы между двумя витками с токами обобщенной координатой является расстояние между ними.

Для системы двух взаимосвязанных контуров электромагнитная энергия определяется как

$$W = L_1 i_1^2 / 2 + L_2 i_2^2 / 2 + M i_1 i_2,$$

где L_1, L_2 – собственные индуктивности контуров; i_1, i_2 – токи в контурах; M – взаимная индуктивность.

Соотношение (4.2) позволяет рассчитать как силы, действующие в изолированном контуре, так и силы, действующие между контурами.

Для определения сил внутри одного независимого контура пользуются уравнением $F = \partial W / \partial x = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial x}$. При расчете силы взаимодействия контуров принимается, что энергия изменяется только в результате изменения взаимного расположения контуров. При этом энергия, обусловленная собственной индуктивностью контура, считается неизменной, а сила взаимодействия между контурами равна $F = \partial W / \partial x = i_1 i_2 \frac{\partial M}{\partial x}$.

Энергетический метод удобен для использования, если известна аналитическая зависимость индуктивности или взаимной индуктивности от геометрических размеров токоведущих контуров.

Из (4.2) следует, что положительному направлению электродинамической силы соответствует возрастание энергии системы контуров $\partial W / \partial x > 0$. Деформация контура или его перемещение происходит под действием силы таким образом, чтобы электромагнитная энергия системы возрастала.

Электродинамические силы между параллельными проводниками можно рассчитать на основе выражения (4.1), так как в этом случае легко определить индукцию в любой точке пространства.

Если проводники бесконечно тонкие (ток сосредоточен в геометрической оси проводников), то электродинамическая сила, действующая на проводник, равна

$$F = [\mu_0 / (4\pi)] i_1 i_2 k_d = 10^{-7} i_1 i_2 k_d, \text{ Н}, \quad (4.3)$$

где $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$, Гн/м – магнитная проницаемость воздуха;

$k_d = \frac{2l}{a} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2} - \frac{a}{l} \right]$ – геометрический фактор (коэффициент контура электродинамических сил), зависящий только от размеров проводников и их расположения.

В случае бесконечно длинных проводников $a/l \ll 1$ и $k_d = 2l/a$.

Для двух параллельных проводников разной длины геометрический фактор рассчитывается по формуле

$$k_d = \frac{\sum D - \sum S}{a},$$

где $\sum D$ – сумма диагоналей трапеции, построенной на взаимодействующих проводниках; $\sum S$ – суммарная длина боковых сторон этой трапеции.

При расчете электродинамических сил должно быть учтено взаимное расположение проводников с токами, а также форма и размеры их сечений.

Для случая произвольного расположения проводников величина электродинамической силы может быть найдена по (4.3). При этом значение геометрического фактора k_d определяется по таблицам, приведенным в литературе (табл. П.12).

Круглая и кольцевая формы сечения проводников не влияют на величину электродинамических сил, так как магнитные силовые линии вокруг проводников представляют в этом случае (как и в случае бесконечно тонких проводников) окружности и можно считать, что ток сосредоточен в геометрической оси проводника. Это утверждение справедливо только при постоянном токе. Проявление эффекта близости при переменном токе в круглых проводниках может изменить значение электродинамической силы.

При прямоугольной форме сечения размеры проводника влияют на величину электродинамических сил, так как магнитные силовые линии являются овалами. Это влияние учитывается с помощью коэффициента формы k_ϕ , который определяется аналитически, либо по кривым, приведенным в справочной литературе (рис. П.5). Значение электродинамических сил находится как

$$F = 10^{-7} i_1 i_2 k_d k_\phi, \text{ Н.} \quad (4.4)$$

Электродинамические силы витка, катушки, между витками и между катушками рассчитываются по энергетической формуле.

Индуктивность *кругового витка с током* при $r/R \leq 0,25$ (r – радиус проводника, R – радиус витка) индуктивность витка $L = \mu_0 R (\ln \frac{8R}{r} - 1,75)$, Гн. При протекании тока i возникает сила F_R , стремящаяся увеличить радиус витка, так как с ростом R растет индуктивность L и электромагнитная энергия витка.

Электродинамическая сила, приложенная к окружности длиной $2\pi R$, определяется как

$$F_R = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dR} = (\mu_0 / 2) i^2 (\ln \frac{8R}{r} - 0,75) = 2\pi i^2 10^{-7} (\ln \frac{8R}{r} - 0,75), \text{ Н.} \quad (4.5)$$

Сила, разрывающая виток (сила в сечении витка), определяется по формуле

$$F_q = i^2 10^{-7} (\ln \frac{8R}{r} - 0,75), \text{ Н.} \quad (4.6)$$

Механические напряжения растяжения, возникающие в сечении витка от силы F_q , не должны превышать допустимых величин.

Если круговой виток находится в равномерном магнитном поле, создаваемом другими проводниками, то необходимо учитывать дополнительную силу, обусловленную взаимодействием тока витка с внешним полем.

Для катушки, имеющей w витков, индуктивность и сила возрастают пропорционально квадрату числа витков

$$F_q = (iw)^2 10^{-7} \left(\ln \frac{8R}{r} - 0,75 \right), \text{ Н.} \quad (4.7)$$

Проводники катушки обтекаются током одного направления, при этом возникают силы притяжения между отдельными витками. В результате катушка подвергается действию электродинамических сил, сжимающих ее по высоте и увеличивающих средний диаметр.

Если расстояние между витками h , соизмеримое с их диаметрами $2R_1$ и $2R_2$, мало отличается от R_1 , то взаимоиндуктивность выражается формулой

$$M = \mu_0 R_1 \left(\ln \frac{8R_1}{\sqrt{h^2 + c^2}} - 2 \right), \text{ Гн,} \quad (4.8)$$

где $c = R_2 - R_1$.

Вертикальная составляющая электродинамической силы F_h витка определяется как

$$F_h = i_1 i_2 dM / dh = i_1 i_2 \frac{4\pi R_1 h}{h^2 + c^2} 10^{-7}, \text{ Н.} \quad (4.9)$$

Направление силы можно определить следующим образом: если потоки, создаваемые токами, направлены в одну сторону, то витки будут притягиваться (максимальное значение потокосцепления возникает при совпадении контуров), если в разные стороны – отталкиваться.

Радиальная составляющая силы от собственного тока и от взаимодействия этого тока с продольной составляющей поля другого витка определяется как

$$F_R = \frac{dW}{dR} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dR} + i_1 i_2 \frac{dM}{dR}, \quad (4.10)$$

где $R = R_1$ при определении силы первого витка и $R = R_2$ при определении силы второго витка.

Электродинамические силы между цилиндрическими катушками определяются как

$$F = i_1 i_2 dM / dx, \quad (4.11)$$

где x – расстояние между катушками.

Производную dM / dx определяют с помощью семейства кривых Двайта или Хака в зависимости от величины h / D (отношения высоты к среднему диаметру катушки) (рис. П.6).

Электродинамические силы при переменном токе изменяются во времени, причем для однофазной цепи сила не меняется по знаку, а для трехфазной – меняется. Для расчета аппаратов важно знать максимальное значение этой силы. Расчет электродинамических сил, действующих на токоведущие части аппаратов на переменном токе, производится теми же методами и по тем же зависимостям, что и при постоянном токе.

Обобщенную зависимость силы от тока можно представить в виде (4.4).

Для *однофазного переменного тока* $i(t) = I_m \sin \omega t$ эта зависимость выглядит как

$$F = 10^{-7} k_d k_\phi I_m^2 (\sin \omega t)^2 = c I_m^2 \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} = \frac{F_m}{2} - \frac{F_m}{2} \cos 2\omega t, \quad (4.12)$$

где $c = 10^{-7} k_d k_\phi$, $F_m = c I_m^2$ – максимальное значение силы.

Из (4.12) видно, что сила имеет постоянную и переменную составляющие. Переменная составляющая меняется во времени с удвоенной частотой по сравнению с частотой переменного тока. Амплитуда переменной составляющей F_m равна по значению амплитуде постоянной составляющей.

Расчет электродинамических сил на переменном токе проводят по максимальному значению тока для наиболее тяжелого случая (короткое замыкание при наличии апериодической составляющей тока). При этом значение силы

$$F_{\max} = c k_{уд}^2 I_m^2. \quad (4.13)$$

Ударный коэффициент $k_{уд}$ зависит от мощности установки, расположения аппарата и вида цепи. При расчетах обычно принимают $k_{уд} = 1,8$.

Для *трехфазной системы токов*, в которой токи сдвинуты на 120° , сила меняет знак и достигает в определенные моменты времени максимальных значений отталкивания и притягивания. Причем, максимальные значения отталкивающих и притягивающих сил равны и имеют место в средней фазе

$$F = 0,87 c I_m^2. \quad (4.14)$$

С учетом апериодической составляющей максимальная электродинамическая сила, действующая на провод средней фазы, определяется как

$$F_{\max} = 0,87 ck_{\text{уд}}^2 I_m^2. \quad (4.15)$$

4.3. Примеры решения задач

4.1. Определить электродинамическое усилие, действующее на 1 м длины прямолинейного бесконечно тонкого проводника, по которому протекает постоянный ток $I = 10$ кА. Проводник находится в однородном постоянном магнитном поле, магнитная индукция в каждой точке проводника $B = 0,1$ Тл, а угол между направлением тока и вектором индукции $\beta = 30^\circ$.

Решение. Действующее на проводник усилие определяется на основе закона Ампера (4.1)

$$F = I l B \sin \beta = 10 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 0,1 \cdot 0,5 = 500 \text{ Н.}$$

Ответ: $F = 500$ Н.

4.2. Определить величину электродинамического усилия, с которым притягиваются друг к другу два параллельных круглых, бесконечно длинных проводника, находящихся на расстоянии одного метра друг от друга ($a = 1$ м). Токи в проводниках равны 10 и 20 кА.

Решение. Электродинамическое усилие, действующее между параллельными проводниками, определим по (4.3)

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} I_1 I_2 k_d = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{4\pi} 10 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 2 = 40 \text{ Н,}$$

где $k_d = 2l/a = 2 \cdot 1/1 = 2$ – коэффициент электродинамических сил для бесконечно длинных проводников.

Ответ: $F = 40$ Н.

4.3. Определить электродинамическое усилие, действующее между параллельно расположенными шинами, представленными на рис. 4.1, если $I_1 = 10$ кА, $I_2 = 15$ кА, $l_1 = 1$ м, $l_2 = 1,5$ м, $a = 0,5$ м.

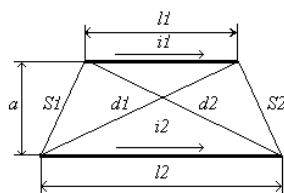


Рис. 4.1. Эскиз шин

Решение. Электродинамическое усилие, действующее между параллельными проводниками, определим по (4.3)

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} I_1 I_2 k_d = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{4\pi} 10 \cdot 10^3 \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 3,14 = 47,1 \text{ Н},$$

где $k_d = \frac{\sum D - \sum S}{a} = \frac{2,69 - 1,12}{0,5} = 3,14$ – коэффициент электродинамических сил для двух параллельных проводников разной длины.

Ответ: $F = 47,1 \text{ Н}$.

4.4. Определить усилие, разрывающее проводник с током $I = 100 \text{ кА}$ в месте, где проводник изменяет свое поперечное сечение от $D = 50 \text{ мм}$ до $d = 20 \text{ мм}$.

Решение. Электродинамическое усилие в проводниках при изменении поперечного сечения (усилие Дуайта)

$$F_D = \frac{\mu_0}{4\pi} I^2 \ln \frac{D}{d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{4\pi} (100 \cdot 10^3)^2 \ln \frac{50 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot 10^{-3}} = 916,3 \text{ Н},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная проницаемость вакуума.

Ответ: $F_D = 916,3 \text{ Н}$.

4.5. Определить электродинамическое усилие, возникающее между двумя витками цилиндрического однослойного реактора, имеющего радиус витка $R = 1 \text{ м}$. Витки имеют шаг $h = 10 \text{ мм}$. По реактору протекает ток короткого замыкания $I = 50 \text{ кА}$.

Решение. Для решения воспользуемся формулой (4.9)

$$F_h = i_1 i_2 dM / dh = i_1 i_2 \frac{4\pi R_1 h}{h^2 + c^2} 10^{-7} =$$

$$= I^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot R / h = (50 \cdot 10^3)^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 / (10 \cdot 10^{-3}) = 314000 \text{ Н}.$$

Ответ: $F_h = 314000 \text{ Н}$.

4.6. Определить 1) электродинамическую силу, возникающую между двумя витками цилиндрического однослойного реактора, имеющего радиус $R = 1 \text{ м}$; 2) силу в витках реактора и 3) силу, разрывающую виток, изготовленный из круглого провода радиусом $r = 10 \text{ мм}$. Шаг витков реактора $h = 20 \text{ мм}$. По реактору протекает ток короткого замыкания $I_{кз} = 50 \text{ кА}$.

Решение. Для решения задачи можно воспользоваться формулами энергетического баланса $F = \partial W / \partial x$, определения энергии

$$W = L_1 i_1^2 / 2 + L_2 i_2^2 / 2 + M i_1 i_2, \quad \text{взаимной} \quad \text{индуктивности}$$

$$M = \mu_0 R \left(\ln \frac{8R}{h} - 2 \right) \text{ и индуктивности } L = \mu_0 R \left(\ln \frac{8R}{r} - 1,75 \right).$$

Электродинамическая сила, действующая между витками реактора, определяется по формуле

$$F_h = \partial W / \partial x = dW / dh = i_1 i_2 dM / dh = I^2 |dM / dh|.$$

Тогда

$$F_h = I^2 \mu_0 R / h = (50 \cdot 10^3)^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 / (20 \cdot 10^{-3}) = 157000 \text{ Н.}$$

Электродинамическая сила в витке, обусловленная собственной индуктивностью, определяется по формуле

$$F_R' = \frac{dW}{dR} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dR} = (1/2) I^2 \mu_0 \left(\ln \frac{8R}{r} - 0,75 \right) =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot (50 \cdot 10^3)^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \left(\ln \frac{8 \cdot 1}{10 \cdot 10^{-3}} - 0,75 \right) = 9317 \text{ Н.}$$

Электродинамическая сила в витке, обусловленная взаимодействием тока витка с продольной составляющей тока другого витка, определяется по формуле

$$F_R'' = \frac{dW}{dR} = i_1 i_2 \frac{dM}{dR} = I^2 \mu_0 \left(\ln \frac{8R}{h} - 1 \right) =$$

$$= (50 \cdot 10^3)^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \left(\ln \frac{8 \cdot 1}{20 \cdot 10^{-3}} - 1 \right) = 15673 \text{ Н.}$$

Сила в витке реактора

$$F_R = F_R' + F_R'' = 9317 + 15673 = 24990 \text{ Н.}$$

Эта сила равномерно распределена по дуге окружности витка.

Сила, разрывающая виток

$$F_q = \frac{F_R}{2\pi} = \frac{24990}{2 \cdot 3,14} = 3979 \text{ Н.}$$

Ответ: $F_h = 157000 \text{ Н}; F_R = 24990 \text{ Н}; F_q = 3979 \text{ Н.}$

4.7. Проверить, удовлетворяют ли условиям прочности и жесткости ножи трехполюсного разъединителя (рис. 4.2), по которым протекает предельный ток трехфазного короткого замыкания. Амплитуда установившегося тока короткого замыкания $I_{к3} = 50 \text{ кА}$, частота тока $f = 50 \text{ Гц}$.

Ножи разъединителя выполнены из меди, поперечное сечение их имеет прямоугольную форму с размерами $h \times b = 100 \times 10 \text{ мм} \times \text{мм}$. Ножи расположены широкими сторонами друг к другу, жестко закреплены в

нижней части разъединителя и свободно опираются в верхней части. Длина ножей $l = 600$ мм, расстояние между ними $a = 300$ мм.

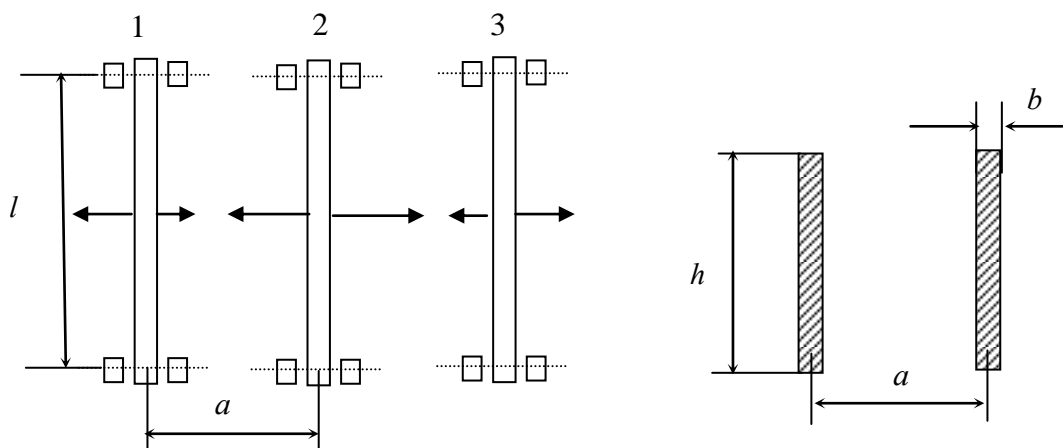


Рис. 4.2. Эскиз рубильника

Решение. С электрической точки зрения ножи рубильника представляют собой токоведущие прямолинейные проводники, с механической точки зрения – балку на двух опорах.

Максимальная сила возникает в средней фазе. При наличии апериодической составляющей тока эта сила определяется по формуле

$$F = 10^{-7} k_d k_\phi 0,87 k_{уд}^2 I_m^2 = 10^{-7} \cdot 2,47 \cdot 1 \cdot 0,87 \cdot 1,8^2 \cdot (50 \cdot 10^3)^2 = 1741 \text{ Н},$$

где $k_d = \frac{2l}{a} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2} - \frac{a}{l} \right] = \frac{2 \cdot 0,6}{0,3} \cdot \left[\sqrt{1 + \left(\frac{0,3}{0,6}\right)^2} - \frac{0,3}{0,6} \right] = 2,47$ – геометри-

ческий фактор, $k_\phi \approx 1$ при $\frac{a-b}{b+h} = \frac{0,3-0,01}{0,01+0,1} = 2,64 \geq 2$.

Нож разъединителя можно рассчитать как балку на двух опорах, при этом напряжение на изгиб

$$\sigma_{из} = \frac{M}{W_{из}} = \frac{130,6}{1,67 \cdot 10^{-6}} = 78,2 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2,$$

где $M = \frac{Fl}{8} = \frac{1741 \cdot 0,6}{8} = 130,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$ – максимальное значение изгибающего момента, $W_{из} = \frac{hb^2}{6} = \frac{0,1 \cdot 0,01^2}{6} = 1,67 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ – момент сопротивления.

Напряжение на изгиб меньше допустимого напряжения для меди ($\sigma_{из} = 78,2 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2 \leq \sigma_{доп} = 137 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$), следовательно, ножи рубильника удовлетворяют условиям прочности.

Во избежание появления механического резонанса необходимо, чтобы частота собственных колебаний механической системы не была равна частоте силы.

Для параллельных шин частота собственных колебаний

$$f_{\text{соб}} = \frac{k}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{\gamma S}} = \frac{4,8}{0,6^2} \sqrt{\frac{10,8 \cdot 10^{10} \cdot 0,08 \cdot 10^{-7}}{85,3 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3}}} = 42,43 \text{ Гц},$$

где k – коэффициент учитывающий жесткость заделки ножа. При жестко заделанном одном конце и свободном закреплении другого конца $k = 4,8$, $E = 10,8 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ – модуль упругости меди, $\gamma = 85,3 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^3$ – удельный вес меди, $S = hb = 0,1 \cdot 0,01 = 10^{-3} \text{ м}^2$ – площадь поперечного сечения, $J = \frac{hb^3}{12} = \frac{0,1 \cdot 0,01^3}{12} = 0,08 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$ – момент инерции поперечного сечения.

Так как собственная частота меньше вынужденной ($f_{\text{соб}} = 42,43 \text{ Гц} < f_{\text{д}} = 100 \text{ Гц}$), механический резонанс не будет иметь места, а ножи удовлетворяют условиям жесткости.

Ответ: Ножи разъединителя удовлетворяют условиям прочности и жесткости.

4.4. Задачи для решения

4.8. Определить величину коэффициента электродинамических усилий для системы двух параллельных круглых проводников длиной $l = 10 \text{ м}$, находящихся на расстоянии $a = 2 \text{ м}$ друг от друга.

4.9. Определить величину электродинамического усилия, действующего между двумя параллельными круглыми проводниками длиной $l = 4 \text{ м}$, находящимися на расстоянии $a = 3 \text{ м}$. По проводникам протекают постоянные токи $I_1 = 10 \text{ кА}$ и $I_2 = 15 \text{ кА}$.

4.10. Определить величину электродинамического усилия, действующего между отрезками проводников, расположенными под углом $\alpha = 30^\circ$, если по ним протекают токи $I_1 = 20 \text{ кА}$ и $I_2 = 10 \text{ кА}$, а длина проводников $l_1 = l_2 = 1,5 \text{ м}$. Расстояние от конца проводника до точки пересечения осей симметрии $a = 0,5 \text{ м}$.

4.11. Часть круглого проводника диаметром $d = 10 \text{ мм}$ длиной $l_1 = 1 \text{ м}$ расположена под прямым углом по отношению к другой его части длиной $l_2 = 2 \text{ м}$. Определить величины электродинамических усилий, действующих на части проводника, если по нему протекает постоянный ток $I = 12 \text{ кА}$.

4.12. Определить электродинамическое усилие, действующее на перемычку, соединяющую две параллельные шины круглого сечения, если по шинам и перемычке протекает постоянный ток $I = 15$ кА, диаметр шин и перемычки $d = 20$ мм, расстояние между шинами $a = 0,5$ м, шины имеют бесконечную длину.

4.13. Определить величину электродинамического усилия, возникающего между двумя параллельными шинами прямоугольного сечения $h \times b = 100 \times 10$ мм \times мм на длине $l = 2$ м. Расстояние между осями шин $a = 20$ мм, по ним протекает ток короткого замыкания $I_{кз} = 54$ кА. Шины расположены широкими сторонами друг к другу.

4.14. Определить электродинамическое усилие, возникающее между двумя параллельными шинами прямоугольного сечения 100×10 мм \times мм, расположенными узкими сторонами друг к другу, если по ним протекает ток короткого замыкания $I_{кз} = 60$ кА, расстояние между шинами $a = 110$ мм. Расчет усилия произвести для участка длиной $l = 3$ м.

4.15. 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.

4.16. 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 \times мм, а его средний радиус $R = 0,5$ м.

4.17. Вычислить усилие, стремящееся разорвать однослойную катушку дискового реактора. Катушка состоит из 10 витков и по ней протекает ток $I = 800$ А, ее внутренний диаметр $D_{вн} = 320$ мм, наружный диаметр $D_{нар} = 480$ мм. Определить также усилие, сжимающее витки катушки.

4.18. Определить электродинамическое усилие, с которым притягиваются друг к другу два круглых $d = 5$ мм соседних витка цилиндрического реактора, если средний радиус витков $R = 0,5$ м, ток $I = 35$ кА, шаг витков реактора $h = 10$ мм.

4.19. Вычислить электродинамическое усилие, с которым взаимодействуют два круговых витка, если по ним протекают токи $I_1 = 10$ кА и $I_2 = 15$ 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 вит-

ками, находящимися в воздухе — $h = 0,5$ м. Вычислить усилия,рывающие витки и сжимающие проводники. Витки расположены симметрично.

4.20. Определить характер изменения во времени и значение электродинамического усилия, действующего на ножи рубильника (рис. 4.3), по которым протекает однофазный ток короткого замыкания.

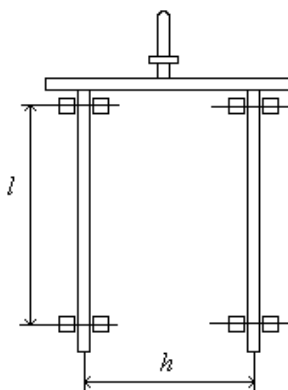


Рис. 4.3. Эскиз рубильника

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.

5. МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

5.1. Методические указания

Для решения задач данного раздела необходимо:

усвоить основные понятия, относящиеся к магнитным цепям: магнитные величины, их размерности и формулы, выражающие связь между ними, части магнитной цепи, рабочий и нерабочий зазор, рабочий поток и потоки рассеяния, картины магнитного поля, характеристики магнитных материалов;

уяснить основные законы магнитных цепей (законы Ома, Кирхгофа, полного тока);

освоить методы расчета проводимости воздушных зазоров с выпучиванием потока или зазоров сложной конфигурации;

уяснить особенности магнитной цепи переменного тока, векторную диаграмму, влияние короткозамкнутых обмоток и потерь в стали;

изучить картины распределения потоков в типичных электромагнитных механизмах электрических аппаратов [1-5].

5.2. Краткие теоретические сведения

Магнитные цепи находят широкое применение в различных электрических аппаратах (электромагнитных устройствах, контакторах, автоматах, приводах выключателей, тормозных, тяговых, подъемных электромагнитах, реле, датчиках, электромагнитных муфтах, дросселях и других).

Под магнитной цепью понимается совокупность тел и сред, создающая ориентированный магнитный поток при наличии магнитодвижущей силы.

Магнитные цепи можно разбить на два основных вида: цепи с малым потоком рассеяния и цепи с большим потоком рассеяния.

С достаточной для практики точностью потоком рассеяния можно пренебречь в тех случаях, когда он мал по сравнению с основным потоком: 1) магнитопровод замкнут; 2) на пути основного потока имеется воздушный зазор сравнительно малой величины, а магнитная цепь насыщена незначительно; 3) размагничивающее действие вторичной обмотки сравнительно невелико.

Методы расчета магнитных цепей основываются на законах Ома и Кирхгофа применительно к магнитным цепям. При этом используются аналитические и графоаналитические методы. Основные трудности расчета магнитных цепей связаны с учетом нелинейной магнитной характеристики, потерь в стали и размагничивающего действия магнитных экранов.

При расчете магнитной цепи определяется МДС обмотки, необходимая для создания заданного рабочего потока (прямая задача), или рабочий поток по известной МДС (обратная задача).

Эти задачи решаются с помощью уравнений Кирхгофа для магнитной цепи. Согласно первому закону Кирхгофа алгебраическая сумма потоков в любом узле магнитной цепи равна нулю

$$\sum_{k=1}^n \Phi_k = 0. \quad (5.1)$$

Второй закон Кирхгофа следует из известного закона полного тока. Падение магнитного потенциала по замкнутому контуру равно сумме МДС, действующих в этом контуре

$$\oint H dl = \sum i_w = \sum F_j, \quad (5.2)$$

где H – напряженность магнитного поля; dl – элементарный участок контура интегрирования; $\sum i_w = \sum F_j$ – алгебраическая сумма МДС, действующих в контуре, w – число витков обмотки.

Расчет магнитных цепей подобен расчету электрических цепей и основан на применении уравнений (5.1) – (5.2). Так как индукция $B = \mu_0 \mu_r H$ ($\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость воздуха; μ_r – относительная магнитная проницаемость) можно записать

$$\oint \frac{B S dl}{\mu_r \mu_0 S} = \sum i_w, \quad (5.3)$$

где S – сечение данного участка магнитной цепи.

Выражение $dl / (\mu_r \mu_0 S)$ аналогично выражению для активного сопротивления элемента электрической цепи. Выражение (5.3) можно представить в виде

$$\oint \Phi dR_m = \sum i_w, \quad (5.4)$$

где dR_m – магнитное сопротивление участка длиной dl .

Когда поток в отдельных участках магнитной цепи не меняется интеграл в (5.4) можно заменить суммой

$$\sum_{j=1}^n \Phi_j R_{mj} = \sum F_j. \quad (5.5)$$

Направление МДС, совпадающее с направлением обхода контура, принимается за положительное.

Из (5.5) вытекает закон Ома для магнитной цепи, при этом вместо тока подставляется магнитный поток, вместо электрического сопротивления – магнитное, вместо электродвижущей силы – магнитодвижущая (МДС).

По аналогии с электрическим сопротивлением магнитное можно представить как

$$R_m = \frac{1}{\mu_r \mu_0} \frac{l}{S} = \rho_m \frac{l}{S}, \quad (5.6)$$

где ρ_m – магнитное сопротивление единицы длины магнитной цепи при сечении, равном единице, м/Гн.

Для расчета по (5.5) необходимо знать ρ_m . Если задана не кривая $\rho_m(B)$, а кривая намагничивания материала $B(H)$, для расчета удобно использовать выражение (5.2). Если на отдельных участках магнитной цепи индукция постоянна, то интеграл в (5.2) можно заменить суммой

$$\sum_{j=1}^n H_j l_j = \sum_{j=1}^n F_j. \quad (5.7)$$

По известной индукции в каждом участке с помощью кривой намагничивания находят напряженность H_j , после чего с помощью (5.7) можно отыскать МДС обмотки.

При расчете магнитной цепи часто более удобной является величина, обратная магнитному сопротивлению, – магнитная проводимость, Гн

$$\Lambda = 1 / R_m = \mu_r \mu_0 S / l. \quad (5.8)$$

Уравнение (5.5) при этом принимает вид

$$\sum_{j=1}^n \Phi_j \frac{1}{\Lambda_j} = \sum F_j. \quad (5.9)$$

Магнитное сопротивление и проводимость ферромагнитных материалов являются сложной нелинейной функцией индукции, что затрудняет решение как прямой, так и обратной задачи.

Магнитная проницаемость воздушного зазора является постоянной величиной. Для сравнительно простых форм полюсов проводимости воздушных зазоров могут быть вычислены аналитически. Например, для полюсов при малом воздушном зазоре δ между ними поле можно считать равномерным, а проводимость определить по формуле

$$\Lambda_\delta = \mu_0 \frac{S}{\delta}. \quad (5.10)$$

Для сравнительно больших зазоров необходимо учитывать выпучивание. Расчет в этом случае для полюсов простых форм проводят по эмпирическим формулам (табл. П.14). Для полюсов более сложных форм аналитические выражения отсутствуют, и проводимости могут быть рассчитаны графическими методами (построение картины поля), методом вероятных путей потока (разбивки области поля на простейшие геометрические фигуры, для которых известны аналитические выражения).

При переменном напряжении ток в обмотке определяется в основном ее индуктивным сопротивлением, которое меняется при перемещении якоря. Магнитное сопротивление магнитопровода на переменном токе зависит не только от μ_r, l, S , но и от потерь в стали и наличия короткозамкнутых витков. Потери в стали в схеме замещения магнитной цепи переменного тока учитываются с помощью реактивного магнитного сопротивления X_m .

Расчет магнитной цепи переменного тока ведется с помощью законов Кирхгофа в комплексной форме методом последовательных приближений. При расчете принимается синусоидальное изменение напряжения, тока и потока. Если же магнитная цепь работает при сравнительно больших индукциях (за коленом кривой намагничивания), то расчет ведется по первой гармонике.

5.3. Примеры решения задач

5.1. Определить суммарную магнитную проводимость рабочих зазоров между якорем и полюсами электромагнитного механизма, представленного на рисунке 5.1.

Размеры полюсов: $a = 2 \cdot 10^{-2}$ м, $b = 2 \cdot 10^{-2}$ м, $r = 2 \cdot 10^{-2}$ м, $\delta = 0,06 \cdot 10^{-2}$ м, $\alpha = 15^\circ$.

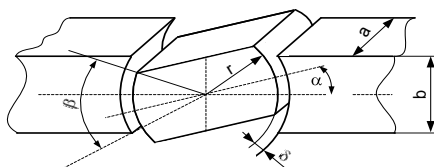


Рис. 5.1. Полюса электромагнитного механизма

Решение. Для концентрических полюсов с постоянными значениями зазора, толщины, ширины и радиуса, проводимость без учета потока выпучивания определяется по формуле (табл. П.14)

$$\Lambda_\delta = \mu_0 a \beta / \ln(1 + \delta / r) =$$

$$= 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 0,785 / \ln[1 + 0,06 \cdot 10^{-2} / (2 \cdot 10^{-2})] = 66,75 \cdot 10^{-8} \text{ Гн},$$

где α – угол сдвига между осью полюсов и осью якоря; $\beta = 2 \arcsin(b / 2r) - \alpha = 2 \arcsin[2 \cdot 10^{-2} / (2 \cdot 2 \cdot 10^{-2})] - 15 = 45^\circ = 0,785$ рад – угол перекрытия.

Ответ: $\Lambda_\delta = 66,75 \cdot 10^{-8}$ Гн.

5.2. Определить суммарную магнитную проводимость рабочих зазоров и удельную проводимость рассеяния прямоходового электромагнита (рис. 5.2).

Геометрические размеры электромагнита: $\delta = 0,1 \cdot 10^{-2}$ м, $d_{\text{пн}} = 2,4 \cdot 10^{-2}$ м, $h_{\text{пн}} = 0,3 \cdot 10^{-2}$ м, $h = 3,6 \cdot 10^{-2}$ м, $d_c = 1,6 \cdot 10^{-2}$ м.

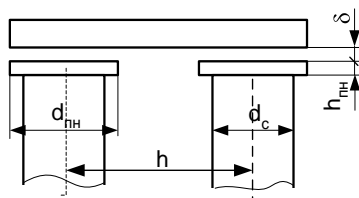


Рис. 5.2 Полюса прямоходового электромагнита с внешним якорем

Решение. Магнитная проводимость одного рабочего зазора определяется по формуле (табл. П.14)

$$\Lambda_{\delta} = \mu_0 \left(\frac{\pi d^2}{4\delta} + 0,58d + \frac{xd}{0,22\delta + 0,4x} \right) =$$

$$= 4\pi 10^{-7} [\pi \cdot (2,4 \cdot 10^{-2})^2 / (4 \cdot 0,1 \cdot 10^{-2}) + 0,58 \cdot 2,4 \cdot 10^{-2} +$$

$$+ 0,3 \cdot 10^{-2} \cdot 2,4 \cdot 10^{-2} / (0,22 \cdot 0,1 \cdot 10^{-2} + 0,4 \cdot 0,3 \cdot 10^{-2})] = 65 \cdot 10^{-8} \text{ Гн},$$

где $d = d_{\text{нн}}$; $x = h_{\text{нн}}$.

Суммарная проводимость

$$\Lambda_{\delta\Sigma} = \Lambda_{\delta} / 2 = 65 \cdot 10^{-8} / 2 = 32,5 \cdot 10^{-8} \text{ Гн}.$$

Удельная проводимость рассеяния (табл. П.14)

$$\lambda_{\sigma} = \mu_0 \frac{\pi}{\ln(n + \sqrt{n^2 - 1})} = 4\pi 10^{-7} \frac{3,14}{\ln(2,25 + \sqrt{2,25^2 - 1})} = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м},$$

где $n = h/d_c = 3,6 \cdot 10^{-2} / 1,6 \cdot 10^{-2} = 2,25$.

Ответ: $\Lambda_{\delta} = 65 \cdot 10^{-8} \text{ Гн}$, $\Lambda_{\delta\Sigma} = 32,5 \cdot 10^{-8} \text{ Гн}$, $\lambda_{\sigma} = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$.

5.3. Определить величину тока возбуждения для создания индукции в тороиде $B = 1,2 \text{ Тл}$ и найти потери в стали.

Внутренний диаметр тороида $d = 10 \text{ см}$, радиальная ширина $a = 0,8 \text{ см}$, толщина пакета тороида $b = 1,5 \text{ см}$, марка стали – 1511, толщина листов $\Delta = 0,5 \text{ мм}$, коэффициент заполнения стали $k_c = 0,95$, число витков обмотки $w = 1000$, частота переменного тока $f = 50 \text{ Гц}$.

Решение. Активное сечение магнитопровода

$$S = abk_c = 0,8 \cdot 10^{-2} \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,95 = 1,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Величина магнитного потока

$$\Phi = BS = 1,2 \cdot 1,14 \cdot 10^{-4} = 13,7 \cdot 10^{-5} \text{ Вб}.$$

По индукции из кривых (рис. П.7) находим $\rho_R = 3,2 \cdot 10^4 \text{ см/Гн}$ и $\rho_X = 1 \cdot 10^4 \text{ см/Гн}$.

Тогда магнитные сопротивления тороида

$$R_m = \rho_R \frac{\pi(d+a)}{S} = 3,2 \cdot 10^4 \frac{3,14(10+0,8)}{1,14} = 95,2 \cdot 10^4 \text{ 1/Гн};$$

$$X_m = \rho_X \frac{\pi(d+a)}{S} = 1 \cdot 10^4 \frac{3,14(10+0,8)}{1,14} = 29,75 \cdot 10^4 \text{ 1/Гн};$$

$$Z_m = \sqrt{R_m^2 + X_m^2} = \sqrt{(95,3 \cdot 10^4)^2 + (29,8 \cdot 10^4)^2} = 92,74 \cdot 10^4 \text{ 1/Гн}.$$

Величина и фаза тока

$$I = F_{\kappa} / w = \Phi Z_m / w = 13,7 \cdot 10^{-5} \cdot 92,74 \cdot 10^4 / 1000 = 0,137 \text{ А};$$

$$\varphi = \arctg(R_m / X_m) = \arctg(95,2 \cdot 10^4 / 29,75 \cdot 10^4) = 72,65^\circ.$$

Потери на вихревые токи и гистерезис в стали

$$P_c = 4k_\phi f \Phi^2 X_m = 4 \cdot 1,11 \cdot 50 \cdot (13,7 \cdot 10^{-5})^2 \cdot 29,75 \cdot 10^4 = 1,24 \text{ Вт},$$

где $k_\phi = 1,11$ – коэффициент формы поля.

Ответ: $I = 0,137 \text{ А}$; $P_c = 1,24 \text{ Вт}$.

5.4. Задачи для решения

5.4. Для клапанного электромагнита, имеющего полюсный наконечник (рис. 5.3), рассчитать суммарную проводимость воздушных зазоров и удельную проводимость рассеяния магнитной системы.

Геометрические размеры электромагнита: $\delta = 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$,
 $d = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $d_{\text{пн}} = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $h_{\text{пн}} = 0,3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $h = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$,
 $a_k = 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $b_k = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ – ширина ярма, $R_0 = h + a_k + 0,5d$.

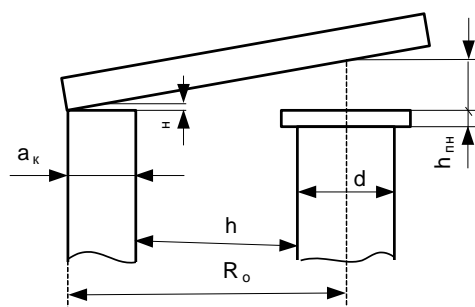


Рис. 5.3 Эскиз полюсов клапанного электромагнита

5.5. Определить проводимость воздушного зазора электромагнита с втягивающимся ярком (рис. 5.4). Геометрические размеры: $2\alpha = 60^\circ$, $\delta = 0,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $d = 3,3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$. Как изменится проводимость, если угол при вершине будет $2\alpha = 180^\circ$ (якорь и стоп с плоским торцом).

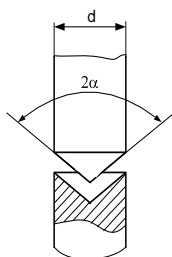


Рис. 5.4 Эскиз полюсов электромагнита с втягивающимся ярком

5.6. Определить величину потока в рабочем воздушном зазоре электромагнита (рис. 5.5) при рабочем зазоре $\delta = 1,5 \text{ мм}$ и МДС катушки $F = 1000 \text{ А}$.

Магнитным сопротивлением стали пренебречь. Геометрические размеры электромагнита: $d_{\text{пн}} = 2,4 \cdot 10^{-2}$ м; $h_{\text{пн}} = 0,3 \cdot 10^{-2}$ м; $l = 5 \cdot 10^{-2}$ м.

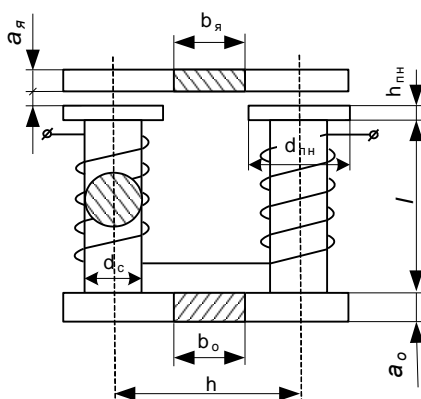


Рис. 5.5 Эскиз магнитопровода электромагнита

5.7. Определить магнитодвижущую силу обмотки электромагнита (рис. 5.5). Величина потока в рабочем воздушном зазоре $\Phi_{\delta} = 2,3 \cdot 10^{-4}$ Вб. Учесть магнитное сопротивление стали (магнитопровод выполнен из стали 10).

Геометрические размеры электромагнита: $d_{\text{пн}} = 2,4 \cdot 10^{-2}$ м; $d_c = 1,6 \cdot 10^{-2}$ м; $a_r = 0,6 \cdot 10^{-2}$ м; $a_o = 1 \cdot 10^{-2}$ м; $b_r = b_o = 2,4 \cdot 10^{-2}$ м; $h = 3,6 \cdot 10^{-2}$ м; $h_{\text{пн}} = 0,3 \cdot 10^{-2}$ м; $l = 5 \cdot 10^{-2}$ м.

5.8. Составить схему замещения магнитной цепи без учета стальных участков магнитопровода и потока рассеяния для электромагнита переменного тока (рис. 5.6) и определить входящие в эту схему магнитные сопротивления при притяннутом якоре.

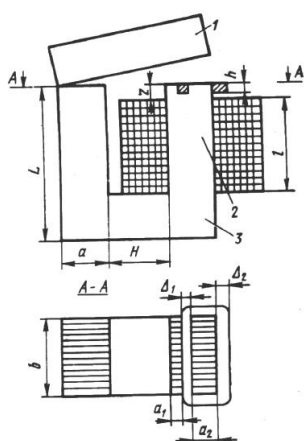


Рис. 5.6 Эскиз магнитопровода с катушкой

Геометрические размеры электромагнита: конечный рабочий зазор неэкранированной и экранированной частей полюса $\delta_1 = \delta_2 = 0,05$ мм; паразитный зазор $\delta_e = 0,2$ мм; $\Delta_1 = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $\Delta_2 = 4 \cdot 10^{-3}$ м; $a_1 = 3 \cdot 10^{-3}$ м; $a_2 = 7 \cdot 10^{-3}$ м; $a = 12 \cdot 10^{-3}$ м; $b = 20 \cdot 10^{-3}$ м; $h = 3 \cdot 10^{-3}$ м; $z = 5 \cdot 10^{-3}$ м; $H = 20 \cdot 10^{-3}$ м; $L = 52 \cdot 10^{-3}$ м.

Виток выполнен из латуни; температура нагрева $\theta = 80^\circ \text{C}$.

6. ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ

6.1. Методические указания

Для решения задач данного раздела необходимо:
понять физическую сущность работы различных электромагнитов, особенности электромагнитов постоянного и переменного тока;
уяснить понятие и вид статических тяговых характеристик различных электромагнитов;
изучить и запомнить формулы силы тяги электромагнитов;
освоить расчет обмоток постоянного и переменного тока;
изучить динамику различных электромагнитов; параметры, от которых зависят время трогания и время движения; методы ускорения и замедления срабатывания и отпускания электромагнитов;
освоить методы расчета времени срабатывания и отпускания [1-5].

6.2. Краткие теоретические сведения

Электромагнитные устройства (электромагниты) служат для создания магнитного поля с помощью обмотки, обтекаемой электрическим током. Электромагниты применяются в контакторах, пускателях, реле, автоматах, электромагнитных муфтах и т.д.

По способу включения в электрическую цепь электромагниты могут быть с *параллельной* (включаются на полное напряжение сети) или с *последовательной обмоткой* (включаются в цепь последовательно с сопротивлением нагрузки).

По роду тока обмотки различают электромагниты *постоянного* и *переменного* тока. Электромагниты постоянного тока могут быть *нейтральными* (нечувствительными к направлению тока в обмотке) и *поляризованными* (срабатывают лишь при определенном направлении тока).

По времени действия имеются *быстродействующие*, с *нормальным временем действия* и *замедленные* электромагниты.

По характеру движения якоря различают поворотные (якорь поворачивается вокруг оси или опоры) и прямоходовые (якорь перемещается поступательно) электромагниты.

При прохождении тока по обмотке (намагничивающей катушке) создается магнитодвижущая сила, под действием которой возбуждается магнитный поток Φ . Этот поток замыкается через воздушный зазор и между другими частями магнитной цепи, имеющими различные магнитные потенциалы. Воздушный зазор, меняющийся при перемещении якоря, называется *рабочим*. В рабочих зазорах развивается электромагнитная сила, осуществляющая перемещение (притяжение) якоря. От якоря сила передается приводимому в движение механизму. Магнитный поток, проходящий через рабочий зазор, называется рабочим. Все остальные потоки называются *потоками рассеяния*.

Расчет электромагнитной силы, развиваемой электромагнитом постоянного тока, базируется на уравнении энергетического баланса электромагнита

$$U idt = i^2 R dt + id\psi . \quad (6.1)$$

Левая часть (6.1) определяет величину электрической энергии, поступающей в систему за время dt , а первый член правой части выражает потери в активном сопротивлении. Последнее должно учитывать также и потери от вихревых токов. Потери от вихревых токов сравнительно невелики, и ими можно пренебречь при рассмотрении энергетических преобразований. Второй член в правой части уравнения (6.1) равен электрической энергии, преобразованной электромагнитом в магнитную при изменении потокосцепления за время dt .

Для расчета электромагнитной силы используются графоаналитические и аналитические методы.

Для любого момента времени справедливо

$$\int_0^t U idt = \int_0^t i^2 R dt + \int_0^{\psi} id\psi , \quad (6.2)$$

где ψ – значение потокосцепления к моменту времени t .

Пока электромагнитная сила электромагнита меньше силы возвратной пружины, якорь неподвижен и потокосцепление нарастает при неизменном значении начального рабочего зазора δ_1 (рис. 6.1, кривая 1). При достижении определенного значения потокосцепления (ψ_1) электромагнитная сила превысит силу возвратной пружины и под ее действием якорь переместится в положение, при котором рабочий зазор станет равен δ_2 . Потокосцепление при этом увеличится до значения ψ_2 ,

а ток по переходной кривой ad – до значения i_2 . Зависимость $\Psi(i)$ при зазоре δ_2 изображена кривой 2 (рис. 6.1).

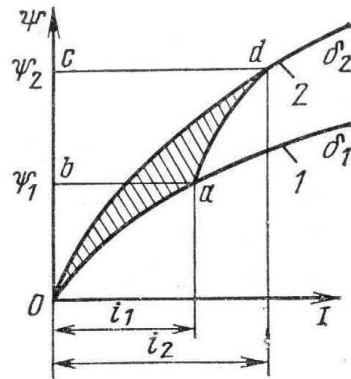


Рис. 6.1. К графическому определению энергии в электромагните

До начала трогания якоря энергия магнитного поля, запасенная в цепи

$$A_1 = \int_0^{\Psi_1} i d\Psi = m_i m_\Psi S_{0ab}, \quad (6.3)$$

где m_i – масштаб по оси тока, А/; m_Ψ – масштаб по оси потокосцепления, Вб/мм; S_{0ab} – площадь криволинейного треугольника $0ab$, мм².

После перемещения якоря энергия магнитного поля возрастет на величину

$$A_2 = \int_{\Psi_1}^{\Psi_2} i d\Psi = m_i m_\Psi S_{abcd}, \quad (6.4)$$

где S_{abcd} – площадь криволинейной трапеции $abcd$.

При изменении зазора от δ_1 до δ_2 якорем совершена механическая работа A_3 . Энергия, накопленная в магнитном поле к концу хода якоря

$$A_4 = \int_0^{\Psi_2} i d\Psi = m_i m_\Psi S_{0cd}. \quad (6.5)$$

На основании закона сохранения энергии можно записать

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4. \quad (6.6)$$

Тогда механическая работа, совершенная якорем,

$$A_3 = A_1 + A_2 - A_4. \quad (6.7)$$

Согласно рис. 6.1 эта энергия

$$A_3 = m_i m_\Psi (S_{0ab} + S_{abcd} + S_{0cd}) = m_i m_\Psi S_{0ad}. \quad (6.8)$$

Средняя электромагнитная сила на ходе от δ_1 до δ_2

$$F_{\text{ср}} = A_3 / \Delta x = -A_3 / \Delta \delta = -A_3 / (\delta_2 - \delta_1), \quad (6.9)$$

где Δx – перемещение якоря, $\Delta \delta$ – изменение зазора.

Если перейти на бесконечно малое изменение зазора dx и учесть, что $x = \delta_1 - \delta$ и $dx = -d\delta$, получим

$$F_3 = -dA_3 / d\delta. \quad (6.10)$$

Электромагнитная сила действует в сторону уменьшения зазора.

Для каждого элементарного перемещения можно определить свое значение A_3 и среднюю электромагнитную силу на данном участке хода якоря.

Зависимость электромагнитной силы от рабочего зазора при неизменном токе I в обмотке называется *статической тяговой характеристикой* электромагнита. Для электромагнита с поворотным якорем под статической тяговой характеристикой понимается зависимость момента на якоре от угла его поворота, снятая при неизменном токе обмотки.

Для статической тяговой характеристики ток в цепи не меняется и электромагнитная сила рассчитывается как

$$F_3 = -\frac{1}{2} I \frac{d\Psi}{d\delta}. \quad (6.11)$$

Если пренебречь влиянием потоков рассеяния и насыщения стали выражение (6.11) приобретает вид

$$F_3 = -\frac{1}{2} F_\delta^2 \frac{d\Lambda_\delta}{d\delta}, \quad (6.12)$$

где F_δ – падение магнитного потенциала в воздушном зазоре, А.

Для расчета электромагнитной силы при равномерном поле в рабочем зазоре и ненасыщенных полюсах применяется формула Максвелла (для электромагнита с одним рабочим зазором)

$$F_3 = \frac{1}{2\mu_0} B_\delta^2 S = \frac{1}{2} \frac{\Phi_\delta^2}{\mu_0 S}, \quad (6.13)$$

где B_δ – индукция, Тл; Φ_δ – магнитный поток, Вб, в рабочем зазоре; S – площадь полюса, м².

Статические тяговые характеристики могут меняться в широких пределах путем изменения формы полюсов и конструктивного исполнения электромагнита. Выбор полюсов и исполнения магнитной системы электромагнита диктуется характеристикой противодействующих сил или моментов.

При выводе выражений для электромагнитной силы электромагнитов переменного тока принимается предположение о синусоидальном характере тока и потока. Мгновенное значение электромагнитной силы

в однофазном электромагните изменяется от нуля до максимального значения $F_{\text{э max}}$ с частотой, в два раза превышающей частоту переменного тока, питающего электромагнит

$$F_{\text{э}} = F_{\text{э max}} \sin^2 \omega t = \frac{F_{\text{э max}}}{2} - \frac{F_{\text{э max}}}{2} \cos 2\omega t. \quad (6.14)$$

Амплитудное значение силы для однофазных систем без экранирующего витка при равномерном поле в рабочем зазоре и ненасыщенной магнитной системе определяется по формуле Максвелла

$$F_{\text{э max}} = \frac{\Phi_{\text{max}}^2}{2\mu_0 S}, \quad (6.15)$$

где S – площадь полюса.

Среднее значение электромагнитной силы за период обычно принимается за расчетное значение полезной силы

$$F_{\text{э ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T F_{\text{э}} dt = F_{\text{э max}} / 2. \quad (6.16)$$

Изменение электромагнитной силы во времени отрицательно сказывается на работе электромагнита. В определенные моменты времени сила возвратной пружины становится больше электромагнитной, что вызывает отрыв якоря от сердечника. При нарастании электромагнитной силы якорь вновь притягивается к сердечнику. В результате якорь непрерывно вибрирует, что нарушает работу контактов. Создается шум, расшатывается магнитная система. Для устранения вибраций в однофазных электромагнитах используются короткозамкнутые витки из меди или алюминия.

Процесс срабатывания электромагнита имеет динамический характер. После включения обмотки электромагнита происходит нарастание магнитного потока до тех пор, пока электромагнитная сила не станет равной противодействующей. После этого якорь начинает двигаться, причем ток и магнитный поток будут продолжать изменяться по закону, определяемому параметрами электромагнита и противодействующей силой. После достижения якорем конечного положения ток и магнитный поток будут изменяться до тех пор, пока не достигнут установившихся значений.

Время срабатывания электромагнита – это время с момента подачи сигнала срабатывания на обмотку электромагнита до момента остановки якоря.

Время срабатывания при включении – промежуток времени с момента включения обмотки до момента полного притяжения якоря

$$t_{\text{ср.вкл}} = t_{\text{тр}} + t_{\text{дв}}, \quad (6.17)$$

где $t_{\text{тр}}$ – время трогания (время с момента включения обмотки до момента начала движения якоря); $t_{\text{дв}}$ – время движения (время перемещения якоря из положения при начальном зазоре $\delta_{\text{н}}$ до положения при конечном зазоре $\delta_{\text{к}}$).

Время трогания можно определить из уравнения

$$U = iR dt + d\Psi / dt. \quad (6.18)$$

В начальном положении якоря рабочий зазор относительно велик. Магнитную цепь можно считать ненасыщенной, а индуктивность обмотки – неизменной, при этом (6.18) преобразуется к виду

$$U = iR dt + L di / dt. \quad (6.19)$$

Решение (6.19) имеет вид

$$i = I_y (1 - e^{-t/T}), \quad (6.20)$$

где $I_y = U / R$ – установившееся значение тока; $T = L / R$ – постоянная времени цепи.

Ток обмотки, при котором начинается движение якоря, называется *током трогания* $i_{\text{тр}}$.

Для момента трогания (6.20) можно записать в виде

$$i_{\text{тр}} = I_y (1 - e^{-t_{\text{тр}}/T}). \quad (6.21)$$

Решение (6.21) относительно $t_{\text{тр}}$

$$t_{\text{тр}} = \frac{L}{R} \ln \frac{1}{1 - i_{\text{тр}} / I_y}. \quad (6.22)$$

Как только начинается движения якоря зазор уменьшается, его магнитная проводимость Λ_{δ} и индуктивность обмотки $L = w^2 \Lambda_{\delta}$ увеличиваются. При этом (6.18) принимает вид

$$U = iR + L di / dt + idL / dt. \quad (6.23)$$

При движении якоря $dL / dt > 0$, поэтому i и di / dt начинают уменьшаться. Зависимость тока от времени показана на рис. 6.2. Чем больше скорость движения якоря, тем больше спад тока. В точке b , соответствующей крайнему положению якоря, уменьшение тока прекращается. Далее ток меняется по закону

$$i = I_0 e^{-t/T_1} + I_y (1 - e^{-t/T_1}), \quad (6.24)$$

где $T_1 = L_{\text{к}} / R_{\text{к}}$ – постоянная времени при конечном зазоре $\delta = \delta_{\text{к}}$.

Во время движения якоря ток в обмотке меньше установившегося. Поэтому электромагнитная сила, развиваемая электромагнитом в динамике, меньше, чем в статике при $\delta = \text{const}$.

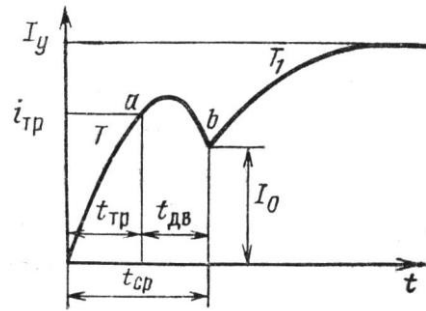


Рис. 6.2. Кривая изменения тока во времени

При движении якоря физические процессы в электромагните описываются уравнениями

$$U = iR + d\psi / dt; \quad (6.25)$$

$$F_y dx = d(mv^2) / 2 + F_{np} dx,$$

где dx – путь, пройденный якорем; m – масса подвижных частей, приведенная к зазору; v – скорость перемещения якоря, приведенная к зазору; F_{np} – противодействующая сила пружины, приведенная к зазору.

Вторым уравнением описывается энергетический баланс в электромагните. Работа, произведенная электромагнитом, затрачивается на увеличение кинетической энергии его подвижных частей и преодоление противодействующих сил. Оба эти уравнения нелинейны и их решение затруднительно. Ориентировочно определить время движения якоря можно с помощью статической тяговой характеристики электромагнита и характеристики противодействующих сил.

При отключении обмотки электромагнита магнитный поток начинает уменьшаться из-за введения в цепь большого сопротивления дугового или тлеющего разряда между контактами. В момент, когда электромагнитная сила становится меньше силы пружины, происходит отпускание якоря.

Время срабатывания при отключении – промежуток времени с момента отключения обмотки (или ее закорачивания) до момента возврата якоря в первоначальное положение

$$t_{\text{ср.откл}} = t_{\text{сп}} + t_{\text{дв}}, \quad (6.26)$$

где $t_{\text{сп}}$ – время спада потока от установившегося значения Φ_y до потока отпускания $\Phi_{\text{отп}}$; $t_{\text{дв}}$ – время движения.

Процесс отпускания описывается уравнением

$$U = iR_{\text{д}} + iR + L_{\text{к}} \frac{di}{dt}, \quad (6.27)$$

где R_d – сопротивление дуги (искры).

Если положить $R_d = const$, то решение уравнения (6.27) принимает вид

$$i = \left(\frac{U}{R} + \frac{U}{R + R_d} \right) e^{-t/T_k} + \frac{U}{R + R_d}, \quad (6.28)$$

где $T_k = L_k / (R_d + R)$ – постоянная времени.

Обычно $R_d \gg R$. Тогда

$$i = \frac{U}{R} e^{-t/T_k}. \quad (6.29)$$

Так как R_d велико, то T_k очень мало. Процесс спада тока (а, следовательно, и магнитного потока) протекает очень быстро. Если сердечник, на котором размещается обмотка, сплошной и имеет большое сечение, то спад магнитного потока замедляется из-за вихревых токов, поле которых стремится поддерживать спадающий поток.

После трогания якоря его движение происходит за счет силы противодействующей пружины. Если эта сила постоянна и равна среднему значению $F_{пр.сп} = (F_k + F_n) / 2$, где F_k, F_n – сила пружины при конечном и начальном зазорах, то движение описывается уравнением

$$F_{пр.сп} = ma = m dv / dt \quad (6.30)$$

и ускорение

$$a = F_{пр.сп} / m. \quad (6.31)$$

Время движения $t_{дв} = \sqrt{2(\delta_n - \delta_k) / a}$ или $t_{дв} = \sqrt{2(\delta_n - \delta_k)m / F_{пр.сп}}$.

Переходный процесс при включении обмотки электромагнита переменного тока описывается уравнением

$$U_{max} \sin(\omega t + \alpha) = iR + w d\Phi / dt. \quad (6.32)$$

Для электромагнита с ненасыщенным магнитопроводом решение уравнения (6.32) имеет вид

$$\Phi = \Phi_{max} (e^{-tR/L} - \cos \omega t), \quad (6.33)$$

где $\Phi_{max} = \frac{U}{4,44 f w}$ – максимальное значение потока (без учета активно-

го сопротивления обмотки).

Кривая изменения магнитного потока во времени аналогична кривой изменения тока при коротком замыкании – наибольшие пиковые значения магнитного потока (и силы) имеют место в начале включения (примерно через 0,01 с после начала включения при частоте тока $f = 50$ Гц), чем обеспечивается малое время трогания.

Для изменения скорости срабатывания применяют специальные методы, которые связаны либо с изменением конструкции и параметров электромагнита, либо с применением специальных схем.

6.3. Примеры решения задач

6.1. Рассчитайте электромагнитную силу подковообразного электромагнита (рис. 5.5) при воздушном зазоре $\delta = 0,1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ и намагничивающей силе $F_\delta = 708 \text{ А}$.

Размеры полюсов электромагнита принять такими же, как в задаче 5.6.

Решение. Электромагнитная сила для одного воздушного зазора определяется по формуле (без учета насыщения и потоков рассеяния)

$$F_\delta = -\frac{1}{2} F_\delta^2 \frac{d\Lambda_\delta}{d\delta} = -\frac{1}{2} 708^2 \cdot (-2,9 \cdot 10^{-4}) = 72 \text{ Н},$$

где производная проводимости воздушного зазора для подковообразного электромагнита, имеющего полюсный наконечник (табл. П.14)

$$\begin{aligned} \frac{d\Lambda_\delta}{d\delta} &= -\frac{\mu_0}{2} \left(\frac{\pi d_{\text{пн}}^2}{4\delta^2} + \frac{0,22 d_{\text{пн}} h_{\text{пн}}}{(0,22\delta + 0,4 h_{\text{пн}})^2} \right) = \\ &= -\frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2} \left(\frac{\pi \cdot (2,4 \cdot 10^{-2})^2}{4 \cdot (0,1 \cdot 10^{-2})^2} + \frac{0,22 \cdot 2,4 \cdot 10^{-2} \cdot 0,3 \cdot 10^{-2}}{(0,22 \cdot 0,1 \cdot 10^{-2} + 0,4 \cdot 0,3 \cdot 10^{-2})^2} \right) = \\ &= 2,9 \cdot 10^{-4} \text{ Гн/м}. \end{aligned}$$

Ответ: $F_\delta = 72 \text{ Н}$.

6.2. Определите диаметр медного провода обмотки постоянного тока, необходимый для создания намагничивающей силы $F = 600 \text{ А}$ при напряжении питания $U = 110 \text{ В}$. Внутренний $D_{\text{вн}}$ и наружный $D_{\text{нар}}$ диаметры катушки 34 и 50 мм, ее температура $\theta = 80 \text{ }^\circ\text{С}$.

Решение. Сечение обмоточного провода q находим исходя из необходимой МДС $F = I_w = \frac{U}{R} w = \frac{U q w}{\rho l_{\text{cp}} w} = \frac{U q}{\rho l_{\text{cp}}}$

$$q = F \rho l_{\text{cp}} / U = 600 \cdot 2,18 \cdot 10^{-8} \cdot 0,132 / 110 = 1,57 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2,$$

где $\rho = \rho_0 (1 + \alpha \theta) = 1,62 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0043 \cdot 80) = 2,18 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. – удельное электрическое сопротивление материала провода при температуре $\theta = 80 \text{ }^\circ\text{С}$; $l_{\text{cp}} = \pi (D_{\text{нар}} + D_{\text{вн}}) / 2 = \pi (50 + 34) \cdot 10^{-3} / 2 = 0,132 \text{ м}$ – средняя длина витка катушки.

Диаметр провода обмотки

$$d = \sqrt{4q/\pi} = \sqrt{4 \cdot 1,57 \cdot 10^{-8} / 3,14} = 0,14 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Ответ: $d = 0,14 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$

6.3. На рисунке 6.3 показан эскиз быстродействующего электромагнита с втягивающимся якорем, который на постоянном токе при магнитодвижущей силе обмотки $F = 2670 \text{ А}$ (число витков $w = 248$, ток $I = 10,8 \text{ А}$) и начальном рабочем зазоре $\delta_{\text{н}}$ создает магнитный поток $\Phi_{\text{max}} = 8,5 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$ и развивает электромагнитную силу $F_{\text{э}} = 342 \text{ Н}$.

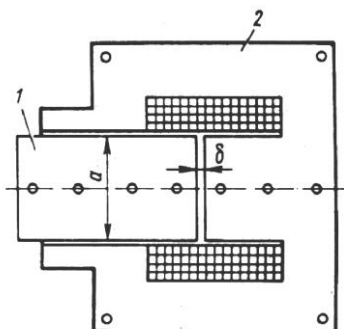


Рис. 6.3. Эскиз магнитопровода с катушкой

Определить число витков, необходимое для создания такого же магнитного потока (амплитудное значение) в случае питания обмотки переменным током напряжением $U = 127 \text{ В}$ с частотой $f = 50 \text{ Гц}$, а также развиваемую этим потоком электромагнитную силу и намагничивающий ток при том же значении магнитодвижущей силы обмотки. Магнитопровод набран из электротехнической стали с коэффициентом заполнения $k_c = 0,93$, якорь и стоп имеют квадратное сечение со стороной $a = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$.

Решение. Число витков катушки электромагнита переменного тока

$$w = U / (4,44 f \Phi_{\text{max}}) = 127 / (4,44 \cdot 50 \cdot 8,5 \cdot 10^{-4}) = 673.$$

Намагничивающий ток обмотки $I_{\text{max}} = F / w = 2670 / 673 = 3,97 \text{ А}$.

Вычислив площадь стали полюса $S = a^2 k_c = (3 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 0,93 = 8,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, определим амплитудное значение электромагнитной силы

$$F_{\text{эmax}} = \frac{1}{2} \frac{\Phi_{\text{max}}^2}{\mu_0 S} = \frac{1}{2} \frac{(8,5 \cdot 10^{-4})^2}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 8,4 \cdot 10^{-4}} = 342,4 \text{ Н.}$$

Средняя сила $F_{\text{эcp}} = 342,4 / 2 = 171,2 \text{ Н}$.

Ответ: $w = 673$; $F_{\text{эmax}} = 342,4 \text{ Н}$; $F_{\text{эcp}} = 171,2 \text{ Н}$; $I_{\text{max}} = 3,97 \text{ А}$.

6.4. Для клапанного электромагнита переменного тока (рис. 6.4) определить активное сопротивление экранирующего витка.

Геометрические размеры электромагнита: $\Delta_1 = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $\Delta_2 = 4 \cdot 10^{-3}$ м; $a_1 = 3 \cdot 10^{-3}$ м; $a_2 = 7 \cdot 10^{-3}$ м; $a = 12 \cdot 10^{-3}$ м; $b = 20 \cdot 10^{-3}$ м; $h = 3 \cdot 10^{-3}$ м; $H = 20 \cdot 10^{-3}$ м; $L = 52 \cdot 10^{-3}$ м.

Виток выполнен из латуни; температура нагрева $\theta = 80$ °С.

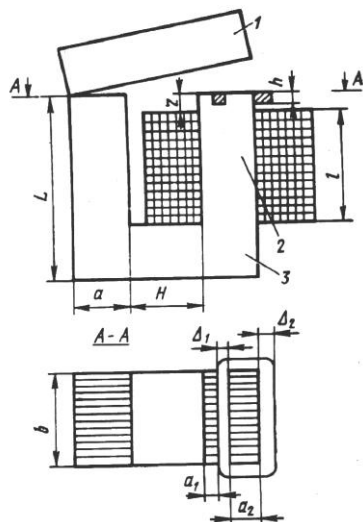


Рис. 6.4. Эскиз клапанного электромагнита

Решение. Удельное электрическое сопротивление материала витка при температуре $\theta = 80$ °С

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\theta) = 7 \cdot 10^{-8}(1 + 0,0015 \cdot 80) = 7,84 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Для латуни удельное электрическое сопротивление $\rho_0 = 7 \cdot 10^{-8}$ Ом · м, температурный коэффициент $\alpha = 0,0015$ 1/°С .

Активное сопротивление витка

$$r = \rho \left(\frac{b + \Delta_2}{\Delta_1 h} + \frac{b + 2a_2 + 2\Delta_2 + \Delta_1}{\Delta_2 h} \right) =$$

$$= 7,84 \cdot 10^{-8} \left(\frac{20 \cdot 10^{-3} + 4 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^{-3}} + \frac{20 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 7 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^{-3}} \right) =$$

$$= 6,01 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}.$$

Ответ: $r = 6,01 \cdot 10^{-4}$ Ом.

6.5. Для быстродействующего электромагнита постоянного тока (рис. 6.3) рассчитать время срабатывания, если зазор $\delta_n = 0,24 \cdot 10^{-2}$ м, число витков $w = 248$, индуктивность обмотки $L_n = 0,034$ Гн, активное сопротивление $R = 1,12$ Ом, напряжение питания $U = 12$ В, начальная противодействующая сила $F_{н.пр} = 223$ Н, ток трогания $i_{тр} = 6,9$ А, масса подвижных частей $m = 0,44$ кг.

Решение. Время трогания определим по формуле (6.22)

$$t_{тр} = \frac{L}{R} \ln \frac{1}{1 - i_{тр} / I_y} = \frac{0,034}{1,12} \ln \frac{1}{1 - 6,9 / 10,7} = 31,4 \cdot 10^{-3} \text{ с},$$

где $I_y = U / R = 12 / 1,12 = 10,7$ А установившееся значение тока.

Для быстродействующих электромагнитов время движения определяется по формуле

$$t_{дв} = \sqrt[3]{3\delta_n m / (U \sqrt{F_{пр.н} / (2\delta_n L_n)} - R F_{пр.н} / L_n)} =$$

$$= \sqrt[3]{3 \cdot 0,24 \cdot 10^{-2} \cdot 0,44 / (12 \sqrt{223 / (2 \cdot 0,24 \cdot 10^{-2} \cdot 0,034)} - 1,12 \cdot 223 / 0,034)} =$$

$$= 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

Время срабатывания определим по формуле

$$t_{ср.вкл} = t_{тр} + t_{дв} = 31,4 \cdot 10^{-3} + 7,8 \cdot 10^{-3} = 39,2 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

Ответ: $t_{ср.вкл} = 39,2 \cdot 10^{-3}$ с.

6.4. Задачи для решения

6.6. Рассчитайте силу тяги электромагнита постоянного тока при МДС обмотки $F = 1200$ А, 80% которой приходится на проведение потока через рабочий зазор величиной $\delta = 3$ мм. Диаметр полюса $d = 50$ мм. Расчет выполните без учета влияния выпучивания потока в зазоре.

6.7. Определите число витков w , диаметр провода d , площадь сечения провода q , сопротивление R при температуре $\theta = 50$ °С, ток I , мощность P и температуру нагрева θ_k катушки электромагнита постоянного тока (рис. 6.5).

Намагничивающая сила $Iw = 450$ А, напряжение питания $U = 110$ В, $l_0 = 48$ мм, $h_0 = 11$ мм.

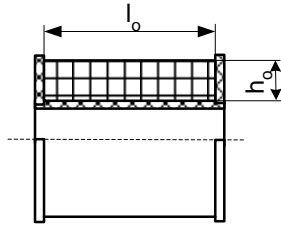


Рис. 6.5. Эскиз катушки электромагнита

6.8. Определите площадь зазора в электромагните переменного тока с двумя одинаковыми зазорами, необходимую для создания максимальной тяговой силы величиной $F_{\text{э max}} = 480 \text{ Н}$ при амплитудном значении индукции в зазоре $B_{\delta \text{ max}} = 1 \text{ Тл}$.

Рассчитайте магнитный поток и число витков, необходимое для его создания при напряжении на обмотке 85% от номинального, равного 220 В. Влиянием активного сопротивления обмотки пренебречь.

6.9. Определите индуктивное сопротивление обмотки электромагнита с двумя одинаковыми зазорами. Величина зазора $\delta = 5 \text{ мм}$, размеры сечения стержня $a \times b = 24 \times 32 \text{ мм}$, его длина $l = 50 \text{ мм}$, удельная проводимость рассеяния 3 мкГн/м , число витков обмотки $w = 2000$, частота сети $f = 50 \text{ Гц}$. Влиянием магнитного сопротивления стали пренебречь.

6.10. Рассчитайте ток в обмотке электромагнита переменного тока при двух значениях зазора: $\delta = 4 \text{ мм}$ и $\delta = 0,5 \text{ мм}$ (без учета выпучивания поля в зазорах). Площадь полюса равна $S = 0,002 \text{ м}^2$, приведенная проводимость рассеяния $\Lambda_{\sigma} = 0,1 \text{ мкГн}$. Число витков обмотки $w = 700$, активное сопротивление $R = 50 \text{ Ом}$, частота $f = 50 \text{ Гц}$, напряжение $U = 220 \text{ В}$. Рассчитайте также поток в зазоре для обоих случаев.

6.11. Определите число витков обмотки электромагнита переменного тока на напряжение $U = 220 \text{ В}$, частотой $f = 50 \text{ Гц}$, при котором создается магнитный поток $\Phi_{\text{max}} = 0,001 \text{ Вб}$, и выберите диаметр провода, учитывая, что МДС обмотки должна быть равна $F_{\text{max}} = 400 \text{ А}$ (амплитудное значение). Расчетную температуру обмотки примите равной $\theta = 90 \text{ }^\circ\text{С}$, среднюю длину витка – $l_{\text{cp}} = 180 \text{ мм}$. Уточните после этого число витков, используя метод последовательных приближений.

6.12. Какое сопротивление должен иметь короткозамкнутый виток на расщепленном полюсе электромагнита переменного тока при величине зазора $\delta = 0,06 \text{ мм}$ и площади экранированной части полюса $S_{\text{э}} = 200 \text{ мм}^2$, чтобы сдвиг фаз потоков был равен $\psi = 65 \text{ градусов}$. Рас-

считайте поперечное сечение медного витка при его длине $l_{\text{сп}} = 66$ мм и температуре $\theta = 120$ °С.

6.13. Определите время трогания электромагнита постоянного тока, если его намагнивающая сила трогания равна $F_{\text{тр}} = 1250$ А, проводимость магнитной цепи $\Lambda = 0,45$ мкГн, число витков обмотки $w = 9900$ и ее сопротивление $R = 50$ Ом. К обмотке приложено напряжение $U = 110$ В.

6.14. Определите индуктивность катушки при начальном положении якоря $\delta = 5$ мм без учета магнитного сопротивления стальных участков магнитной цепи, магнитных потоков рассеяния и потоков выпучивания; постройте график изменения тока в катушке $i = f(t)$ после замыкания ключа К при неподвижном якоре (рис. 6.6); определите продолжительность электромагнитного переходного процесса при неподвижном якоре.

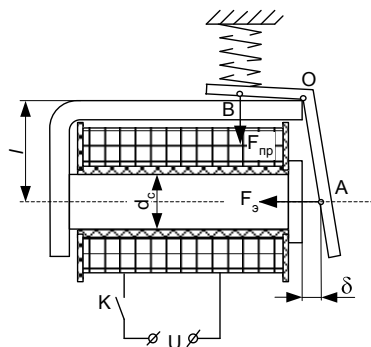


Рис. 6.6. Эскиз электромагнита

Исходные данные: напряжение питания $U = 100$ В, сопротивление катушки $R = 100$ Ом, количество витков катушки $w = 1000$, диаметр сердечника $d_c = 10$ мм, ход якоря в точке А $\delta = 5$ мм, сила пружины в исходном положении якоря $F_{\text{сп}} = 1$ Н, отношение плеч якоря $OA / OB = 2$, длина сердечника $l = 50$ мм.