

## Задачи

### 1 Методы расчета нагрева и охлаждения электрических аппаратов и их частей

Приведены задачи по определению мощности источников теплоты: Джоулева тепла, потерь от поверхностного эффекта, эффекта близости, тепловыделения в ферромагнитных нетоковедущих частях, находящихся в переменном магнитном поле, а также те задачи по расчету теплоотдачи с поверхностей нагретых тел, для решения которых необходимо использовать формулу Ньютона и эмпирические формулы коэффициентов теплоотдачи для типовых, наиболее распространенных в электрических аппаратах, поверхностей охлаждения.

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

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

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

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

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

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

1.7 Определить количество теплоты, выделяемое в магнитопроводе электромагнита, катушка которого намотана круглым медным проводом диаметром  $d = 4$  мм и имеет 250 витков. Магнитопровод изготовлен из листовой трансформаторной стали марки 1512, толщина листов  $\delta = 0,5$  мм. Коэффициент заполнения

магнитопровода  $k_3 = 0,9$ . При подключении катушки к источнику переменного напряжения частоты  $f = 50 \text{ Гц}$  плотность тока составляет  $j = 1,0 \text{ А/мм}^2$ .

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

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

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

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

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

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

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

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

1.16 Определить температуру поверхности цилиндрической катушки без магнитопровода, через которую протекает постоянный ток  $I = 20 \text{ А}$ . Катушка с внутренним  $D_{\text{вн}} = 100 \text{ мм}$  и наружным  $D_{\text{нар}} = 160 \text{ мм}$  диаметрами, высотой  $h = 170 \text{ мм}$ , числом витков  $N = 250$  расположена в спокойном воздухе, температура

которого  $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$ . Диаметр провода  $d = 4$  мм.

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

1.18 Определить температуру круглого медного проводника, окрашенного краской, расположенного в спокойном воздухе, температура которого  $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$ ; по проводнику диаметром  $d = 45$  мм протекает постоянный ток  $I = 2500$  А.

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

1.20 Определить количество теплоты, выделяющееся в чугунном кольце высотой  $h = 200$  мм, с внутренним диаметром  $d = 100$  мм и толщиной стенки  $\delta = 50$  мм, для случая, когда сквозь кольцо проходит шина с переменным током  $I = 2000$  А. Вычислить также температуру поверхности кольца, если частота переменного тока  $f = 50$  Гц, коэффициент теплоотдачи  $k_m = 17$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), а температура окружающей среды  $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$ .

## **2 Неустановившиеся и квазистационарные процессы нагрева и охлаждения частей электрических аппаратов**

Приведены задачи на вычисление постоянных времени нагрева и охлаждения электрических аппаратов, написание уравнений кривых нагрева, на расчёт повторно-кратковременного режима нагрева и наиболее важного режима короткого замыкания (к.з.) с использованием кривых адиабатического нагрева и понятия фиктивного времени короткого замыкания.

2.1. Написать уравнение кривой нагрева круглого медного проводника диаметром  $d = 10$  мм, по которому протекает постоянный ток  $I = 400$  А. Известно, что коэффициент теплоотдачи поверхности проводника  $k_m = 10$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), температура окружающей среды, которой является спокойный воздух,  $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$  а значение удельного сопротивления меди за время нарастания температуры  $\rho = 1,75 \cdot 10^{-8}$  Ом·м.

2.2. Определить постоянную времени нагрева и построить кривую нагрева стальной шины прямоугольного сечения  $90 \times 4$  мм, если по ней протекает ток  $I = 500$  А, шина расположена в спокойном воздухе, температура которого  $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$ , а коэффициент теплоотдачи с поверхности шины  $k_m = 15$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Удельное сопротивление стали принять  $\rho = 12 \cdot 10^{-8}$  Ом·м.

2.3. Определить постоянную времени нагрева цилиндрической катушки постоянного тока, которая намотана круглым медным проводом диаметром  $d = 2$  мм, имеет 500 витков, ее внутренний диаметр  $D_{\text{вн}} = 70$  мм, наружный  $D_{\text{нар}} = 140$  мм, высота  $h = 70$  мм. Теплоотдача в окружающую среду, которой является спокойный воздух, осуществляется с боковых поверхностей и с торцов, коэф-

коэффициент теплоотдачи  $k_m = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

2.4. Написать уравнение кривой нагрева медного круглого проводника диаметром  $d = 40 \text{ мм}$  с учетом изменения удельного сопротивления его от температуры, если в момент времени  $t = 0$  он нагружается током  $I = 2250 \text{ А}$ . Проводник расположен в спокойном воздухе, температура которого  $\vartheta_0 = 35^\circ\text{С}$ , а коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности  $k_m = 16 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

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

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

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

2.8. Определить допустимое число включений в  $1 \text{ час}$  катушки постоянного тока в повторно-кратковременном режиме нагрева, если время рабочего периода катушки  $t_p = 150 \text{ с}$  и по ней протекает ток  $I_{\text{нк}} = 12 \text{ А}$ . Катушка цилиндрическая, намотана круглым медным проводом диаметром  $d = 2 \text{ мм}$ , имеет  $500$  витков, ее внутренний диаметр  $D_{\text{вн}} = 70 \text{ мм}$ , наружный  $D_{\text{нар}} = 140 \text{ мм}$ , высота катушки  $h = 70 \text{ мм}$ . Катушка находится в спокойном воздухе, температура которого  $\vartheta_0 = 35^\circ\text{С}$ . С наружных поверхностей катушки коэффициент теплоотдачи  $k_m = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Изоляция провода хлопчатобумажная без пропитки.

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

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

2.11. Определить температуру алюминиевой шины прямоугольного сечения размером  $40 \times 5 \text{ мм}$  после протекания по ней тока  $I = 20000 \text{ А}$  в течение времени

$t = 1$  с. Начальная температура шины  $\vartheta_n = 0^\circ\text{C}$ .

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

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

2.14. Подобрать стандартную алюминиевую шину прямоугольного сечения для распределительного устройства, в котором возможные токи трехфазного к.з. имеют длительность  $t_{\text{к.з.}} = 10$  с. Шина должна выдерживать токи к.з., установившиеся значения которых  $I_\infty = 30000$  А, а начальные пиковые  $I_p = 75000$  А. Расчет произвести для случая, когда шина, в результате протекания номинального тока была нагрета до температуры  $\vartheta_{\text{нач}} = 80^\circ\text{C}$ . Охлаждение шины естественное воздушное.

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

### **3 Расчет теплоотдачи конвекцией с поверхностями электрических аппаратов**

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

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

3.1. Определить коэффициент теплоотдачи конвекцией с боковой наружной поверхности цилиндрической катушки индуктивности высотой  $h = 200$  мм, расположенной вертикально в спокойном воздухе, температура которого  $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$ . Катушка достаточно удалена от других аппаратов и устройств. В результате протекания по ней тока температура ее поверхности  $\vartheta = 105^\circ\text{C}$ .

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

3.3. Определить коэффициент теплоотдачи с поверхности цилиндрического

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

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

3.5. Определить, во сколько раз изменится коэффициент теплоотдачи конвекцией с поверхности круглого проводника диаметром  $d = 10 \text{ мм}$  воде и трансформаторному маслу по сравнению со спокойным воздухом, если температура поверхности  $90^\circ\text{C}$ , а охлаждающей среды  $35^\circ\text{C}$  для всех случаев.

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

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

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

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

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

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

3.12. Определить коэффициент теплоотдачи с горизонтальной крышки масляного бака, обдуваемой потоком воздуха со скоростью  $w = 2 \text{ м/с}$ . Продольный размер крышки  $a = 1,0 \text{ м}$ , поперечный  $b = 0,5 \text{ м}$ , температура поверхности  $\vartheta_c = 50^\circ\text{C}$ , температура набегающего потока воздуха  $\vartheta_0 = 20^\circ\text{C}$ .

3.13. Определить температуру внутренней поверхности трубы из нержавеющей

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

3.14. Вычислить допустимый ток катушки индуктивности, выполненной из медной трубы, намотанной на цилиндрическую оправку радиуса  $R = 120$  мм. Труба имеет внутренний диаметр  $d = 12$  мм, толщину стенки  $\delta = 2$  мм и по ней с целью охлаждения пропускают воду со скоростью  $w = 1$  м/с. Температуры воды на входе  $\vartheta_{вх} = 25^\circ\text{C}$ , на выходе  $\vartheta_{вых} = 55^\circ\text{C}$ . Катушка имеет 4 витка. Температура внутренней поверхности трубы не должна превышать  $\vartheta_{дон} = 65^\circ\text{C}$ . Определить также количество теплоты, отводимое водой от катушки.

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

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

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

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

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

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

#### 4 Расчет теплоотдачи излучением и конвекцией

Приведены задачи по расчету теплоотдачи излучением для случаев теп-

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

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

4.2. Для условий задачи 4.1 определить максимально допустимый ток в катушке, если магнитопровод выполнен из сплошного бруска вальцованной стали. Для решения задачи использовать формулу.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

хе, температура которого  $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$ .

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

## **5 Расчет распространения теплоты путем теплопроводности в частях электрических аппаратов**

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

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

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

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

5.3. Определить максимальный ток для круглой алюминиевой шины диаметром  $d = 38$  мм. Шина находится в трубе диаметром  $d_{\text{тр}} = 40$  мм, температура поверхности шины  $\vartheta_{\text{ш}} = 50^\circ\text{C}$ , внутренней поверхности трубы  $\vartheta_{\text{тр}} = 35^\circ\text{C}$ . Между шиной и трубой, которые расположены концентрично, находится спокойный сухой воздух.

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

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

ня осуществляется только теплопроводностью. Учесть зависимость теплопроводности воздуха от температуры.

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

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

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

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

5.10. Определить критический диаметр изоляции и допустимую силу тока для круглой медной шины диаметром  $d = 22$  мм, которая изолирована слоем стеклоткани, изготовленной на кремнийорганике. Максимально допустимая температура изоляции  $\vartheta_{дон} = 180^\circ\text{C}$ . Шина находится в спокойном воздухе, температура которого  $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$ , коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности стеклоткани к окружающей среде  $k_m = 10$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Теплопроводность изоляции  $\lambda_{из} = 0,25$  Вт/(м·К).

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

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

Тепловое сопротивление шины определять как тепловое сопротивление плоской стенки с равномерно распределенными в ней источниками теплоты. Учесть зависимость теплопроводности от температуры и предположить, что

теплота равномерно отводится от широких сторон, шины, а шина находится в спокойном воздухе с температурой  $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплоотдачи с поверхности шины  $k_m = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

5.13. Вычислить наибольшую температуру в стальной шине размером  $100 \times 10 \text{ мм}$ , по которой протекает постоянный ток  $I = 1000 \text{ А}$ , шина расположена в спокойном воздухе таким образом, что теплоотдача с ее поверхности в окружающее пространство происходит с одной широкой ее плоскости. Коэффициент теплоотдачи с поверхности шины окружающему воздуху  $k_m = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , а температура окружающего воздуха  $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$ . Удельное сопротивление стали  $\rho = 13 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  и теплопроводность  $\lambda = 40 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  принять не зависящими от температуры.

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

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

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

5.17. Найти температуру наиболее нагретого слоя, его координату и температуры поверхностей изоляции плоской алюминиевой шины размером  $120 \times 10 \text{ мм}$ , по которой протекает постоянный ток  $I = 2000 \text{ А}$ . Шина с одной широкой стороны изолирована пластиной текстолита толщиной  $\Delta_1 = 10 \text{ мм}$ , а другой стороной прилегает к стенке из асбоцемента, толщина которой  $\Delta_2 = 20 \text{ мм}$ . Шина находится в спокойном воздухе, температура которого  $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$ . Коэффициенты теплоотдачи с поверхности текстолита  $k_{m1} = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , а с поверхности асбоцемента  $k_{m2} = 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Удельное сопротивление алюминия принять независимым от температуры и равным  $\rho = 2,9 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , его теплопроводность  $\lambda = 210 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , теплопроводность текстолита  $\lambda_1 = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , асбоцемента  $\lambda_2 = 0,6 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

5.18. Найти координату наиболее нагретого слоя, значение наибольшей температуры и температуру на поверхностях стальной шины с поперечными размерами  $100 \times 10 \text{ мм}$ , расположенной горизонтально в спокойном воздухе, температура которого  $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$ . По шине протекает постоянный ток  $I = 1000 \text{ А}$ . Шина находится между двумя пластинами из изоляционного материала, которые изолируют ее широкие стороны. С одной стороны изоляционная пластина имеет

толщину  $\Delta_1 = 10$  мм и изготовлена из фторопласта-4, с другой стороны имеет толщину  $\Delta_2 = 20$  мм и изготовлена из электрокартона. Коэффициент теплоотдачи с поверхностей фторопласта  $k_{m1} = 8$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), электрокартона  $k_{m2} = 15$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Удельное сопротивление стали  $\rho = 14 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, теплопроводность стали  $\lambda = 45$  Вт/(м·К), фторопласта  $\lambda_1 = 0,3$  Вт/(м·К), электрокартона  $\lambda_2 = 0,2$  Вт/(м·К).

5.19. Определить температуры поверхностей стальной трубчатой шины, охлаждаемой с наружной стороны потоком воздуха, с внутренней - потоком воды. По шине протекает постоянный ток  $I = 1250$  А. Внутренний диаметр шины  $d_{вн} = 3/8$  дюйма, наружный  $d_{нар} = 17$  мм. Коэффициенты теплоотдачи воде  $k_{m1} = 1000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), воздуху  $k_{m2} = 100$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), температура воды и воздуха  $\vartheta_{01} = \vartheta_{02} = \vartheta = 20^\circ\text{C}$ . Удельное сопротивление стали принять равным  $\rho = 15 \cdot 10^{-8}$  Ом·м и не зависящим от температуры, теплопроводность  $\lambda = 45$  Вт/(м·К).

5.20. Определить температуры поверхностей медного токопровода, изготовленного в виде трубы с  $d_{нар} = 40$  мм,  $d_{вн} = 36$  мм, если известно, что по токопроводу протекает ток  $I = 2500$  А, а с внутренней и наружной поверхностями трубопровода коэффициенты теплоотдачи равны  $k_m = 200$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) за счет масляного охлаждения. Температура масла  $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$ .

5.21. Рассчитать наибольшую температуру, радиус наиболее нагретого слоя и температуру внутренней и наружной поверхностей цилиндрической бескаркасной катушки постоянного тока, которая намотана круглым медным проводом диаметром  $d = 4$  мм. Провод изолирован бумажной изоляцией толщиной  $\delta = 0,5$  мм. Катушка расположена в спокойном воздухе, температура которого  $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$ . Коэффициенты теплоотдачи с внутренней и наружной поверхностями одинаковы:  $k_m = 7$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Внутренний диаметр катушки  $D_{вн} = 100$  мм, наружный диаметр  $D_{нар} = 156$  мм, ее высота  $h = 170$  мм. По катушке протекает постоянный ток, плотность которого  $j = 1,5$  А/мм. Катушка намотана рядовой намоткой и имеет 250 витков. Удельное сопротивление меди  $\rho = 2,3 \cdot 10^{-8}$  Ом·м принять независимым от температуры, теплопроводность бумажной изоляции  $\lambda_{из} = 0,1$  Вт/(м·К), воздуха  $\lambda_в = 3 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К).

5.22. Определить, на каком расстоянии можно держать голый рукой медный круглый стержень диаметром  $d = 20$  мм, торец которого приставили к поверхности расплавленного олова с температурой  $\vartheta_{макс} = 300^\circ\text{C}$ . Рука может выдерживать длительную температуру  $\vartheta_{дл} = 50^\circ\text{C}$ . Температура окружающего воздуха  $\vartheta_0 = 20^\circ\text{C}$ , средний коэффициент теплоотдачи с поверхности стержня окружающему воздуху  $k_m = 20$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Средняя теплопроводность меди  $\lambda = 350$  Вт/(м·К).

5.23. Определить температуру электрода из нержавеющей стали непосредственно у держателя, который находится на расстоянии  $l_1 = 250$  мм от свариваемой поверхности, а также температуру электрода в конце сварки, когда его длина уменьшилась до  $l_2 = 50$  мм. Электрод имеет прямоугольное сечение, размеры которого  $3 \times 3$  мм. Коэффициент теплоотдачи с поверхности электрода  $k_T = 25$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), теплопроводность нержавеющей стали  $\lambda = 40$  Вт/(м·К), температура торца электрода  $\vartheta_{макс} = 15000^\circ\text{C}$  температура воздуха  $\vartheta_0 = 20^\circ\text{C}$ . При расчете потерями энергии за счет Джоулева тепла пренебречь.

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

5.25. Определить длину стального стержня, с поверхности которого рассеивается 80% теплового потока, если его поперечные размеры равны  $5 \times 4$  мм, а на торце поддерживается постоянная температура  $\vartheta_{\max} = 150^\circ\text{C}$ . Определить значение этого потока, если коэффициент теплоотдачи с поверхности стержня  $k_m = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , температура окружающего воздуха  $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$ . Теплопроводность стали  $\lambda = 40 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

5.26. Определить допустимое значение тока, который можно длительно пропускать через маслonaполненный реостат, сопротивление которого  $R = 1$  Ом при  $0^\circ\text{C}$ . Охлаждающая площадь поверхности элементов сопротивления  $F_1 = 2000 \text{ см}^2$ . Элементы сопротивления изготовлены из нихрома, коэффициент теплоотдачи от поверхности которых к маслу  $k_{m1} = 70 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , коэффициент теплоотдачи от масла к поверхности бака  $k_{m2} = 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Бак реостата изготовлен из чугуна, его наружная поверхность снабжена ребрами охлаждения в количестве  $n = 20$ . Каждое ребро охлаждения представляет собой прямоугольную пластину, площадь поперечного сечения которой  $100 \times 5$  мм, а длина вдоль распространения теплового потока  $l = 40$  мм. Площадь охлаждающей поверхности бака, исключая поверхность ребер,  $F_2 = 2000 \text{ см}^2$ . Толщина стенки бака  $\delta = 5$  мм, коэффициенты теплоотдачи с поверхности бака и ребер охлаждения  $k_{m3} = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . При расчете принять допустимую температуру масла  $\vartheta_{\text{дон}} = 90^\circ\text{C}$ , теплопроводность чугуна  $\lambda = 45 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ . Бак находится в воздухе, температура которого  $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$ .

5.27. Определить максимальную температуру двух медных цилиндрических стержней, образующих торцовый контакт. Переходное сопротивление контакта  $R_{\text{конт}} = 2 \cdot 10^{-5}$  Ом. Диаметры стержней одинаковы:  $d = 20$  мм, а длина их бесконечна. Начертить график распределения температур вдоль стержней, если коэффициент теплоотдачи с боковой поверхности стержней окружающему воздуху  $k_m = 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , температура окружающего воздуха  $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$ , ток, протекающий по стержням,  $I = 850$  А. Теплопроводность меди  $\lambda = 390 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , удельное сопротивление принять независимым от температуры и равным  $\rho = 2 \cdot 10^{-8}$  Ом·м.

5.28. Определить температуру поверхности алюминиевой шины в точке, находящейся в середине между двумя контактами, расположенными друг от друга на расстоянии  $l = 200$  мм (шина имеет прямоугольное сечение, размеры ее  $40 \times 5$  мм). Сопротивление каждого контакта  $R_{\text{конт}} = 6 \cdot 10^{-5}$  Ом. По шине протекает ток  $I = 550$  А. Шина находится в спокойном воздухе, температура которого  $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$ , коэффициент теплоотдачи с ее поверхности  $k_m = 12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Теплопроводность алюминия  $\lambda = 200 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , его удельное сопротивление принять равным  $\rho = 3 \cdot 10^{-8}$  Ом·м.

5.29. Алюминиевая шина прямоугольного сечения, размеры которой  $80 \times 6$  мм,

соединена встык с алюминиевой шиной, имеющей размеры поперечного сечения  $50 \times 6$  мм. Определить температуру стыка шин при установившемся режиме нагрева, а также температуру узкой шины на расстоянии  $l = 10$  см от места стыка, если по шине протекает постоянный ток  $I = 1200$  А. Шина находится в воздухе, температура которого  $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$ , коэффициент теплоотдачи с большей поверхности шины  $k_{m1} = 20$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), с меньшей поверхности  $k_{m2} = 25$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Теплопроводность алюминия  $\lambda = 200$  Вт/(м·К), удельное сопротивление принять равным  $\rho = 2,9 \cdot 10^{-8}$  Ом·м. При решении считать, что шина имеет неограниченные в обе стороны линейные размеры.

5.30. Бесконечно длинный медный круглый токопровод диаметром  $d = 30$  мм на длине  $l = 30$  мм имеет заточку до диаметра  $d_1 = 20$  мм. Токопровод находится в воде, температура которой  $\vartheta_0 = 20^\circ\text{C}$ . Коэффициенты теплоотдачи с тонкой части токопровода  $k_{m1} = 200$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), с толстой  $k_{m2} = 100$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), теплопроводность меди  $\lambda = 390$  Вт/(м·К), удельное электрическое сопротивление принять равным  $\rho = 2,1 \cdot 10^{-8}$  Ом·м. По токопроводу протекает переменный ток  $I = 4000$  А частоты  $f = 50$  Гц. Определить максимальную температуру узкой и широкой частей токопровода.

5.31. Медная шина круглого сечения диаметром  $d = 30$  мм бесконечной длины имеет утолщение, диаметр и длина которого соответственно равны  $d_1 = 40$  мм,  $l = 400$  мм. По шине протекает постоянный ток  $I = 1500$  А. Коэффициенты теплоотдачи с боковых поверхностей толстой части шины  $k_{m1} = 20$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), тонкой  $k_{m2} = 30$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Определить минимальную температуру в шине и температуру шины в месте стыка. Теплопроводность меди  $\lambda = 390$  Вт/(м·К), её удельное электрическое сопротивление принять равным  $\rho = 2,0 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, температура окружающей среды  $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$ .

5.32. Длинная стальная шина прямоугольного сечения размером  $30 \times 3$  мм расположена в спокойном воздухе, температура которого  $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$ . В средней части шина имеет утолщение длиной  $l = 50$  мм и поперечным сечением  $40 \times 6$  мм. Коэффициенты теплоотдачи с поверхности шины и утолщения равны  $k_{m2} = 10$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Определить температуру в середине утолщения и в месте изменения поперечного сечения, если по шине протекает постоянный ток  $I = 150$  А. Теплопроводность стали  $\lambda = 40$  Вт/(м·К), её удельное электрическое сопротивление  $\rho = 12 \cdot 10^{-8}$  Ом·м.

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

## **6 Тепловой расчет электрических аппаратов и их частей с учетом совместного действия теплопроводности, конвекции и излучения**

Приведенные задачи позволяют освоить тепловой расчёт электрических аппаратов и их частей с учетом совместного действия теплопроводности, конвекции и излучения, широко используя понятия теплового сопротивления и эквивалентных схем замещения. В общем случае нагрева и охлаждения электрических аппаратов распространение теплоты происходит совместно тремя видами теплопередачи.

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

6.2. Определить допустимую плотность тока для медной шины прямоугольного поперечного сечения с размерами  $100 \times 10$  мм, которая изолирована слоем лакоткани толщиной  $\delta = 2$  мм. Допустимая температура наружной поверхности изоляции  $\vartheta_{дон} = 65^\circ\text{C}$ , шина расположена в спокойном воздухе, температура которого  $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$ .

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

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

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

6.6. Определить температуру наружной поверхности короба, в который заключена алюминиевая шина с размерами поперечного сечения  $60 \times 6$  мм. Короб изготовлен из гетинакса толщиной  $\delta = 3$  мм. По шине протекает переменный ток  $I = 880$  А частоты  $f = 50$  Гц. Шина расположена горизонтально в спокойном воздухе, температура которого  $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$ . Степень черноты излучения с поверхности гетинакса  $\varepsilon = 0,7$ , поверхность шины покрыта масляной краской, зазор между шиной и коробом  $\Delta = 3$  мм.

6.7. Найти температуру круглой медной шины диаметром  $d = 38$  мм, которая проходит через достаточно длинную медную трубу, внутренний диаметр которой  $d_{вн} = 40$  мм, наружный  $d_{нар} = 45$  мм. По шине протекает постоянный ток  $I = 1500$  А. Шина расположена горизонтально и концентрично с трубой в спокойном воздухе, температура которого  $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности трубы в окружающий воздух  $k_m = 5,2$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

6.8. Определить допустимую плотность тока в круглой медной шине диаметром  $d = 38$  мм, расположенной горизонтально и концентрично в достаточно длинной медной трубе с внутренним диаметром  $d_{вн} = 40$  мм, наружным  $d_{нар} = 45$  мм. Труба имеет слой изоляции толщиной  $\delta = 20$  мм из бакелизированной бумаги и находится в спокойном воздухе, температура которого  $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$ . Допустимая температура для данной шины  $\vartheta_{дон} = 115^\circ\text{C}$ , степень черноты излучения для бакелита  $\varepsilon_1 = 0,9$ , для окисленной меди  $\varepsilon_2 = 0,6$ .

6.9. Определить допустимый ток для медной трубы с размерами  $d_{вн} = 12$  мм,  $d_{нар} = 15$  мм, по которой протекает вода со скоростью  $w = 0,5$  м/с. Температура воды на входе в трубу  $\vartheta_{вх} = 20^\circ\text{C}$ , на выходе  $\vartheta_{вых} = 30^\circ\text{C}$ . Труба расположена горизонтально в спокойном воздухе, ее поверхность окрашена масляной краской. В результате длительной эксплуатации внутренняя поверхность трубы покрылась слоем накипи, толщина которого  $\delta = 1$  мм, а теплопроводность  $\lambda = 0,8$  Вт/(м·К). Допустимая температура наружной поверхности трубы  $\vartheta_{дон} = 50^\circ\text{C}$ , температура окружающего воздуха  $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$ .

## 7 Расчет электродинамических усилий с использованием закона Био - Савара - Лапласа

Приведены задачи на вычисление электродинамических усилий на прямолинейные участки проводников как с учетом влияния размеров поперечного сечения, так, и без него.

В ряде случаев электродинамические усилия довольно легко можно вычислить, используя закон Био - Савара - Лапласа для определения значений и направления магнитной индукции.

7.1. Определить электродинамическое усилие, действующее на 10 м прямолинейного бесконечно тонкого уединенного проводника с током к.з.  $I = 50$  кА. Проводник находится в поле земли и расположен под углом  $\gamma = 30^\circ$  к плоскости магнитного меридиана. Горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля  $H = 12,7$  А/м, а угол наклона  $\beta = 72^\circ$ .

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

7.3. Определить значение электродинамического усилия, с которым притягиваются друг к другу два параллельных круглых, бесконечно длинных проводника, находящиеся друг от друга на расстоянии  $a = 1$  м, когда по ним кратко-

временно протекают токи  $i_1 = 10 \text{ кА}$ ,  $i_2 = 20 \text{ кА}$ . Диаметры проводников соответственно равны  $d_1 = 10 \text{ мм}$  и  $d_2 = 20 \text{ мм}$ . Расчет усилия провести на длине  $l = 1 \text{ м}$ .

7.4. Определить величину и направление усилия, действующего между двумя параллельными проводниками длиной  $l = 4 \text{ м}$ , по проводникам, находящимся в воздухе на расстоянии  $a = 3 \text{ м}$  друг от друга, протекают постоянные токи  $i_1 = 10 \text{ кА}$ ,  $i_2 = 15 \text{ кА}$ .

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

7.6. Определить величину электродинамического усилия, возникающего между двумя расположенными параллельно друг другу шинами прямоугольного сечения  $h \cdot b = 100 \times 10 \text{ мм}$  на длине  $l = 2 \text{ м}$ . Расстояние между осями шин  $a = 20 \text{ мм}$ , по ним протекает ток к.з.  $I = 54 \text{ кА}$ . Шины находятся в воздухе вдали от ферромагнитных частей, и ток по их сечению распределен равномерно. При решении задач учесть влияние поперечных размеров на величину электродинамического усилия. Шины расположены широкими сторонами друг к другу.

7.7. Определить электродинамическое усилие, возникающее между двумя шинами, расположенными параллельно друг другу узкими сторонами, если по ним протекает ток к.з.  $I = 60 \text{ кА}$ , расстояние между осями шин  $a = 110 \text{ мм}$ , размеры поперечного сечения шин  $100 \times 10 \text{ мм}$ . Шины находятся в воздухе вдали от ферромагнитных частей, и ток по их сечению распределен равномерно. Расчет усилия произвести для длины участка шин  $l = 3 \text{ м}$ , при этом учесть влияние поперечных размеров.

7.8. Определить электродинамическое усилие, действующее на  $1 \text{ м}$  круглого проводника диаметром  $d = 20 \text{ мм}$ . Проводник расположен на расстоянии  $a = 10 \text{ см}$  вдоль ферромагнитной стенки и по нему протекает ток  $I = 1000 \text{ А}$ .

7.9. Определить усилие, с которым проводник, проложенный вдоль ферромагнитной стенки на расстоянии  $20 \text{ см}$  от неё притягивается к ней, если длина проводника  $l = 0,5 \text{ м}$  и по нему течет ток  $I = 10 \text{ кА}$ .

## **8 Расчет электродинамических усилий по энергетическим формулам**

Приведенные задачи дают возможность освоить метод расчёта усилий по энергетическому принципу для наиболее часто встречающихся на практике случаев, т.е. для параллельных шин, полубесконечных петель, катушек, витков и других примеров, где индуктивность или взаимоиндуктивность контуров может быть выражена как функция координаты, в направлении которой вычисляется сила взаимодействия.

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

8.2. Определить усилие, стремящееся разорвать круговой виток радиусом  $R = 1 \text{ м}$ , если по нему протекает ток  $I = 40 \text{ кА}$ . Диаметр поперечного сечения витка

$d = 10 \text{ мм}$ .

8.3. Определить усилие, действующее между двумя круговыми витками, если по виткам протекают токи  $i_1 = 10 \text{ кА}$ ,  $i_2 = 15 \text{ кА}$ . Радиусы витков  $R_1 = 0,5 \text{ м}$ ,  $R_2 = 1 \text{ м}$  диаметры проводников, из которых изготовлены витки,  $d_1 = d_2 = 20 \text{ мм}$ . Расстояние между витками, находящимися в воздухе,  $h = 0,5 \text{ м}$ . Вычислить усилия, разрывающие витки, и давления, сжимающие проводники, а также определить направления усилий.

8.4. Вычислить электродинамическое усилие, с которым притягиваются друг к другу два круглых диаметром  $d = 5 \text{ мм}$  соседних витка цилиндрического реактора, имеющего средний радиус витков  $R = 0,5 \text{ м}$ , если по реактору протекает ток  $I = 35 \text{ кА}$ . Шаг витков реактора  $h = 10 \text{ мм}$ .

8.5. Вычислить электродинамическое усилие, с которым взаимодействуют два круговых витка радиусом  $R = 0,8 \text{ м}$ , лежащих в параллельных плоскостях на расстоянии  $20 \text{ мм}$  друг от друга и имеющих общую ось, если по одному из витков протекает ток  $I_1 = 10 \text{ кА}$ , а по другому  $I_2 = 30 \text{ кА}$ . Определить также величину коэффициента контура электродинамических усилий.

8.6. Определить усилие, разрывающее виток прямоугольного сечения, размер которого  $a \cdot b = 10 \times 20 \text{ мм}$ , средний радиус витка  $R = 1,0 \text{ м}$ . По витку протекает ток  $I = 20 \text{ кА}$ . Вычислить также давления, с которым сжимаются горизонтальные и вертикальные грани поперечного сечения.

8.7. Определить усилие, действующее на виток в направлении изменения его радиуса, если по витку протекает ток  $I = 15 \text{ кА}$ , виток имеет прямоугольное поперечное сечение с размерами  $a \cdot b = 5 \times 10 \text{ мм}$ , а его средний радиус  $R = 0,5 \text{ м}$ .

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

8.9. Определить усилие, с которым круглый проводник длиной  $l = 1 \text{ м}$  и с током  $I = 1500 \text{ А}$  притягивается к ферромагнитной стенке, если он находится от нее на удалении  $a = 20 \text{ см}$ . Ферромагнитная стенка имеет бесконечную магнитную проницаемость. Диаметр проводника  $2r = 10 \text{ мм}$ . Вычислить также усилие, сжимающее проводник.

8.10. Вычислить усилие, действующее на проводник с током, находящийся в прямоугольном пазу ферромагнитной стенки, если по проводнику протекает ток  $I = 2,0 \text{ кА}$ , магнитная проницаемость ферромагнитного материала  $\mu = \infty$ , длина паза  $l = 100 \text{ мм}$ , ширина  $\delta = 10 \text{ мм}$ .

8.11. Определить значение электродинамического усилия, которое возникает и стремится разомкнуть два круглых медных стержня диаметром  $d = 10 \text{ мм}$ . Торцы стержней обработаны под сферу радиуса  $r = 40 \text{ мм}$ , стержни стянуты силой  $F = 98 \text{ Н}$  и по ним протекает ток короткого замыкания  $I = 10 \text{ кА}$ .

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

8.13. Электрический контакт образован путем сжатия двух круглых медных стержней силой  $F = 400 \text{ Н}$ . Определить, с каким усилием эти стержни стремятся оттолкнуться друг от друга, если по ним протекает ток  $I = 10 \text{ кА}$ , диаметр

стержней, изготовленных из твердой меди,  $d = 20$  мм, торцовые поверхности имеют радиус закругления  $r = 10$  мм.

8.14. Шина прямоугольного сечения  $25 \times 3$  мм плавно переходит в шину размерами поперечного сечения  $10 \times 3$  мм. Определить усилие, стремящееся разорвать шину, если по ней протекает ток  $I = 100$  кА.

## **9 Расчет электродинамических усилий при переменном токе**

Приведены задачи на расчёт электродинамических усилий, когда по проводникам протекает переменный ток. Так как усилия, действующие на проводники при переменном токе, изменяются во времени, то возникает необходимость в определении и правильном выборе собственной частоты колебаний элементов электрических аппаратов, подвергающихся воздействию этих усилий. Необходимо правильно рассчитать значения максимальных усилий, которые зависят от вида и места к.з. в системе.

9.1. Определить характер изменения во времени и значение электродинамического усилия, действующего на ножи рубильника, по которым протекает однофазный ток к.з. Установившееся значение тока  $I_{уст} = 800$  А, частота  $f = 50$  Гц. Известно, что короткое замыкание произошло в удаленных от генератора точках сети. Размеры рубильника:  $l = 80$  мм,  $h = 70$  мм.

9.2. Написать зависимость электродинамического усилия от времени, возникающего между круглым проводником диаметром  $d = 10$  мм и ферромагнитной стенкой, вдоль которой проложен проводник с током, если по проводнику протекает ток к.з.  $I = 1500$  А частоты  $f = 50$  Гц. Проводник находится на расстоянии  $h = 20$  см от стенки, магнитную проницаемость стенки принять равной  $\mu = \infty$ . Рассчитать усилие на длину проводника  $l = 1$  м.

9.3. Определить значение максимального напряжения и частоту собственных колебаний отрезка проводника, имеющего длину  $0,5$  м и находящегося в прямоугольном пазу ферромагнитной стенки с бесконечной магнитной проницаемостью. По проводнику протекает переменный ток  $I = 3$  кА частоты  $f = 50$  Гц. Длина паза  $l = 70$  мм, ширина  $\delta = 20$  мм, диаметр проводника  $d = 10$  мм. Проводник изготовлен из меди, на концах имеет жесткое закрепление.

9.4. Определить усилия, действующие на каждый из ножей трехполосного разъединителя, по которому протекает предельный сквозной ток трехфазного к.з. Амплитудное значение тока  $I_{макс} = 320$  кА, длина ножей  $l = 610$  мм, расстояние между ними  $h = 700$  мм. Вычислить также требуемый момент сопротивления ножей.

9.5. Вычислить электродинамические усилия, воздействию которых подвергаются три ножа трехполосного разъединителя. Через ножи протекает ток трехфазного к.з. промышленной частоты  $f = 50$  Гц, максимальное значение которого  $I_{макс} = 80$  кА. Расстояние между полюсами разъединителя данного типа  $h = 450$  мм, длина ножей  $l = 635$  мм. При расчете пренебречь влиянием апериодической составляющей тока к.з.

9.6. На каком минимальном расстоянии можно поставить опорные изоляторы

в распределительном устройстве, если в нем применены прямоугольные медные шины сечением  $100 \times 10$  мм по одной шине на фазу. Шины закреплены жестко на опорах, поставлены на ребро и по ним протекает ток трехфазного к.з., установившееся значение которого  $I_{уст} = 50$  кА. Расстояние между фазами равно  $0,3$  м.

9.7. Определить максимальные напряжения, возникающие в наиболее нагруженном пакете шин распределительного устройства трехфазного генератора, если короткое замыкание произошло на выходе из распределительного устройства и действующее значение установившегося тока трехфазного к.з.  $I_{уст} = 140$  кА. Пакеты шин расположены в одной плоскости, расстояние между ними  $h = 700$  мм, расстояние между опорными изоляторами  $l = 600$  мм, пакеты шин состоят из 2-х жестко связанных медных шин с размерами поперечного сечения  $120 \times 10$  мм, расстояние между шинами пакета  $d = 10$  мм и через каждые  $10$  см между шинами имеются прокладки.

9.8. Вычислить максимальные напряжения в наиболее нагруженном пакете шин распределительного устройства трехфазного синхронного генератора для случая трехфазного к.з., действующее значение тока которого в установившемся режиме  $I_{уст} = 50$  кА. Пакеты шин расположены в одной плоскости, расстояние между ними  $h = 450$  мм, расстояние между опорными изоляторами  $l = 500$  мм; пакеты шин состоят из двух жестко связанных алюминиевых шин размером  $50 \times 5$  мм, расстояние между шинами в пакете  $5$  мм и через каждые  $20$  см между шинами пакета имеются прокладки.

## **10 Физические параметры дуговой плазмы**

Приведены задачи по некоторым исходным физическим параметрам и связи между ними. Решение таких задач дает возможность ознакомиться с некоторыми физическими закономерностями и числовыми значениями наиболее употребительных величин в теории газового разряда.

10.1. Определить среднюю длину пробега электрона в азоте при атмосферном давлении и температуре газа  $T = 5000$  К.

10.2. Определить среднюю длину свободного пробега электрона в атмосфере кислорода при давлении  $p = 2 \cdot 10^5$  Па и температуре  $T = 7000$  К.

10.3. Определить среднюю длину свободного пробега электрона в атмосфере водорода при давлении  $p = 3 \cdot 10^5$  Па, температуре  $T = 8000$  К.

10.4. Определить среднюю энергию электрона в азоте, приобретаемую им в электрическом поле напряженностью  $E = 50$  В/см при температуре газа  $T = 10000$  К и давлении газа  $p = 9,8 \cdot 10^4$  Па.

10.5. Определить среднюю энергию электрона в атмосфере азота, приобретенную им в электрическом поле напряженностью  $E = 100$  В/см при температуре газа  $T = 10000$  К и давлении  $p = 3 \cdot 10^5$  Па.

10.6. Определить среднюю энергию электрона в атмосфере водорода, приобретенную им в электрическом поле напряженностью  $E = 100$  В/см при температуре газа  $T = 18000$  К и давлении  $p = 5 \cdot 10^5$  Па.

10.7. Определить мощность, отводимую поперечным потоком воздуха, скорость которого  $v = 3 \text{ м/с}$ . Температура газа в дуговом столбе  $T = 5000 \text{ К}$ , температура окружающей среды  $T_0 = 300 \text{ К}$ . Ток в дуге  $I = 50 \text{ А}$ .

10.8. Оценить мощность, отводимую от дугового столба длиной в  $l \text{ см}$  путем излучения, если ток в дуге  $I = 5000 \text{ А}$ , напряженность поля  $E = 80 \text{ В/см}$ . Электроды выполнены из меди.

10.9. Определить мощность, отводимую от дугового столба длиной в  $l \text{ см}$  за счет теплопроводности. Температура  $T = 7000 \text{ К}$ .

10.10. Определить мощность, отводимую от дугового столба длиной в  $l \text{ см}$  путем конвекции газа (азота). Скорость движения дуги  $v = 25 \text{ м/с}$ , температура газа в дуговом столбе  $T = 8000 \text{ К}$ , температура окружающей среды  $T = 500 \text{ К}$ .

10.11. Оценить мощность, отводимую с  $l \text{ см}$  длины дуги путем конвекции, при условии, что температура столба дуги  $T = 3000 \text{ К}$ , температура окружающей среды  $T = 320 \text{ К}$ , диаметр дуги  $d = 1,5 \text{ см}$ , скорость проникновения (средняя) холодного потока газа в дуговой столб  $v = 50 \text{ м/с}$ .

10.12. Оценить и сравнить долю общей рассеиваемой дуговым столбом мощности по существующим эмпирическим формулам. Ток дуги  $I = 5000 \text{ А}$ , падение напряжения в столбе  $U = 200 \text{ В/см}$ .

10.13. Какая часть от общего числа частичек газа находится в ионизированном состоянии при условии, что энергия ионизации атома газа  $V_u = 15 \text{ эВ}$ , температура газа  $T = 12000 \text{ К}$ , давление  $p = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .

10.14. Определить начальную скорость спада плотности ионов в ионизированном газе за счет рекомбинации, а также плотность ионов спустя  $10 \text{ мкс}$  с начала процесса, если коэффициент рекомбинации  $\alpha = 10^{-9}$  и начальная плотность ионов в остаточном столбе  $n_0 = 10^{15}$ .

10.15. Построить для частного случая зависимость спада во времени плотности ионов в дуговом столбе за счет рекомбинации. Коэффициент рекомбинации газа  $\alpha = 2 \cdot 10^{-9}$ , начальная плотность ионов  $n_0 = 10^{15}$ .

## 11 Электрическая дуга в магнитном поле

Приведены задачи оценки некоторых характеристик дуги в магнитном поле. Рассматриваются также задачи на движение дуги в узких щелях дугогасительных камер. Между дуговым столбом и магнитным полем возникают силы взаимодействия, под влиянием которых дуговой столб приходит в движение. Явления сообщения дуговому столбу значительных скоростей широко используют в отключающих аппаратах с целью повышения интенсивности гашения дуги, а также для повышения срока службы аппаратов.

11.1. Определить скорость дуги между круглыми медными шинами диаметром  $d = 20 \text{ мм}$ , по которым протекает ток  $I_d = 1500 \text{ А}$ . Расстояние между шинами  $\delta = 10 \text{ мм}$ . Шины находятся в воздухе, магнитная проницаемость которого  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Гн/м}$ .

11.2. Определить скорость движения дуги в средней (между электродами) ее зоне между круглыми шинами, имеющими диаметр  $d = 10 \text{ мм}$ , при токе в ши-

нах  $I = 2000 \text{ A}$  и расстоянии между ними  $10 \text{ мм}$ .

11.3. Определить скорость движения открытой (свободной) дуги с током  $I_d = 400 \text{ A}$ , находящейся в поперечном магнитном поле с индукцией  $B = 0,05 \text{ Тл}$ .

11.4. Магнитная индукция равномерного магнитного поля  $B = 0,07 \text{ Тл}$ . Определить скорость перемещения дуги с током  $I = 500 \text{ A}$ , находящейся в этом магнитном поле.

11.5. Определить скорость перемещения свободной дуги с током  $600 \text{ A}$ , находящейся в магнитном поле, создаваемом тем же током дуги, если число витков катушки магнитного дутья  $N = 4$  и расстояние между полюсами (воздушный зазор)  $\delta = 20 \text{ мм}$ .

11.6. Определить скорость перемещения дуги в узкой щели дугогасительной камеры при условии, что поперечное магнитное поле в камере создается катушкой, имеющей  $N = 10$  витков и обтекаемой током дуги  $I_d = 400 \text{ A}$ . Ширина щели, в которую затягивается дуга,  $\delta = 2 \text{ мм}$ . Расстояние между полюсами катушки (воздушный зазор)  $\Delta = 2 \text{ см}$ .

11.7. Определить скорость перемещения дуги в узких щелях между изоляционными пластинами, если расстояние между ними  $\delta = 3 \text{ мм}$ , индукция в щелях  $B = 0,15 \text{ Тл}$  и ток в дуге  $I_d = 500 \text{ A}$ .

11.8. Определить скорость перемещения электрической дуги постоянного тока на концентрических кольцах, имеющих между собой зазор  $1 \text{ см}$ , при условии, что дуга вместе с кольцами находится в длинной однослойной катушке ( $N = 1000$  витков), а ток  $I = 50 \text{ A}$ .

11.9. Определить скорость перемещения дуги между концентрическими кольцами, помещенными в полость катушки постоянного тока. Катушка большой длины имеет  $1000$  витков на  $1 \text{ м}$  и ток в ее обмотке  $I = 100 \text{ A}$ . Зазор между кольцами  $10 \text{ мм}$ , ток в дуге  $I_d = 100 \text{ A}$ .

11.10. Определить направление и значение скорости перемещения электрической дуги, образующей круговое кольцо, под влиянием собственного поля при радиусе дугового кольца  $R = 30 \text{ см}$ , токе в дуге  $I_d = 500 \text{ A}$  и радиусе дугового столба  $r = 0,03\sqrt{I_d}$ .

11.11. Определить время, за которое дуга, имеющая вид кольца, переместится (растянется) из положения радиуса  $R_1 = 30 \text{ см}$  до положения  $R_2 = 70 \text{ см}$  при токе в дуге  $I_d = 1500 \text{ A}$  (радиус дугового столба выбирают из условия, приведенного в задаче 11.10).

11.12. Определить скорость, с которой дуговой столб будет удаляться от параллельного ему проводника, обтекаемого тем же током  $I = 2500 \text{ A}$ . Расстояние между дуговым столбом и проводом (между их осями) составляет  $15 \text{ см}$ .

## 12 Электрическая дуга постоянного тока

Рассмотрены задачи на определение времени погасания дуги постоянного тока, критических длин и токов дуги, а также энергии, поглощаемой дугой во время ее гашения. Дана оценка ожидаемых перенапряжений при срезе токов, роли шунтирующих сопротивлений, подсоединяемых к дуге постоянного тока, и индуктивности, находящейся в рассматриваемом контуре последовательно с

отключающим промежутком.

12.1. Определить энергию, поглощенную дугой постоянного тока при ее гашении, если сопротивление отключаемой цепи  $R = 1 \text{ Ом}$ , индуктивность цепи  $L = 100 \text{ мГн}$ , спад тока имеет прямолинейный характер, время угасания дуги  $t_d = 0,1 \text{ с}$ , напряжение цепи  $U = 200 \text{ В}$ .

12.2. Определить энергию, поглощенную дугой постоянного тока при ее гашении, если напряжение  $U = 200 \text{ В}$ , 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.

12.3. Общее количество энергии, поглощенной дугой за один цикл отключения,  $A = 3000 \text{ Дж}$ . Оценить, какое количество энергии потребуется из сети непосредственно за время одного отключения; если отключаемый ток (начальный)  $I = 200 \text{ А}$ , индуктивность цепи  $L = 80 \text{ мГн}$ .

12.4. Определить время угасания дуги постоянного тока для двух случаев индуктивности цепи  $L = 10 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$  и  $L = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$  при условии, что  $\Delta U = 30 \text{ В}$  остается величиной постоянной. Напряжение источника  $U_u = 400 \text{ В}$ , сопротивление цепи  $R = 2 \text{ Ом}$ .

12.5. Определить графоаналитическим методом время угасания дуги, если в цепи сопротивление  $R = 3 \text{ Ом}$ , индуктивность  $L = 120 \text{ мГн}$ , напряжение источника  $U_u = 400 \text{ В}$ , а вольтамперная характеристика описывается уравнением  $U_d = c i^{-a} l$ , где  $l = 1,2 \cdot I_{кр}$ ;  $c = 80$ ;  $i = 0,5$ ,  $I_{кр}$  - критическая длина дуги.

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

12.7. Установить необходимое число промежутков в решетке, если дуга постоянного тока должна гаситься путем деления ее на ряд коротких дуг. Напряжение цепи  $U_u = 400 \text{ В}$ , а напряжение на дуге  $U_d = 500 \text{ В}$  остается постоянным.

12.8. Определить возможное перенапряжение  $U_{\text{макс}}$  в цепи постоянного тока, если происходит ее размыкание без дуги, при условии, что к зажимам индуктивности подключена емкость  $C = 0,1 \text{ мкФ}$ . Индуктивность в цепи  $L = 1,5 \text{ Гн}$ , ток  $I = 20 \text{ А}$ .

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

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

12.11. Определить значение емкости, которая должна быть подключена параллельно индуктивности  $L = 1 \text{ Гн}$ , с тем чтобы при внезапном обрыве цепи (без дуги) перенапряжение на индуктивности не превышало  $10 \text{ кВ}$ . Ток цепи, текущий через индуктивность,  $I = 15 \text{ А}$ .

### 13 Электрическая дуга в коротком промежутке

Рассмотрены задачи гашения дуги постоянного и переменного тока малой длины (порядка единиц миллиметра), а также задач, в которых определяются необходимое число пластин в деионной решётке и пробивное напряжение единичного промежутка с учетом и без учета восстановления прочности промежутка в зависимости от времени.

13.1. Определить число стальных пластин решетки аппарата постоянного тока для гашения дуги, возникающей на его контактах, при напряжении  $U = 440 \text{ В}$ .

13.2. Определить число медных пластин решетки дугогасительного аппарата переменного тока, если восстановление напряжения на промежутке происходит с очень высокой скоростью. При этих условиях следует принять пробивное напряжение для единичного промежутка  $U_{\text{пр1}} = 200 \text{ В}$ . Рабочее напряжение цепи  $600 \text{ В}$  (действующее).

13.3. Сколько следует взять стальных пластин решетки для гашения дуги в цепи переменного тока с напряжением  $U = 600 \text{ В}$  с током отключения  $I = 100 \text{ А}$ ?

13.4. Сколько пластин следует взять для медной решетки, если номинальное напряжение сети переменного тока  $U = 600 \text{ В}$ , отключаемый ток  $I = 200 \text{ А}$ ? Дуга на пластинах перемещается магнитным полем.

13.5. Определить число стальных пластин в решетке, учитывая, что прочность должна быстро нарастать во времени и через  $100 \text{ мкс}$  должна увеличиться в 2 раза по сравнению с начальной величиной. Действующее значение напряжения  $U = 600 \text{ В}$ . Напряжение восстанавливается с частотой  $f_0 = 5000 \text{ Гц}$ . Коэффициент превышения амплитуды  $k = 1,4$ . Начальное расчетное пробивное напряжение единичного промежутка  $U_{\text{пр1}} = 120 \text{ В}$ .

13.6. Определить число стальных пластин дугогасительной камеры, если начальная прочность единичного промежутка  $U_{\text{пр1}} = 120 \text{ В}$ , частота восстановления напряжения  $f_0 = 1000 \text{ Гц}$ , коэффициент превышения амплитуды восстанавливающегося напряжения  $k = 1,6$ . Рабочее возвращающееся напряжение на разрыв  $U_{\text{в}} = 600 \text{ В}$ . Известно также, что за  $50 \text{ мкс}$  прочность промежутка достигает двойной величины по сравнению с начальной.

13.7. Определить число пластин в камере автомата гашения поля генератора, если во время гашения поля она замкнута на дуговой промежуток с медными пластинами. Индуктивность обмотки возбуждения генератора  $f = 0,5 \text{ Гн}$ , начальный ток возбуждения  $I = 1000 \text{ А}$ , а наибольшее напряжение на обмотке генератора  $U_{\text{макс}} = 600 \text{ В}$ .

13.8. Определить пробивное напряжение дугового короткого промежутка, если напряженность электрического поля автоэлектронной эмиссии  $U_{\text{макс}} = 5 \cdot 10^5 \text{ В/см}$ , температура газа  $T = 5000 \text{ К}$ , энергия ионизации частиц  $V_u = 10 \text{ эВ}$ , давление газовой среды  $p = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .

13.9. Определить электрическую прочность короткого промежутка, если напряженность электрического поля автоэлектронной эмиссии  $U_{\text{макс}} = 5,5 \cdot 10^5 \text{ В/см}$ ; температура газа  $T = 6000 \text{ К}$ , энергия ионизации частиц  $V_u = 11,5 \text{ эВ}$ , давление газовой среды  $p = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .

13.10. Определить начальную прочность короткого промежутка, если плотность носителей зарядов в дуговом промежутке непосредственно после перехода тока через нуль  $n_0 = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , напряженность поля выхода электронов  $E_{\text{вых}} = 2 \cdot 10^6 \text{ В/см}$ .

13.11. Определить пробивное напряжение короткого промежутка сразу после перехода тока через его нулевое значение и спустя 10 и 50 мкс. Напряженность поля выхода  $E_{\text{вых}} = 3 \cdot 10^5 \text{ В/см}$ , начальная плотность ионов  $n_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

13.12. Определить изменение плотности ионов в коротком промежутке во времени, если начальная плотность  $n_0 = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и коэффициент рекомбинации  $\alpha = 0,5 \cdot 10^{-9}$ .

13.13. Определить пробивное напряжение  $U_{\text{пр}}$  короткого промежутка через 15 мкс, если плотность ионов  $n_0 = 1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ; коэффициент рекомбинации  $\alpha = 10^{-9}$ ; напряженность поля выхода  $E_{\text{вых}} = 3,5 \cdot 10^5 \text{ В/см}$ .

## 14 Сваривание электрических контактов

Рассмотрены задачи на сваривание контактов электрических аппаратов. Сваривание контактов - весьма сложное явление, сочетающее тепловые и динамические процессы.

14.1. Два стержня диаметром  $d = 20 \text{ мм}$  сжаты силой  $P = 390 \text{ Н}$ . Торцы обработаны таким образом, что образуют сферические поверхности радиуса  $r = 10 \text{ мм}$ . Определить, какой постоянный ток в течение времени  $t = 0,2 \text{ с}$  эти контакты могут выдержать без сваривания.

14.2. Определить сваривающий ток медных контактов, образуемых параллельными стержнями и перемычкой (траверсой). Контакты торцовые, диаметр стержня  $d = 20 \text{ мм}$ . Расстояние между осями стержней  $a = 400 \text{ мм}$ . Механическая сила, сжимающая контакты (каждую пару),  $P = 200 \text{ Н}$ , контакты односторонние.

14.3. Определить минимальный сваривающий ток розеточного контакта из меди, если сила нажатия на одну ламель составляет  $50 \text{ Н}$ , всего ламелей 6 шт.

14.4. Определить минимальный ток сваривания медных контактов, сжимаемых с силой  $P = 150 \text{ Н}$ , если ток при к.з. имеет сильное затухание симметричной составляющей (т.е. возможно сваривание только на первом максимальном пике).

14.5. Определить минимальный сваривающий ток для сильно затухающего симметричного тока в пальцевых медных контактах, сжимаемых силой  $P = 100 \text{ Н}$ , для несоустанавливающихся и самоустанавливающихся пальцев и сравнить полученные результаты.

14.6. Определить допустимую величину амплитуды тока к.з. для розеточного контакта выключателя, если величина контактного нажатия, которое осуществляется каждой ламелью розетки,  $P = 100 \text{ Н}$ , число ламелей в контакте  $n = 6$ .

14.7. Определить требуемую с точки зрения сваривания величину контактного нажатия медного щеточного контакта пускового реостата, если максимальное значение амплитуды ударного тока к.з.  $i_{\text{уд}} = 10 \text{ кА}$ .

14.8. Определить минимальный ток сваривания самоустанавливающегося

пальцевого медного контакта, прижимаемого пружиной с силой  $100 \text{ Н}$ . Допускаем, что составляющая симметричного тока имеет сильно затухающий характер. Сваривание в этом случае возможно только на первой наибольшей полуволне тока.

14.9. Определить силу, с которой должны сжиматься между собой медные контакты, если амплитуда наибольшего тока в цепи может достигнуть  $I_{\text{макс}} = 30 \text{ кА}$ . Результаты сравнить, когда контакты снабжены медно-вольфрамовыми накладками.

14.10. Определить минимальный сваривающий ток к.з. одноточечного латунного контакта разъединителя, сжимаемого с силой  $P = 150 \text{ Н}$ , если подводящие шины дополнительно сжимают контакты с максимальной электродинамической силой, развиваемой током. Размеры шин  $5 \times 30 \text{ мм}$ , расстояние между шинами  $a = 10 \text{ мм}$ , а их длина  $l = 0,5 \text{ м}$ .

## ПРИЛОЖЕНИЯ

**Таблица 2** - Технические характеристики медных **Сu** шин прямоугольного ( $b \times h$ ) сечения, коэффициент геометрии  $k_2$  и допустимые токовые нагрузки  $I_n$  на них при температуре  $100^\circ\text{C}$ , окружающая среда  $+40^\circ\text{C}$  (шина окрашена в чёрный цвет и поставлена на ребро)

| Размер шины $b \times h$ , мм | $k_2$ | Токовая нагрузка $I_n$ , А | Размер шины $b \times h$ , мм | $k_2$ | Токовая нагрузка $I_n$ , А | Размер шины $b \times h$ , мм | $k_2$ | Токовая нагрузка $I_n$ , А |
|-------------------------------|-------|----------------------------|-------------------------------|-------|----------------------------|-------------------------------|-------|----------------------------|
| 1×10                          | 10    | 62                         | 1×12,5                        | 12,5  | 121                        | 1×16                          | 16    | 153                        |
| 1,5×10                        | 6,7   | 122                        | 1,5×12,5                      | 8,3   | 150                        | 1,5×16                        | 10,7  | 188                        |
| 2×10                          | 5     | 144                        | 2×12,5                        | 6,25  | 175                        | 2×16                          | 8     | 223                        |
| 2,5×10                        | 4     | 166                        | 2,5×12,5                      | 5     | 200                        | 2,5×16                        | 6,4   | 254                        |
| 3×10                          | 3,3   | 184                        | 3×12,5                        | 4,2   | 223                        | 3×16                          | 5,3   | 280                        |
| 4×10                          | 2,5   | 220                        | 4×12,5                        | 3,13  | 271                        | 4×16                          | 4     | 330                        |
| 5×10                          | 2     | 254                        | 5×12,5                        | 2,5   | 306                        | 5×16                          | 3,2   | 380                        |
| -                             | -     | -                          | -                             | -     | -                          | 6×16                          | 2,7   | 425                        |
| -                             | -     | -                          | -                             | -     | -                          | 8×16                          | 2     | 515                        |

**Таблица 3** - Технические характеристики медных **Сu** шин прямоугольного ( $b \times h$ ) сечения, коэффициент геометрии  $k_2$  и допустимые токовые нагрузки  $I_n$  на них. В числителе приведена токовая нагрузка при переменном токе, в знаменателе - при постоянном токе.

| Размер шины, мм | Коэффициент $k_2$ | Токовая нагрузка при числе полос на фазу, А |             |             |             |
|-----------------|-------------------|---|-------------|-------------|-------------|
|                 |                   | 1   | 2           | 3           | 4           |
| 3×15            | 5                 | 210   | -           | -           | -           |
| 3×20            | 6,7               | 275   | -           | -           | -           |
| 3×25            | 8,3               | 340   | -           | -           | -           |
| 4×30            | 7,5               | 475   | -           | -           | -           |
| 4×40            | 10                | 625   | - /1090     | -           | -           |
| 5×40            | 8                 | 700 / 705                                   | - /1250     | -           | -           |
| 5×50            | 10                | 860 / 870                                   | - /1525     | - /1895     | -           |
| 6×50            | 8,3               | 955 / 960                                   | - /1700     | - /2145     | -           |
| 6×60            | 10                | 1125 / 1145                                 | 1740 / 1990 | 2240 / 2495 | -           |
| 6×80            | 13,3              | 1480 / 1510                                 | 2110 / 2630 | 2730 / 3220 | -           |
| 6×100           | 16,7              | 1810 / 1875                                 | 2470 / 3245 | 3170 / 3940 | -           |
| 8×60            | 7,5               | 1320 / 1345                                 | 2160 / 2485 | 2760 / 3020 | -           |
| 8×80            | 10                | 1690 / 1755                                 | 2620 / 3095 | 3370 / 3850 | -           |
| 8×100           | 12,5              | 2080 / 2180                                 | 3060 / 3810 | 3930 / 4690 | -           |
| 8×120           | 15                | 2400 / 2600                                 | 3400 / 4400 | 4340 / 5600 | -           |
| 10×60           | 6                 | 1475 / 1525                                 | 2560 / 2725 | 3390 / 3530 | -           |
| 10×80           | 8                 | 1900 / 1990                                 | 3100 / 3510 | 3900 / 4450 | -           |
| 10×100          | 10                | 2310 / 2470                                 | 3610 / 4325 | 4650 / 5385 | 5300 / 6060 |
| 10×120          | 12                | 2650 / 2950                                 | 4100 / 5000 | 5200 / 6250 | 5900 / 6800 |

**Таблица 4** - Технические характеристики алюминиевых *Al* шин прямоугольного (*b*×*h*) сечения, коэффициент геометрии *k<sub>2</sub>* и допустимые токовые нагрузки *I<sub>n</sub>* на них. В числителе приведена токовая нагрузка при переменном токе, в знаменателе - при постоянном токе.

| Размер ши-<br>ны, мм | Коэффициент <i>k</i><br><i>г</i> | Токовая нагрузка при числе полос на фазу, А |             |             |             |
|----------------------|----------------------------------|---|-------------|-------------|-------------|
|                      |                                  | 1   | 2           | 3           | 4           |
| 3×15                 | 5                                | 165   | -           | -           | -           |
| 3×20                 | 6,7                              | 215   | -           | -           | -           |
| 3×25                 | 8,3                              | 265   | -           | -           | -           |
| 4×30                 | 7,5                              | 365 / 370                                   | -           | -           | -           |
| 4×40                 | 10                               | 480   | - / 855     | -           | -           |
| 5×40                 | 8                                | 540 / 545                                   | - / 965     | -           | -           |
| 5×50                 | 10                               | 665 / 670                                   | - / 1180    | - / 1470    | -           |
| 6×50                 | 8,3                              | 740 / 745                                   | - / 1315    | - / 1655    | -           |
| 6×60                 | 10                               | 870 / 880                                   | 1350 / 1555 | 1720 / 1940 | -           |
| 6×80                 | 13,3                             | 1150 / 1170                                 | 1650 / 2055 | 2100 / 2460 | -           |
| 6×100                | 16,7                             | 1425 / 1455                                 | 1935 / 2515 | 2500 / 3040 | -           |
| 8×60                 | 7,5                              | 1025 / 1040                                 | 1680 / 1840 | 2180 / 2330 | -           |
| 8×80                 | 10                               | 1320 / 1355                                 | 2040 / 2400 | 2620 / 2975 | -           |
| 8×100                | 12,5                             | 1525 / 1690                                 | 2390 / 2945 | 3050 / 3620 | -           |
| 8×120                | 15                               | 1900 / 2040                                 | 2650 / 3350 | 3380 / 4250 | -           |
| 10×60                | 6                                | 1155 / 1180                                 | 2010 / 2110 | 2650 / 2720 | -           |
| 10×80                | 8                                | 1480 / 1540                                 | 2410 / 2735 | 3100 / 3440 | -           |
| 10×100               | 10                               | 1820 / 1910                                 | 2860 / 3350 | 3650 / 4160 | 4150 / 4400 |
| 10×120               | 12                               | 2070 / 2300                                 | 3200 / 3900 | 4100 / 4860 | 4650 / 5200 |

**Таблица 5** - Технические характеристики стальных шин прямоугольного (*b*×*h*) сечения, коэффициент геометрии *k<sub>2</sub>* и допустимые токовые нагрузки *I<sub>n</sub>* на них. В числителе приведена токовая нагрузка при переменном токе, в знаменателе - при постоянном токе.

| Размер<br>шины<br><i>b</i> × <i>h</i> , мм | Коэффициент<br><i>k<sub>2</sub></i> | Токовая<br>нагрузка<br><i>I<sub>n</sub></i> , А | Размер<br>шины<br><i>b</i> × <i>a</i> , мм | Коэффициент<br><i>k<sub>2</sub></i> | Токовая<br>нагрузка<br><i>I<sub>n</sub></i> , А |
|--|-------------------------------------|---|--|-------------------------------------|---|
| 2,5×16                                     | 6,4                                 | 55 / 70   | 100 × 3                                    | 33,3                                | 305 / 460                                       |
| 2,5×20                                     | 8                                   | 60 / 90   | 20 × 4                                     | 5                                   | 70 / 115  |
| 2,5×25                                     | 10                                  | 75 / 110  | 22 × 4                                     | 5,5                                 | 75 / 125  |
| 3×20                                       | 6,7                                 | 65 / 100  | 25 × 4                                     | 6,25                                | 85 / 140  |
| 3×25                                       | 8,3                                 | 80 / 120  | 30 × 4                                     | 7,5                                 | 100 / 165                                       |
| 3×30                                       | 10                                  | 95 / 140  | 40 × 4                                     | 10                                  | 130 / 220                                       |
| 3×40                                       | 13,3                                | 125 / 190                                       | 50 × 4                                     | 12,5                                | 165 / 270                                       |
| 3×50                                       | 16,7                                | 155 / 230                                       | 60 × 4                                     | 15                                  | 195 / 325                                       |
| 3×60                                       | 20                                  | 185 / 280                                       | 70 × 4                                     | 17,5                                | 225 / 375                                       |
| 3×70                                       | 23,3                                | 215 / 320                                       | 80 × 4                                     | 20                                  | 260 / 430                                       |
| 3×75                                       | 25                                  | 230 / 345                                       | 90 × 4                                     | 22,5                                | 290 / 480                                       |
| 3×80                                       | 26,7                                | 245 / 365                                       | 100 × 4                                    | 25                                  | 325 / 535                                       |
| 3×90                                       | 30                                  | 275 / 410                                       | -  | -                                   | -   |

**Таблица 6** - Основные свойства наиболее распространённых контактных материалов

| Материал                     | Плотность<br>$\gamma \cdot 10^3$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | Удельное со-<br>противление<br>$\rho \cdot 10^{-8}$ , Ом·м | ТКС<br>$\alpha \cdot 10^3$<br>1/°C | Теплопровод-<br>ность $\lambda$ ,<br>Вт/(м·°C) | Теплоёмкость<br>С, Дж/(кг·°C) |
|------------------------------|---|--|------------------------------------|--|-------------------------------|
| <b>Al</b> твёрдотяну-<br>тый | 2,7   | 2,62   | 4,2                                | 210  | 950                           |
| Бронза                       | 8,2÷8,8   | 5,3÷16   | 4,0                                | 64÷84  | 360                           |
| Вольфрам                     | 19,3  | 5,1  | 4,2                                | 170  | 140                           |
| Графит                       | 1,7÷1,8   | 700÷1400   | - 1,3                              | 160  | 650÷850                       |
| Дюралюминий                  | 2,75  | 3,3  | 2,2                                | 160  | 930                           |
| Железо                       | 7,9   | 9÷10   | 5,5                                | 79,5   | 640                           |
| Кадмий                       | 8,64  | 7,0  | 4,3                                | 92   | 230                           |
| Латунь                       | 8,5÷8,9   | 7,0÷7,2  | 1,5                                | 100  | 340                           |
| <b>Si</b> твёрдотяну-<br>тая | 8,7÷8,9   | 1,62   | 4,3                                | 390  | 390                           |
| Молибден                     | 10,2  | 4,5÷5,0  | 4,3                                | 146  | 270                           |
| Никель                       | 8,8   | 7,2  | 6,1                                | 70   | 460                           |
| Олово                        | 7,3   | 11,4   | 4,5                                | 64   | 230                           |
| Свинец                       | 11,3  | 19,5   | 4,1                                | 35   | 130                           |
| <b>Ag</b> твёрдотяну-<br>тое | 10,5  | 1,5  | 4,4                                | 420  | 234                           |
| Сталь                        | 7,8   | 10÷13  | 6,2                                | 40   | 470                           |
| Хром                         | 7,1   | 14,0   | 5,2                                | 94   | 430                           |
| Цинк                         | 7,1   | 5,8  | 4,2                                | 113  | 390                           |
| Золото                       | 19,3  | 2,2  | 4,0                                | 320  | 130                           |
| КМК-А10                      | 9,7   | 3,0  | -                                  | 325  | -                             |
| КМК-А20                      | 9,5   | 2,5  | -                                  | 350  | -                             |

**Таблица 7** - Коэффициенты теплоотдачи  $k_m$  при естественном свободном движении воздуха

| Наименование нагретых деталей и узлов.<br>Характеристика их поверхности и условия охлаждения  | $k_m$ ,<br>Вт/(м <sup>2</sup> ·°C) |
|---|------------------------------------|
| Стержни круглые медные горизонтальные, диаметр 10÷60 мм   | 13÷9                               |
| Шины плоские медные и алюминиевые:<br>горизонтальные, поставленные на ребро<br>горизонтальные, расположенные плашмя<br>вертикальные   | 6÷9<br>5÷8<br>4÷7                  |
| Шины коробчатые, расположенные горизонтально:<br>медные (наружная поверхность охлаждения)<br>медные (полная поверхность охлаждения)<br>алюминиевые (полная поверхность охлаждения)<br>алюминиевые (наружная поверхность охлаждение) | 10÷12,5<br>6÷8<br>5,6÷8<br>9÷12    |
| Изоляторы фарфоровые горизонтальные   | 18                                 |
| Пакеты штампованных пластин - магнитопроводы  | 10÷12,5                            |

|   |  |
|---|--|
| Катушки многовитковые:<br>слаботочных реле, диаметр 3÷14 мм<br>аппаратов управления и распределения энергии   | 60÷8<br>9÷14                                   |
| Катушки шинные дугогасительные в камерах  | 12÷20  |
| Элементы резисторов (сопротивлений) и реостатов:<br>трубчатые эмалированные<br>трубчатые проволочные, без покрытия<br>плоские на каркасе, проволочные, ленточные<br>( $k_m$ отнесён к поверхности проволоки, ленты)<br>цилиндрические фехралевые, намотанные на ребро, горизонтальные<br>( $k_m$ отнесён к поверхности элемента) ...<br>чугунные, вертикальные ( $k_m$ отнесён к пов. элемента) | 20÷25<br>23<br><br>10÷20<br><br>42÷43<br>10÷15 |
| Оболочки и детали с гладкой поверхностью, покрытой лаком или краской  | 10÷14  |
| Элементы электрических предохранителей серии ПР-2<br>плавкие вставки медные   | 10÷12  |

**Таблица 8** - Допустимые плотности тока  $j_{кз}$  (А/мм<sup>2</sup>) для типичных проводниковых материалов в зависимости от расчётного времени короткого замыкания

| Расчётное время короткого замыкания | 1 секунда | 5 секунд | 10 секунд |
|-------------------------------------|-----------|----------|-----------|
| Материал проводника                 |           |          |           |
| Медь                                | 152       | 68       | 48        |
| Алюминий                            | 89        | 40       | 28        |
| Латунь                              | 73        | 33       | 23        |

**Таблица 9** - Особо гибкие провода, применяемые для гибких соединений - «косичек»

| Сечение провода, мм <sup>2</sup> | Круглый провод ПЩ     |                     | Плоский провод, плетённый из провода ПЩ |                             | Допустимый длительный ток, А |
|----------------------------------|-----------------------|---------------------|---|-----------------------------|------------------------------|
|                                  | Диаметр проволоки, мм | Диаметр провода, мм | Диаметр проволоки, мм                   | Размер плоского провода, мм |                              |
| 1                                | 0,08                  | 1,7                 | -                                       | -                           | 13                           |
| 1,5                              | 0,08                  | 2,1                 | -                                       | -                           | 17                           |
| 2,5                              | 0,10                  | 2,6                 | -                                       | -                           | 24                           |
| 4                                | 0,13                  | 3,3                 | -                                       | -                           | 30                           |
| 6                                | 0,13                  | 4,2                 | 0,08                                    | 12 × 1,7                    | 38                           |
| 10                               | 0,13                  | 5,5                 | 0,08                                    | 20 × 1,7                    | 50                           |
| 16                               | -                     |                     | 0,08                                    | 25 × 1,7                    | 75                           |
| 25                               | -                     |                     | 0,08                                    | 25 × 4,6                    | 105                          |
| 35                               | -                     |                     | 0,08                                    | 30 × 4,6                    | 120                          |

**Таблица 10** - Рекомендуемые значения плотности тока  $j$  в не размыкаемых болтовых контактных соединениях

|                                      | Медь | Латунь, бронза | Алюминий | Сталь |
|--------------------------------------|------|----------------|----------|-------|
|                                      | А/мм |                |          |       |
| Плотность тока в ЭА до 200А          | 0,31 | 0,124÷0,21     | 0,238    | 0,044 |
| Плотность тока в ЭА от 200А до 600А  | 0,27 | 0,108÷0,18     | 0,208    | 0,039 |
| Плотность тока в ЭА от 600А до 1000А | 0,23 | 0,092÷0,15     | 0,177    | 0,033 |

**Таблица 11** - Рекомендуемые удельные давления  $f_K$  в неразъёмных болтовых контактных соединениях

| Материал шины                   | Па, Н/м <sup>2</sup>    | Н/мм <sup>2</sup> | кгс/мм <sup>2</sup> |
|---------------------------------|-------------------------|-------------------|---------------------|
| Медь лужёная                    | (5÷10)·10 <sup>6</sup>  | 5÷10              | 0,5÷1,0             |
| Медь, латунь, бронза не лужёные | (6÷12)·10 <sup>6</sup>  | 6÷12              | 0,6÷1,2             |
| Алюминий                        | (22÷25)·10 <sup>6</sup> | 22÷25             | 2,2÷2,5             |
| Сталь лужёная                   | (10÷15)·10 <sup>6</sup> | 10÷15             | 1,0÷1,5             |
| Сталь не лужёная                | (60÷65)·10 <sup>6</sup> | 60÷65             | 6,0÷6,5             |

**Таблица 12** - Расчётные данные болтов, изготовленных из стали марки Ст.3, для не размыкаемых контактных соединений

| Диаметр болта $d$ , мм | Диаметр отверстия $d^*$ , мм | Диаметр контактного пятна, $D_{кп}$ , мм | Площадь контактного пятна, $S_{кп}$ , мм <sup>2</sup> | Сила затяжки одного болта, $F_b^I$ , кН | Ширина подвижного контакта $b_{ПК}^Ф$ , мм | Величина номинального тока на один болт $I_n^B$ , А |
|------------------------|------------------------------|--|---|---|--|---|
| М 4                    | 4,2                          | 9  | 50  | 1,0 - 1,3                               | 8 - 1                                      | 10 - 20   |
| М 5                    | 5,5                          | 11                                       | 70  | 1,4 - 1,8                               | 10 - 13                                    | 20 - 40   |
| М 6                    | 7                            | 14                                       | 115   | 2,3 - 2,9                               | 12 - 18                                    | 40 - 100  |
| М 8                    | 9                            | 18                                       | 190   | 4,2 - 5,4                               | 16 - 24                                    | 100 - 160   |
| М 10                   | 11,5                         | 22                                       | 275   | 7,0 - 8,6                               | 20 - 30                                    | 160 - 250   |
| М 12                   | 14                           | 28                                       | 460   | 10 - 13                                 | 25 - 40                                    | 250 - 400   |
| М 16                   | 19                           | 34                                       | 625   | 20 - 24                                 | 35 - 50                                    | 400 - 630   |
| М 20                   | 24                           | 46                                       | 1210  | 30 - 36                                 | 45 - 60                                    | 630 - 1000  |

При применении болтов, изготовленных из стали марки Ст.4 или Ст.5, сила затяжки одного болта  $F_b$  может быть увеличена в 1,15 или 1,30 раза соответственно.

**Таблица 13** - Значения  $k_{нх}$  для материалов контактных соединений

| Соединяемые материалы             | $k_{нх}$                         |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| Серебро - серебро                 | $0,06 \cdot 10^{-3}$             |
| Медь - медь (плоскостной контакт) | $(0,09 \div 0,14) \cdot 10^{-3}$ |
| Медь - медь (точечный контакт)    | $(0,14 \div 0,18) \cdot 10^{-3}$ |
| Медь - медь (лужёные поверхности) | $(0,07 \div 0,10) \cdot 10^{-3}$ |
| Медь - латунь                     | $0,38 \cdot 10^{-3}$             |

|                                  |                                  |
|----------------------------------|----------------------------------|
| Латунь - латунь                  | $0,67 \cdot 10^{-3}$             |
| Латунь - сталь                   | $3,04 \cdot 10^{-3}$             |
| Медь - сталь                     | $3,10 \cdot 10^{-3}$             |
| Металлокерамика (КМК - А10, А20) | $(0,20 \div 0,30) \cdot 10^{-3}$ |
| Олово - олово                    | $0,38 \cdot 10^{-3}$             |
| Алюминий - медь                  | $0,98 \cdot 10^{-3}$             |
| Алюминий - алюминий              | $1,60 \cdot 10^{-3}$             |
| Алюминий - латунь                | $1,90 \cdot 10^{-3}$             |
| Сталь - латунь                   | $3,04 \cdot 10^{-3}$             |
| Сталь - алюминий                 | $4,40 \cdot 10^{-3}$             |
| Сталь - сталь                    | $7,60 \cdot 10^{-3}$             |

**Таблица 14** - Значения коэффициента формы  $m$  контактной поверхности

|                            |           |
|----------------------------|-----------|
| Вид контактного соединения | $m$       |
| Точечный контакт           | 0,5       |
| Линейный контакт           | 0,5 - 0,7 |
| Плоскостной контакт        | 0,7 - 1,0 |

**Таблица 15** - Примерные значения технических параметров подвижных контактов

| $I_n$ или $I_{эkv}$ , А | $b_{нк}$ , мм | $J_L = I_n / b_{нк}$ , А/мм |
|-------------------------|---------------|-----------------------------|
| 63                      | 14            | 4,5                         |
| 160                     | 18            | 8,9                         |
| 300                     | 25            | 12                          |

**Таблица 16** - Размеры облицовочных пластин (накладок) из металлокерамики или серебра

| Ширина $b^*$ , мм  | Высота $h^*$ , мм           | Толщина $c^*$ , мм          |
|--|-----------------------------|-----------------------------|
| 3; 4; 5  | 4; 5                        | 0,8; 1,0; 1,6               |
| 3; 4; 6; 8; 10   | 6; 8; 10                    | 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 2,2     |
| 6; 8; 10; 12; 14   | 12; 14                      | 1,0; 1,4; 1,6; 2,2; 2,5     |
| 8; 10; 14; 16; 20  | 16; 20                      | 1,6; 2,0; 2,2; 2,5; 3,0     |
| 12; 16; 20; 25; 32   | 25; 32                      | 3,0; 3,5; 5,0               |
| 14; 20; 25; 32; 40   | 40; 50                      | 2,5; 3,0; 3,5; 5,0          |
| Величина тока $I$ ориентировочно может быть определена путём сопоставления площади прямоугольника и площади круга.             |                             |                             |
| Размеры цилиндрических контактов и контактных накладок $d_k$ из драгоценных металлов, серебра и металлокерамических композиций |                             |                             |
| Величина тока $I$ , А  | Диаметр контакта $d_k$ , мм | Толщина контакта $c^*$ , мм |
| до 2   | 1 - 2                       | 0,3 - 1,0                   |
| 2 - 5  | 2 - 4                       | 0,6 - 1,2                   |
| 5 - 10   | 3 - 5                       | 0,8 - 1,6                   |
| 10 - 20  | 5 - 8                       | 1,0 - 2,0                   |
| 20 - 40  | 8 - 12                      | 1,2 - 2,2                   |

|           |         |           |
|-----------|---------|-----------|
| 40 - 63   | 12 - 16 | 1,4 - 2,5 |
| 63 - 100  | 16 - 20 | 1,6 - 3,0 |
| 100 - 160 | 20 - 25 | 2,2 - 3,0 |
| 160 - 250 | 25 - 32 | 2,5 - 3,5 |

**Таблица 17** - Основные свойства наиболее распространённых контактных материалов

| Материал                | Температура $\vartheta_{пл}$ , °C | Температура $\vartheta_{крит}$ , °C | Модуль упругости $E$ ,<br>x $10^6$ кгс/см <sup>2</sup> ,<br>x $10^5$ Н/мм <sup>2</sup> | Твёрдость $H_v$ ,<br>x 10<br>кгс/мм <sup>2</sup> , x<br>100 Н/мм <sup>2</sup> | Предел прочности на растяжение $\sigma_0$ x, кгс/см <sup>2</sup> ,<br>10 Н/см <sup>2</sup> |
|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--|---|--|
| <b>Al</b> твёрдотянутый | 660                               | 1800                                | 0,72   | 2,7   | 1500   |
| Бронза                  | 950                               | -                                   | 1,1 - 1,2  | 6 - 7   | 3900 - 7000  |
| Вольфрам                | 3410                              | 5900                                | 3,5  | 20 - 35   | $(10-30) \cdot 10^3$   |
| Графит                  | -                                 | 3650                                | 0,03 - 0,09  | 1,2 - 2,0   | 70 - 100   |
| Дюралюминий             | 650                               | -                                   | 0,71   | 7 - 11  | 3500   |
| Железо                  | 1530                              | 2450                                | 2,0 - 2,2  | 6 - 8   | 2500 - 3000  |
| Кадмий                  | 321                               | 770                                 | 0,5 - 0,7  | 3,5   | 700 - 900  |
| Латунь                  | 900                               | -                                   | 0,9 - 1,1  | 6,0 - 14,5  | 3000 - 6000  |
| <b>Si</b> твёрдотянутая | 1083                              | 2600                                | 1,1 - 1,3  | 11 - 13   | 4100   |
| Молибден                | 2620                              | 3560                                | 3,5  | 18  | $(14-25) \cdot 10^3$   |
| Никель                  | 1455                              | 2730                                | 2,1  | 8   | 4000 - 4500  |
| Олово                   | 232                               | 2270                                | 0,4 - 0,6  | 0,4 - 0,5   | 140 - 200  |
| Свинец                  | 327                               | 1540                                | 0,16   | 0,4   | 210  |
| <b>Ag</b> твёрдотянутое | 960                               | 1955                                | 0,75   | 3 - 6   | 3800   |
| Сталь                   | 1400                              | -                                   | 2,1 - 2,2  | 10 - 20   | 4000 - 6000  |
| Хром                    | 1800                              | 2200                                | 9,0  | 9 - 13  | -  |
| Цинк                    | 419                               | 907                                 | 0,84   | 3   | 1120 - 1330  |
| Золото                  | 1063                              | 2807                                | 0,7 - 0,85   | 1,8   | -  |
| КМК-А10                 | -                                 | -                                   | -  | 4,0 - 7,5   | -  |
| КМК-А20                 | -                                 | -                                   | -  | 4,5 - 6,0   | -  |

**Таблица 18** - Напряжения  $U_{рек}$ ,  $U_{пл}$  и температуры рекристаллизации (размягчения)  $\vartheta_{рек}$  и плавления  $\vartheta_{пл}$  металлов электрических контактов

| Материал контактов | Напряжение $U$ ( $U_k$ ), В |          | Температура $\vartheta$ , °C |                  |
|--------------------|-----------------------------|----------|------------------------------|------------------|
|                    | $U_{рек}$                   | $U_{пл}$ | $\vartheta_{рек}$            | $\vartheta_{пл}$ |
| Алюминий           | 0,1                         | 0,3      | 150                          | 660              |
| Железо             | 0,21                        | 0,6      | 500                          | 1530             |
| Никель             | 0,22                        | 0,65     | 520                          | 1455             |
| Медь               | 0,12                        | 0,43     | 190                          | 1083             |
| Серебро            | 0,09                        | 0,37     | 150                          | 960              |
| Молибден           | 0,3                         | 0,9      | 900                          | 2620             |
| Вольфрам           | 0,4                         | 1,1      | 1000                         | 3410             |
| Платина            | 0,25                        | 0,7      | 540                          | 1773             |

|        |      |      |     |      |
|--------|------|------|-----|------|
| Золото | 0,08 | 0,43 | 100 | 1063 |
| Кадмий | -    | 0,15 | -   | 321  |
| Цинк   | 0,1  | 0,17 | 170 | 419  |

**Таблица 19** - напряжение  $U_k$  и соответствующие им значения превышения температуры  $\tau_k^{KK}$  контактной площадки над температурой металла контакта

|                    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |
|--------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| $U_k$ , мВ         | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 60 | 70 | 90 |     |
| $\tau_k^{KK}$ , °C | Ag | 3  | 4  | 8  | 11 | 16 | 21 | 28 | 36 | 44 | 61 | 85 | 149 |
|                    | Cu | 4  | 5  | 10 | 14 | 20 | 26 | 40 | 42 | 51 | 70 | 96 | 160 |

**Таблица 20** - Коэффициент  $k_{св}$  для расчёта начального тока сваривания контактов  $I_{св}^H$

|                                      |                 |                               |
|--------------------------------------|-----------------|-------------------------------|
| Тип контакта                         | Материал        | $k_{св}$ , А/Н <sup>0,5</sup> |
| Щёточный                             | Медь - латунь   | 950 - 1270                    |
| Пальцевый несамоустанавливающийся    | Медь - медь     | 1300                          |
| Пальцевый несамоустанавливающийся    | Латунь - медь   | 1200                          |
| Пальцевый несамоустанавливающийся    | Латунь - сталь  | 1520                          |
| Пальцевый несамоустанавливающийся    | Латунь - латунь | 1600                          |
| Пальцевый самоустанавливающийся      | Медь - латунь   | 1820                          |
| Розеточный (на один элемент розетки) | Медь - латунь   | 1740                          |
| Розеточный (на один элемент розетки) | Медь - медь     | 1900                          |

**Табл. 21** - Предел прочности на смятие  $\sigma_{см}$  различных контактных материалов

|                   |  |                   |  |
|-------------------|--|-------------------|--|
| Материал контакта | Предел прочности на смятие $\sigma_{см}$ , Н/мм <sup>2</sup> | Материал контакта | Предел прочности на смятие $\sigma_{см}$ , Н/мм <sup>2</sup> |
| Медь твёрдая      | 520  | Цинк              | 430  |
| Медь мягкая       | 390  | Олово             | 45   |
| Al отожжённый     | 110  | Свинец            | 23   |
| Al твёрдотянутый  | 250  | Молибден          | 1690   |
| Золото            | 530  | Серебро           | 310  |
| Платина           | 780  | Дюраль твёрдый    | 420  |
| Латунь твёрдая    | 500 - 600  | Дюраль мягкий     | 210  |
| Латунь мягкая     | 300 - 450  | КМК-А10           | 450  |
| Сталь             | 900 - 1000   | КМК-А20           | 470  |

**Таблица 22** - Экспериментальные значения коэффициентов износа  $k_{зм}$  или  $k_{рз}$

| Диапазон токов $I$ , А и среда | Режим  | Материал контактов                                    | $k_{зм}$ или $k_{рз}$ , г/А <sup>2</sup> |
|--------------------------------|--|---|--|
| 200 - 400<br>Воздух            | Замыкание контактов со сниженной вибрацией (суммарное время меньше 0,3 мс)   | Серебро   | Около 0,002                              |
|                                |  | Серебро +15% окиси кадмия (мелкодисперсная структура) | Около 0,001                              |
| 15 - 300<br>Воздух             | Замыкание контактов со значительной вибрацией (суммарное время от 1 до 5 мс) | Серебро +15% окиси кадмия (мелкодисперсная структура) | 0,01                                     |
|                                |  | Серебро   | Около 0,05                               |
| 100 - 300<br>Воздух            | То же  | Медь  | Около 0,2                                |
| 1 - 500<br>Воздух              | Размыкание   | Материалы, указанные на рис. 6                        | Значения, на рис. 6                      |

**Таблица 23** - Значения удельных сопротивлений  $\rho$  некоторых веществ при 20°С.

| Вещество | $\rho$ , Ом·м         | Вещество | $\rho$ , Ом·м         |
|----------|-----------------------|----------|-----------------------|
| Серебро  | $1,58 \times 10^{-8}$ | Осмий    | $9,50 \times 10^{-8}$ |
| Медь     | $1,68 \times 10^{-8}$ | Железо   | $9,90 \times 10^{-8}$ |
| Золото   | $2,20 \times 10^{-8}$ | Платина  | $1,05 \times 10^{-7}$ |
| Алюминий | $2,70 \times 10^{-8}$ | Олово    | $1,13 \times 10^{-7}$ |
| Вольфрам | $5,30 \times 10^{-8}$ | Свинец   | $2,07 \times 10^{-7}$ |
| Цинк     | $5,95 \times 10^{-8}$ | Ртуть    | $9,54 \times 10^{-7}$ |
| Латунь   | $6,30 \times 10^{-8}$ | Уголь    | $4,55 \times 10^{-5}$ |
| Никель   | $7,30 \times 10^{-8}$ |          |                       |

**Таблица 24** - Минимальная напряжённость  $H_{min}$  магнитного поля, требующаяся для перемещения дуги  $D$  в щель  $\delta_3$  дугогасительной камеры

| Ток $I_{om}$ , А | $\delta_2$ , мм | Минимальная напряжённость $H_{min}$ поля, А/см |                  |                  |                   |                  |                  |                   |                  |
|------------------|-----------------|--|------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|
|                  |                 | $\delta_3 = 1$ мм                              |                  |                  | $\delta_3 = 2$ мм |                  |                  | $\delta_3 = 4$ мм |                  |
|                  |                 | $\beta=30^\circ$                               | $\beta=45^\circ$ | $\beta=75^\circ$ | $\beta=30^\circ$  | $\beta=45^\circ$ | $\beta=75^\circ$ | $\beta=30^\circ$  | $\beta=75^\circ$ |
| 2                | 2               | 14   | 12               | 6                | -                 | -                | -                | -                 | -                |
|                  | 4               | -  | 104              | -                | 8                 | 6                | 2                | -                 | -                |
|                  | 8               | -  | 152              | -                | -                 | -                | -                | 2                 | 2                |
|                  | 16              | 168  | 164              | 136              | 20                | 12               | 10               | 2                 | 2                |
| 35               | 2               | 22   | 18               | 10               | -                 | -                | -                | -                 | -                |
|                  | 4               | -  | 120              | -                | 10                | 10               | 1,2              | -                 | -                |
|                  | 8               | -  | 155              | -                | -                 | -                | -                | 4                 | 1,2              |
|                  | 16              | 184  | 172              | 124              | 32                | 14               | 10               | 4                 | 1,2              |
| 150              | 2               | 164  | 133              | 128              | -                 | -                | -                | -                 | -                |
|                  | 4               | -  | 137              | -                | 10                | 6                | 2                | -                 | -                |
|                  | 8               | -  | 164              | -                | -                 | -                | -                | 6                 | 1,2              |

|     |    |     |     |     |     |     |    |   |     |
|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|----|---|-----|
|     | 16 | 190 | 176 | 140 | 36  | 28  | 18 | 6 | 1,2 |
| 300 | 2  | 175 | 152 | 144 | -   | -   | -  | - | -   |
|     | 4  | -   | -   | -   | 15  | -   | 4  | - | -   |
|     | 8  | -   | -   | -   | -   | -   | -  | 6 | 1,2 |
|     | 16 | 195 | 176 | 165 | 40  | -   | 19 | 6 | 1,2 |
| 600 | 2  | 132 | 104 | 54  | -   | -   | -  | - | -   |
|     | 4  | -   | 112 | -   | 46  | 12  | 6  | - | -   |
|     | 8  | -   | 148 | -   | -   | -   | -  | 6 | 1,2 |
|     | 16 | 188 | 168 | 136 | 168 | 114 | 92 | 6 | 1,2 |

**Таблица 25** - Допустимые длительные нагрузки медных проводов с резиновой и полихлорвиниловой изоляцией при  $\theta_0 = 40^\circ\text{C}$

| Сечение провода<br>$S_{пр}, \text{мм}^2$ | Режим работы      |               |               |
|--|-------------------|---------------|---------------|
|  | $ПВ\% = 100\%$    | $ПВ\% = 40\%$ | $ПВ\% = 25\%$ |
|  | Допустимый ток, А |               |               |
| 1,5                                      | 18                | 18            | 18            |
| 2,5                                      | 24                | 24            | 24            |
| 4  | 32                | 32            | 32            |
| 6  | 39                | 39            | 39            |
| 10                                       | 63                | 88            | 110           |
| 16                                       | 79                | 110           | 135           |
| 25                                       | 110               | 150           | 190           |
| 35                                       | 130               | 180           | 225           |
| 50                                       | 170               | 235           | 295           |
| 70                                       | 210               | 290           | 365           |
| 95                                       | 260               | 360           | 455           |
| 120                                      | 300               | 420           | 525           |
| 150                                      | 345               | 480           | 600           |

**Таблица 26** - Свойства материалов, используемых для резисторов и реостатов

| Наименование и обозначение марок, состав | Удельное электрическое сопротивление при $20^\circ\text{C}$ , мкОм·м | Максимальная рабочая температура, $^\circ\text{C}$ | Температурный коэффициент сопротивления (ТКС), $^\circ\text{C}^{-1}$ |
|--|--|--|--|
| Манганин (Cu, Mn, Ni+Co)                 | 0,42-0,48  | 60   | $-2 \cdot 10^{-6} - +25 \cdot 10^{-6}$                               |
| Константан (Cu, Ni+CoMn)                 | 0,45-0,52  | 500  | $2 \cdot 10^{-5}$  |
| Нейзильбер (Cu, Zn, Ni+Co)               | 0,3-0,32   | 200  | $36 \cdot 10^{-5}$   |
| Нихром (Fe, Ni, Cr)                      | 1,07-1,17  | 1100   | $17 \cdot 10^{-5}$   |
| Сплав 0X23Ю5 (Fe, Cr, Al)                | 1,29-1,45  | 1200   | $8 \cdot 10^{-5}$  |
| Чугун (Fe, C)                            | 0,8  | 400  | 0,001  |
| Сталь проволока                          | 0,11-0,13  | 200-300  | $(2,1-48) \cdot 10^{-4}$   |
| Сталь листовая (Fe, Si)                  | 0,3  | 150-200  | 0,002  |

**Таблица 27** - Длительно допустимые температуры  $\Theta_0$  для изоляционных материалов различных классов нагревостойкости

| Класс нагревостойкости     | <i>Y</i> | <i>A</i> | <i>E</i> | <i>B</i> | <i>F</i> | <i>H</i> | <i>C</i> |
|----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $\Theta_0, ^\circ\text{C}$ | 90       | 105      | 120      | 130      | 155      | 180      | > 180    |

Класс *Y* - непропитанные и не погруженные в жидкий электроизоляционный материал волокнистые материалы из целлюлозы, шёлка и др. Этот класс изоляции в электроаппаратостроении практически не применяется. Класс *A* - то же, но погруженные в жидкий электроизоляционный состав.

Класс *E* - некоторые синтетические и органические пленки и др.

Класс *B* - материалы на основе слюды (в том числе на органических подложках), асбеста и стекловолкна, применяемые с органическими связующими и пропитывающими составами.

Класс *F* - то же, но применяемые в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами.

Класс *H* - то же, но применяемые в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами, а также кремнийорганические эластомеры.

Класс *C* - слюда, керамические материалы, стекло, кварц, применяемые без связующих составов или с неорганическими или кремнийорганическими связующими составами. Применяется для специальной техники.

**Таблица 28** - Допустимые превышения температуры для многослойных катушек с изоляционными материалами (температура окружающего воздуха 20°C)

| Класс нагревостойкости | Продолжительный режим работы |                          | Прерывисто-продолжительный, повторно-кратковременный и кратковременный режимы работы |                          |
|------------------------|------------------------------|--------------------------|--|--------------------------|
|                        | в воздухе                    | в трансформаторном масле | в воздухе  | в трансформаторном масле |
| <i>A</i>               | 65                           | 60                       | 80   | 60                       |
| <i>E</i>               | 80                           | 60                       | 90   | 60                       |
| <i>B</i>               | 90                           | 60                       | 100  | -                        |
| <i>F</i>               | 110                          | -                        | 120  | -                        |
| <i>H</i>               | 130                          | -                        | 140  | -                        |

**Таблица 29** - Сортамент медных обмоточных проводов (по меди)  $d_{on}^{Cu}$  и наружных (максимальных, по изоляции) диаметров  $d_{on}^{uz}$  эмалированных проводов. Класс нагревостойкости изоляции проводов - А

| $d_{on}^{Cu}$ по меди, мм | $d_{on}^{uz}$ , мм |       |       | $d_{on}^{Cu}$ по меди, мм | $d_{on}^{uz}$ , мм |       |       |
|---------------------------|--------------------|-------|-------|---------------------------|--------------------|-------|-------|
|                           | ПЭЛ                |       | ПЭЛ   |                           | ПЭЛ                | ПЭВ-1 | ПЭВ-2 |
| 0,020                     | 0,030              | 0,030 | -     | 0,425                     | 0,460              | 0,455 | 0,465 |
| 0,025                     | 0,035              | 0,035 | -     | 0,450                     | 0,485              | 0,480 | 0,490 |
| 0,032                     | 0,040              | 0,042 | -     | 0,475                     | 0,510              | 0,505 | 0,515 |
| 0,040                     | 0,050              | 0,052 | -     | 0,500                     | 0,540              | 0,545 | 0,555 |
| 0,050                     | 0,062              | 0,070 | -     | 0,530                     | 0,570              | 0,575 | 0,585 |
| 0,060                     | 0,072              | 0,083 | 0,087 | 0,560                     | 0,600              | 0,605 | 0,615 |
| 0,070                     | 0,082              | 0,093 | 0,097 | 0,600                     | 0,640              | 0,645 | 0,655 |
| 0,080                     | 0,092              | 0,103 | 0,107 | 0,630                     | 0,670              | 0,675 | 0,685 |

|       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,090 | 0,102 | 0,113 | 0,117 | 0,670 | 0,710 | 0,715 | 0,730 |
| 0,100 | 0,115 | 0,123 | 0,127 | 0,710 | 0,760 | 0,755 | 0,770 |
| 0,112 | 0,135 | 0,143 | 0,147 | 0,750 | 0,800 | 0,800 | 0,815 |
| 0,125 | 0,140 | 0,148 | 0,153 | 0,850 | 0,900 | 0,900 | 0,915 |
| 0,132 | 0,147 | 0,155 | 0,159 | 0,900 | 0,950 | 0,950 | 0,965 |
| 0,140 | 0,155 | 0,163 | 0,167 | 0,950 | 1,000 | 1,000 | 1,015 |
| 0,150 | 0,168 | 0,177 | 0,180 | 1,000 | 1,060 | 1,070 | 1,080 |
| 0,160 | 0,178 | 0,187 | 0,190 | 1,060 | 1,120 | 1,130 | 1,140 |
| 0,170 | 0,188 | 0,197 | 0,200 | 1,120 | 1,180 | 1,190 | 1,200 |
| 0,180 | 0,198 | 0,207 | 0,210 | 1,180 | 1,240 | 1,250 | 1,260 |
| 0,190 | 0,208 | 0,217 | 0,220 | 1,250 | 1,310 | 1,320 | 1,330 |
| 0,200 | 0,222 | 0,227 | 0,230 | 1,320 | 1,380 | 1,390 | 1,400 |
| 0,212 | 0,234 | 0,239 | 0,242 | 1,400 | 1,465 | 1,470 | 1,480 |
| 0,224 | 0,246 | 0,251 | 0,254 | 1,500 | 1,565 | 1,570 | 1,580 |
| 0,236 | 0,258 | 0,266 | 0,271 | 1,600 | 1,665 | 1,670 | 1,680 |
| 0,250 | 0,272 | 0,280 | 0,285 | 1,700 | 1,765 | 1,770 | 1,780 |
| 0,265 | 0,291 | 0,295 | 0,300 | 1,800 | 1,865 | 1,875 | 1,880 |
| 0,280 | 0,306 | 0,310 | 0,315 | 1,900 | 1,965 | 1,975 | 1,980 |
| 0,300 | 0,326 | 0,330 | 0,335 | 2,000 | 2,065 | 2,075 | 2,080 |
| 0,315 | 0,345 | 0,345 | 0,350 | 2,120 | 2,185 | 2,205 | 2,210 |
| 0,335 | 0,365 | 0,365 | 0,370 | 2,240 | 2,305 | 2,325 | 2,330 |
| 0,355 | 0,385 | 0,385 | 0,395 | 2,360 | 2,425 | 2,445 | 2,450 |
| 0,375 | 0,405 | 0,405 | 0,415 | 2,500 | 2,565 | 2,585 | 2,590 |
| 0,400 | 0,435 | 0,430 | 0,440 | -     | -     | -     | -     |

**Таблица 30** - Параметры силовых электронных приборов - тиристоров

| Тип тиристора | $I_{ном}, A$ | $U_{ном}, B$ | $t_{выкл}, мкс$ | $I_{уд}, A$ |
|---------------|--------------|--------------|-----------------|-------------|
| T-6-10        | 10           | 80-1280      | 30-150          | 200         |
| T-25          | 25           | 80-1120      | 30-250          | 800         |
| T-160         | 160          | 80-1120      | 30-250          | 3500        |
| T-250         | 250          | 80-1760      | 100-250         | 3500        |
| T-500         | 500          | 80-1760      | 100-250         | 7000        |
| T2-160        | 160          | 320-800      | 150-250         | 3300        |
| T2-200        | 200          | 80-1140      | 150-250         | 3500        |
| T2-250        | 250          | 80-1140      | 150-250         | 4000        |
| T3-500        | 500          | 800-1600     | 250-500         | 5000        |
| T9-100        | 100          | 320-1760     | 150-250         | 3000        |
| T9-250        | 250          | 320-1760     | 150-250         | 5500        |
| T10-10        | 10           | 80-960       | 70-150          | 200         |
| T10-80        | 80           | 80-960       | 70-150          | 1200        |
| TB-200        | 200          | 40-960       | 70-250          | 3500        |
| TB2-320       | 320          | 80-1120      | 150-250         | 4500        |
| TB-500        | 500          | 80-960       | 150-250         | 5000        |
| TB-800        | 800          | 80-960       | 150-250         | 7000        |
| TD-20         | 20           | 80-1920      | 70-250          | 300         |

|         |      |          |         |       |
|---------|------|----------|---------|-------|
| ТД-100  | 100  | 80-1920  | 70-250  | 1600  |
| ТД-125  | 125  | 80-1600  | 70-250  | 1900  |
| ТД-200  | 200  | 80-1600  | 70-250  | 2800  |
| ТД-250  | 250  | 80-1440  | 70-250  | 3500  |
| ТД-320  | 320  | 80-1440  | 70-250  | 4250  |
| ТБ-50   | 50   | до 960   | 16-50   | 1000  |
| ТБ-160  | 160  | до 840   | 20-50   | 4000  |
| ТБ-200  | 200  | до 960   | 16-50   | 5200  |
| ТБ-400  | 400  | до 840   | 20-50   | 7000  |
| ТЧ-10   | 10   | 100-1000 | 10-14,5 | 150   |
| ТЧ-125  | 125  | 100-1000 | 10-14,5 | 1700  |
| ТЛ-100  | 100  | 210-1000 | 70-250  | 3000  |
| ТЛ-320  | 320  | 210-1000 | 70-250  | 4500  |
| ТЛВ-200 | 200  | 210-700  | 70-250  | 2000  |
| ТЛВ-320 | 320  | 210-700  | 70-250  | 4400  |
| ТИ-800  | 800  | 240-720  | 20-30   | 15000 |
| ТИ-3000 | 3000 | 240-720  | 20-30   | 30000 |

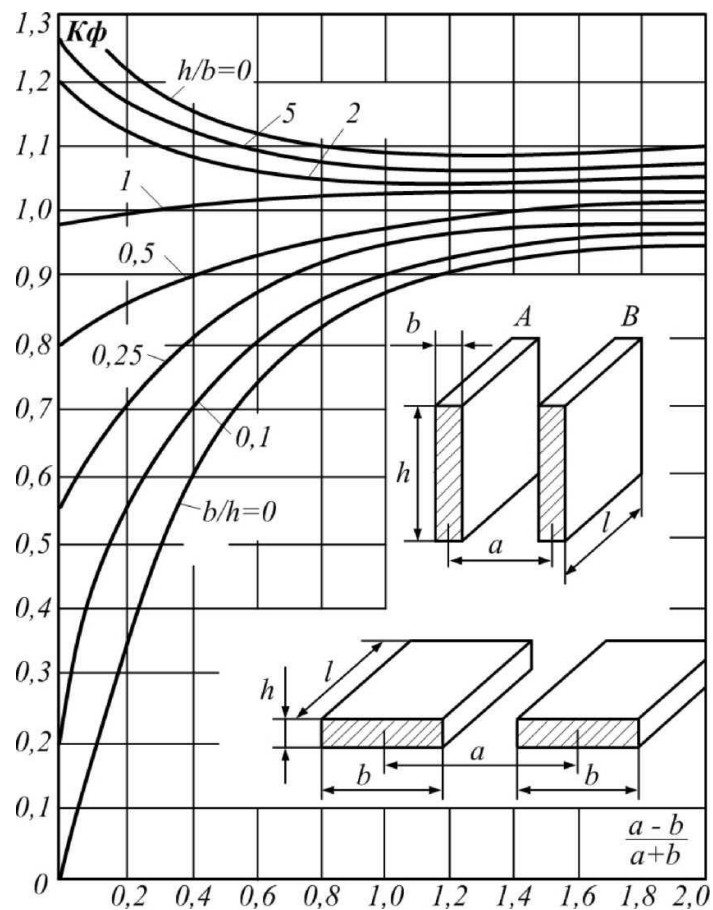
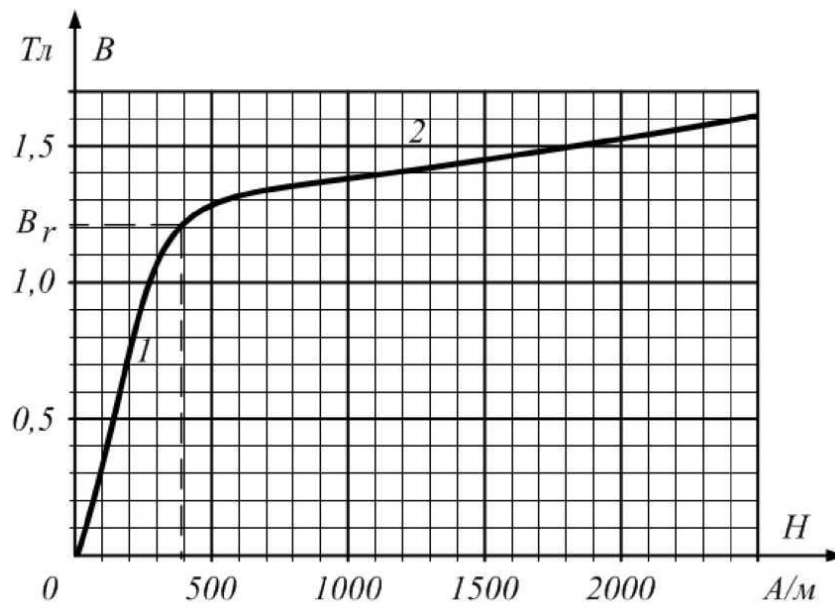
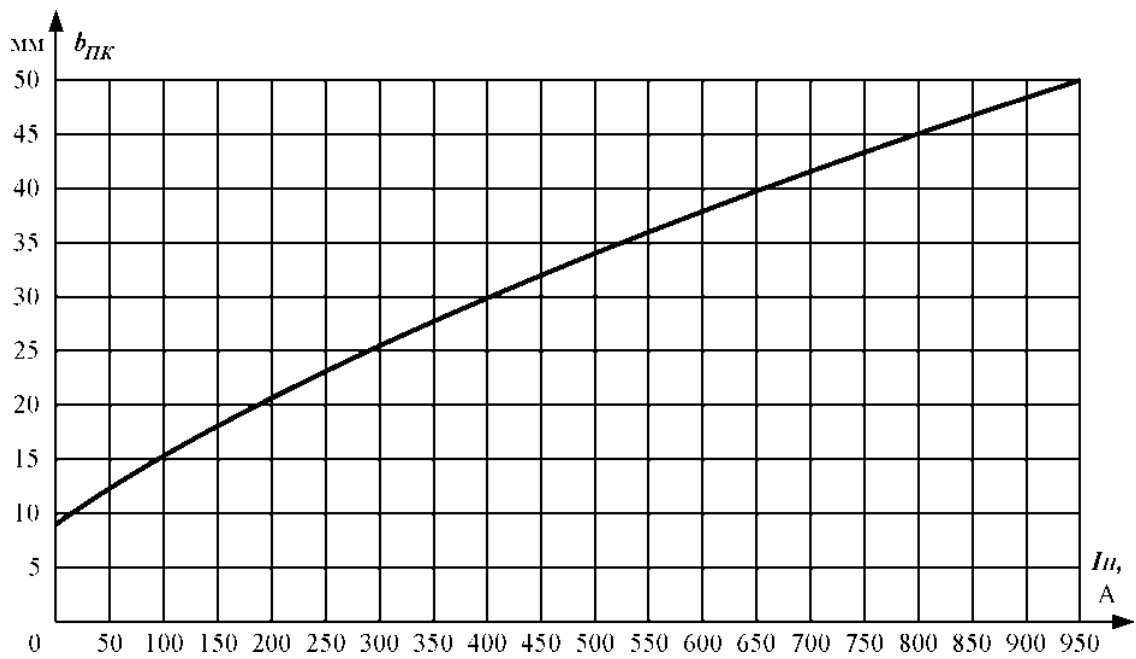


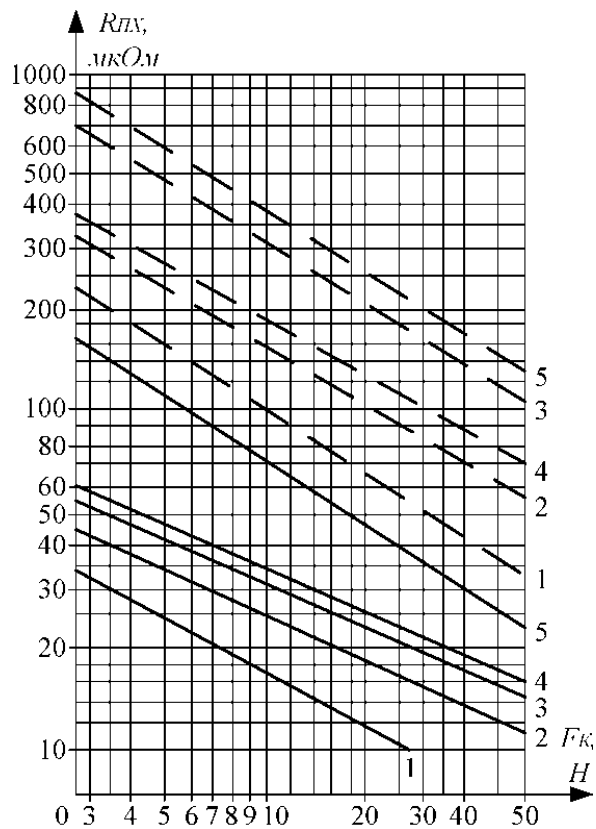
Рис. 1. - Кривые Двайта, учитывающие влияние размеров поперечного сечения проводника



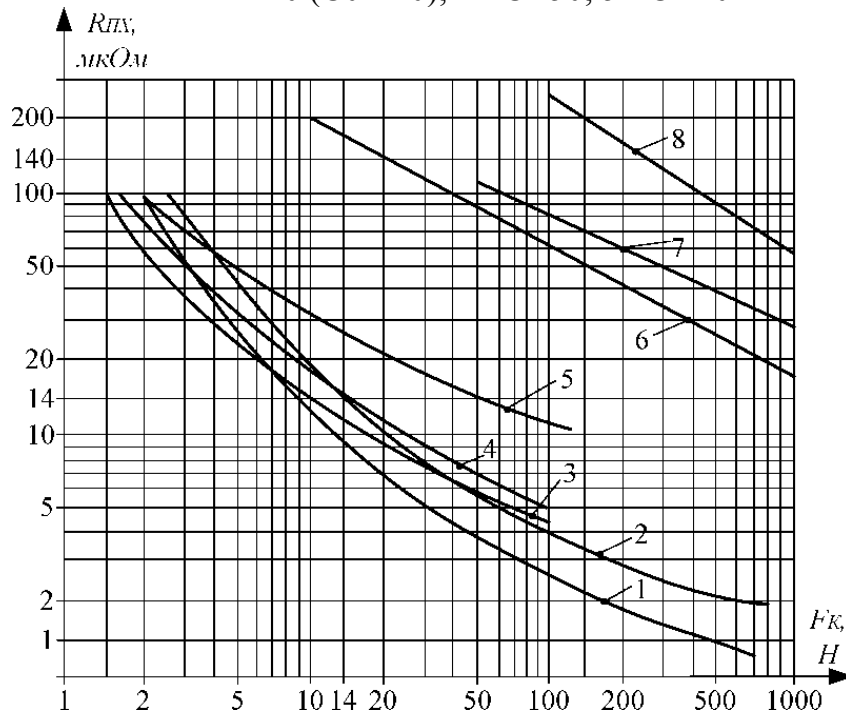
**Рис 2.** - Кривая намагничивания ферромагнитного материала



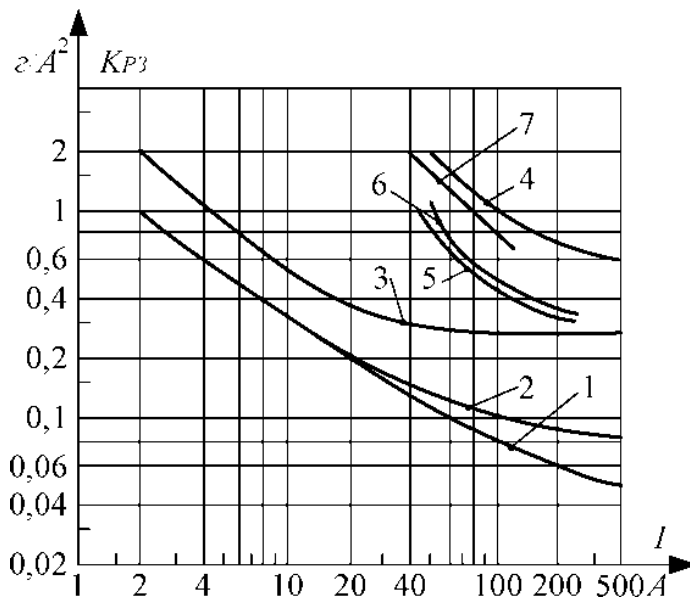
**Рис. 3.** - Зависимость ширины подвижного контакта от величины тока



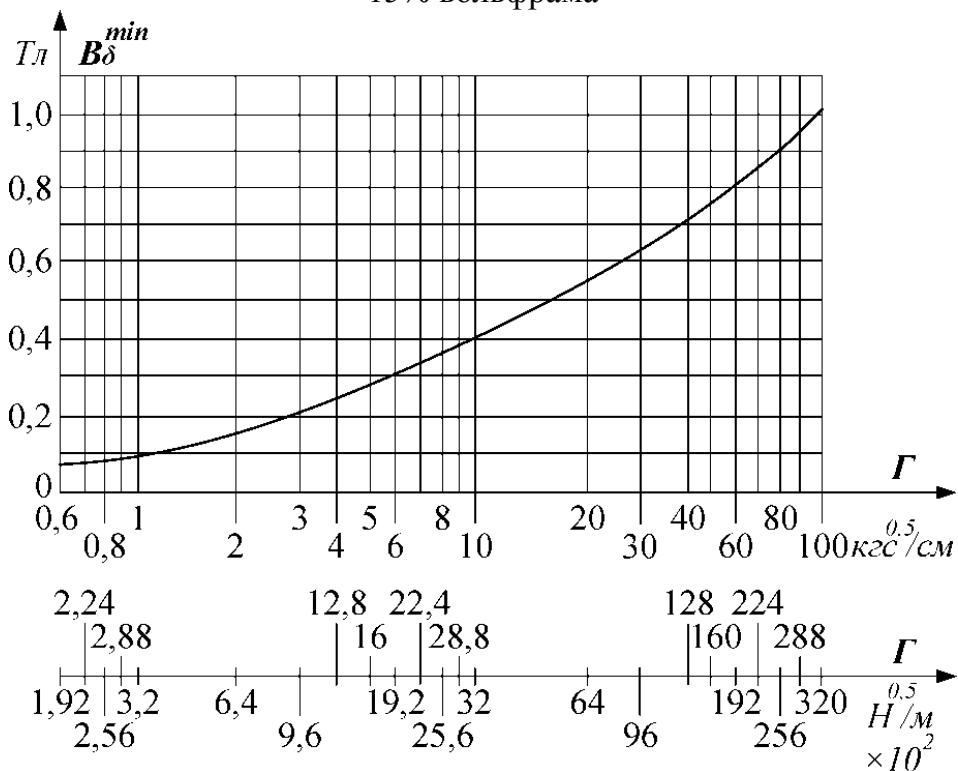
**Рис. 4.** - Графические зависимости переходного сопротивления контактов от силы нажатия. Контакты металлокерамические точечные, диаметр 14 мм, токи 140 А и 240 А (пунктирные линии - 240 А). 1 - серебро; 2 - металлокерамика КМК-А10 (СОК15); 3 - КМК-А20 (СОМ10); 4 - СВ50; 5 - СН40



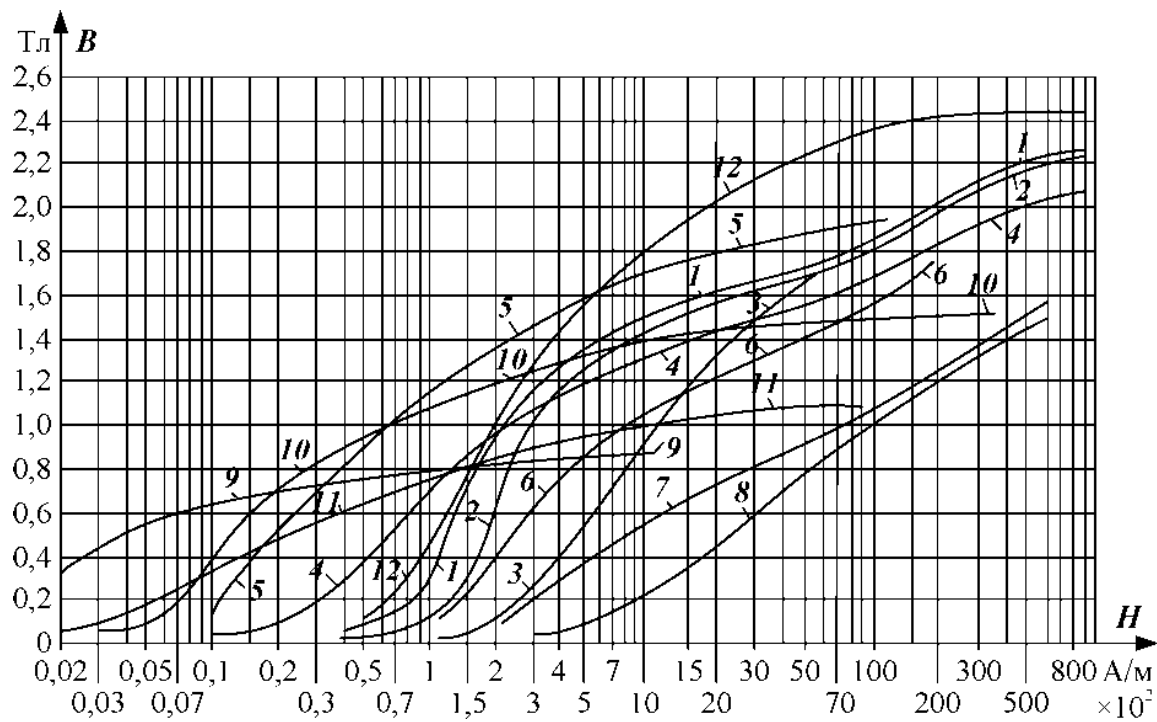
**Рис. 5.** - Графические зависимости переходного сопротивления контактов от силы нажатия при разных формах контактной поверхности. 1 - серебряный плоский; 2 - медный плоский; 3 - серебряный линейный; 4 - медный линейный; 5 - серебряный точечный; 6 - медный свежезачищенный точечный (медь твёрдая); 7 - медный (медь твёрдая, масляный выключатель); 8 - медь-вольфрам (масляный выключатель)



**Рис. 6.** - Зависимость коэффициента износа  $k_{pz}$  от тока при размыкании контактов в воздухе. 1 - серебро + 30 - 40% никеля; 2 - серебро + 15% окиси кадмия; 3 - серебро; 4 - медь; 5 - кадмиевая медь; 6 - серебро + 40% вольфрама; 7 - серебро + 15% вольфрама

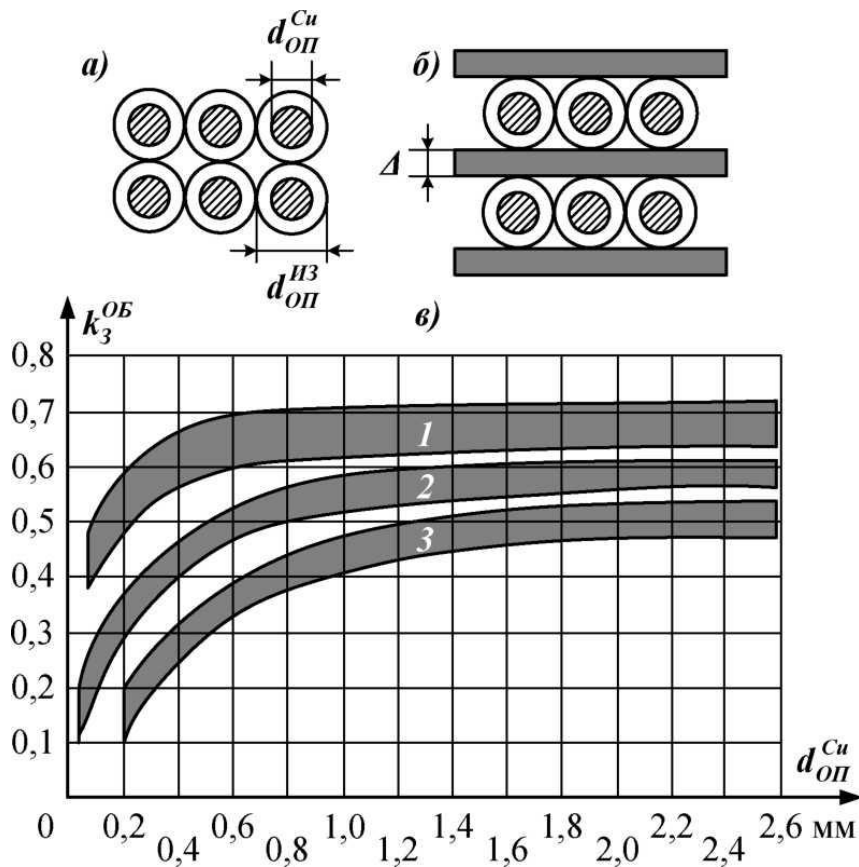


**Рис. 7.** - Зависимость магнитной индукции  $B_{\delta}^{min}$  в рабочем воздушном зазоре при отпущенном якоре ( $\delta_{max}$ ) от геометрического показателя  $\Gamma$ . Для электромагнитов с внешним притягиваемым якорем. Режим работы продолжительный. Превышение температуры  $70^{\circ}C$

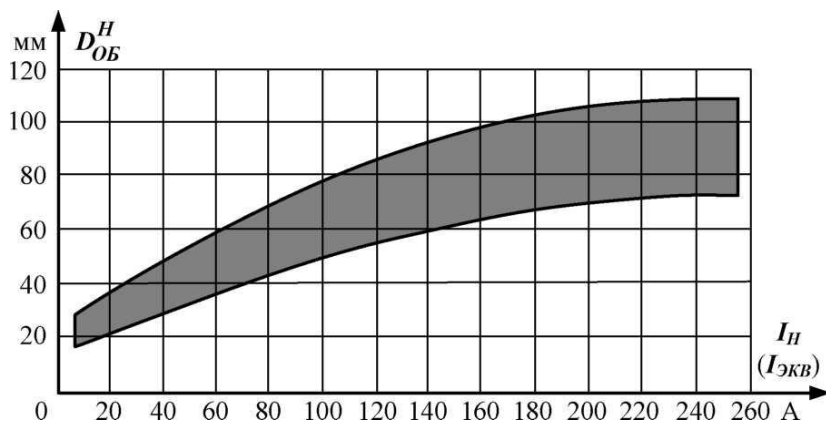


**Рис. 8.** - Кривые намагничивания магнитомягких материалов:

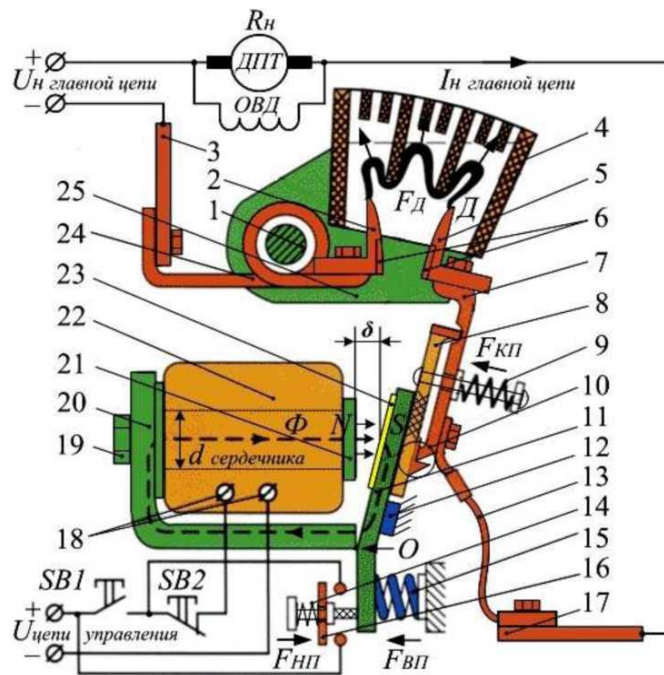
1 - сталь низкоуглеродистая электротехническая марки Э отожжённая; 2 - сталь качественная конструкционная марки Ст.10 отожжённая; 3 - сталь качественная конструкционная марки Ст.20 отожжённая; 4 - сталь листовая электротехническая марки Э41; 5 - сталь листовая электротехническая холоднокатанная марки Э330; 6 - чугун ковкий отожжённый; 7 - чугун серый легированный марки № 00 отожжённый; 8 - чугун марки № 00 неотожжённый; 9 - высоконикелевый пермаллой марки 79НМ; 10 - низконикелевый пермаллой марки 50Н; 11 - низконикелевый пермаллой марки 50НХС; 12 - пермендюр, сплав марки 49К2Ф; (permen-dur: permeability - «проницаемость»; durable - «прочный»); сплав железа (47 - 50%) с кобальтом (48 - 50%), с небольшой добавкой ванадия (1,5 - 2,0%)



**Рис. 9.** - Определение коэффициента заполнения  $k_3^{OB}$  обмоточного пространства в зависимости от диаметра обмоточного провода по меди  $d_{on}^{Cu}$ : *а*) - обмотка без межрядовой изоляции; *б*) - обмотка с изоляцией  $\Delta$  между каждым рядом; *в*) - коэффициенты заполнения для проводов разных марок: *1* - эмалированные (ПЭЛ, ПЭВ, ПЭВА, ПЭТВ и др.); *2* - эмалированные с однослойной волокнистой изоляцией из шёлка (ПЭЛШО, ПЭВЛО и др.); *3* - с двухслойной волокнистой бумажной и стеклянной изоляцией (ПБД, АПБД, ПСД, АПСД, ПСДК и др.). Верхние границы зон *1*, *2* и *3* - без межрядовой изоляции, нижние - с изоляцией между каждым рядом (слоем). Диаметр  $d_{on}^{u3}$  - наружный (максимальный) диаметр обмоточного провода в изоляции



**Рис. 10.** - Примерное значение диаметра обмотки  $D_{об}^H$  приводного электромагнита в зависимости от величины коммутируемого тока  $I_n$  ( $I_{ЭКВ}$ ). Верхняя граница зоны - с межрядовой изоляцией  $\Delta$  между каждым рядом (слоем) обмотки, нижняя граница зоны - без изоляции  $\Delta$  между каждым рядом (слоем) обмотки



**Рис. 11.** - Схема электромагнитного контактора постоянного тока:

1 - сердечник дугогасительной катушки; 2 - неподвижный главный контакт; 3 - токоведущая шина; 4 - дугогасительная камера; 5 - подвижный главный контакт; 6 - металлокерамические пластины (накладки); 7 - контактодержатель; 8 - изолирующая пластина; 9 - контактная (притирающая) пружина; 10 - опорная точка контактодержателя 7 (призма вращения); 11 - якорь электромагнита; 12 - упор (буфер); 13 - гибкое соединение («косичка»); 14 - нажимная пружина; 15 - возвратная пружина; 16 - блок-контакт; 17 - токоведущая шина; 18 - выводы включающей катушки; 19 - болт крепления сердечника электромагнита; 20 - магнитопровод электромагнита (скоба, ярмо); 21 - полюсный наконечник электромагнита; 22 - включающая катушка; 23 - немагнитная прокладка; 24 - дугогасительная катушка (катушка тока); 25 - пластина-полюс (2 шт.) для подведения магнитного поля в зону горения дуги. **SB1** - кнопка включения контактора «Пуск» (без фиксации); **SB2** - кнопка выключения контактора «Стоп» (без фиксации); **O** - ось вращения якоря; **S** - рабочий зазор электромагнита (мм); **Д** - столб электрической дуги; **ДПТ** - двигатель постоянного тока; **ОВД** - обмотка возбуждения двигателя