

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

Кафедра электротехники и электромеханики

Е.А. Чабанов

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ

Практикум

*Утверждено
Редакционно-издательским советом
университета*

Издательство
Пермского национального исследовательского
Политехнического университета
2019

УДК 621.316 (076.5)
ББК 31.264 я73
Ч12

Рецензенты:
канд. техн. наук, доцент *Б.В. Васильев*
(председатель совета директоров ЗАО «НИПО»);
д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой
электротехники и электромеханики *Б.В. Кавалеров*
(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет)

Чабанов, Е.А.
Ч12 Электрические и электронные аппараты : практикум / Е.А. Чабанов. –
Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2019. – 84 с.

ISBN 978-5-398-02256-8

Даны необходимые теоретические сведения по электрическим и электронным аппаратам высокого и низкого напряжения. Представлен необходимый перечень практических работ по курсу «Электрические и электронные аппараты».

Предназначено для подготовки бакалавров дневной, заочной и заочной ускоренной форм обучения направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профили подготовки: «Электропривод и автоматика», «Электромеханика», «Конструирование и технологии в электротехнике», «Менеджмент в электроэнергетике и электротехнике».

УДК 621.316 (076.5)
ББК 31.264 я73

ISBN 978-5-398-02256-8

© ПНИПУ, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| Введение | 4 |
| Раздел I. Нагревание и охлаждение элементов электрических аппаратов..... | 5 |
| Основные расчетные формулы и соотношения | 5 |
| Задачи к разделу I | 8 |
| Пример решения задач к разделу I | 14 |
| Раздел II. Электродинамические усилия в электрических аппаратах | 27 |
| Основные расчетные формулы и соотношения | 27 |
| Задачи к разделу II | 28 |
| Пример решения задач к разделу II | 30 |
| Раздел III. Электрические контакты аппаратов | 34 |
| Основные расчетные формулы и соотношения | 34 |
| Задачи к разделу III..... | 36 |
| Пример решения задач к разделу III..... | 41 |
| Раздел IV. Алгебра логики | 48 |
| Основные расчетные формулы и соотношения | 48 |
| Задачи к разделу IV | 50 |
| Пример решения задач к разделу IV..... | 54 |
| Раздел V Изучение релейно-контакторной схемы управления и защит асинхронного короткозамкнутого двигателя..... | 60 |
| Основные расчетные формулы и соотношения | 60 |
| Задачи к разделу V | 64 |
| Пример решения задач к разделу V | 71 |
| Приложение..... | 81 |

Введение

Учебно-методическое пособие содержит задачи, охватывающие большинство основных разделов курса «Электрические и электронные аппараты». В каждом разделе приведены основные расчетные формулы и соотношения, которые могут быть использованы для решения предложенных задач. В приложениях к учебно-методическому пособию представлены отдельные необходимые справочные материалы; недостающие справочные данные можно найти в технической литературе.

Номер варианта, выполняемого студентом, определяется по порядковому номеру в учебном журнале группы. Ответы на контрольные вопросы даются в письменном виде.

При решении задач необходимо давать письменные пояснения выполняемых действий; решение задачи приводится сначала в общем виде, а затем с подстановкой численных значений.

Раздел I. Нагревание и охлаждение элементов электрических аппаратов

Основные расчетные формулы и соотношения

Мощность, выделяемая в однородном проводнике при прохождении через него тока I , определяется формулой

$$P = k_n \cdot k_6 \cdot I^2 \cdot \frac{\rho_0 \cdot (1 + \alpha \theta) \cdot l}{S},$$

где α – температурный коэффициент сопротивления, $1/^\circ\text{C}$;

ρ_0 – удельное сопротивление материала проводника при температуре 0°C , Ом·м;

θ – температура проводника, $^\circ\text{C}$;

l – длина проводника, м;

S – площадь поперечного сечения проводника, м^2 ;

k_n – коэффициент поверхностного эффекта, о.е.;

k_6 – коэффициент эффекта близости, о.е.

Для постоянного тока коэффициенты k_n и k_6 принимаются равными единице. Для переменного тока k_n и k_6 для неферромагнитных проводников определяются по графикам, приведенным в приложении.

Для упрощенных расчетов мощность, выделяемую в ферромагнитном проводнике при переменном токе, можно определить по формуле

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

где F – боковая поверхность проводника, м^2 ;

Π – периметр поперечного сечения, м;

f – частота переменного тока, Гц.

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

- для замкнутого сплошного магнитопровода, на который надета катушка,

$$P = (2,9...3,25) \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{Iw}{l_{cp}} \right)^{5/3} \cdot F \cdot \sqrt{f},$$

где w – число витков катушки;

l_{cp} – длина средней магнитной силовой линии, м;

F – боковая поверхность магнитопровода, м^2 ;

- для замкнутого шихтованного магнитопровода

$$P = p_{уд} \cdot m,$$

где $p_{уд}$ – удельные потери, зависящие от материала, толщины листов и индукции и определяемые по приведенным в приложении графикам, Вт/кг;

m – масса магнитопровода, кг.

Мощность, отводимая с поверхности электрического аппарата в окружающую среду в стационарном режиме, определяется по формуле Ньютона:

$$P = k_t \cdot S \cdot (\theta - \theta_0),$$

где k_t – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² К);

S – поверхность теплоотдачи, м²;

θ, θ_0 – температуры поверхности электрического аппарата и окружающей среды соответственно, °С.

Коэффициент теплоотдачи для приближенных расчетов определяют по формулам:

- для окрашенной краской прямоугольной шины поперечного сечения, находящейся в спокойном воздухе, большая сторона которой расположена вертикально

$$k_t = 9,2 \cdot (1 + 0,9 \cdot 10^{-2} \cdot \tau),$$

где $\tau = \theta - \theta_0$ – перепад температур, °С;

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

$$k_t = 10 \cdot k_1 \cdot (1 + k_2 \cdot 10^{-2} \cdot \tau),$$

где k_1, k_2 – коэффициенты, определяемые из следующей таблицы:

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

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

$$k_t = \frac{2,1 \cdot (1 + 0,005 \cdot \tau)}{\sqrt[3]{S}};$$

- для цилиндрических катушек в случае, когда охлаждающая поверхность $10^{-2} < S < 0,5$ м²,

$$k_t = \frac{3,6 \cdot (1 + 0,005 \cdot \tau)}{\sqrt[5]{S}}.$$

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

$$\theta = \theta_{уст} \cdot (1 - e^{-t/T}) + \theta_n e^{-t/T},$$

где θ_n – начальное значение температуры, °С;

$\theta_{уст}$ – установившееся значение температуры, °С.

$$\theta_{уст} = \frac{P}{k_t \cdot S} + \theta_0,$$

где P – мощность источников теплоты при $\theta = \theta_{\text{уст}}$, Вт;

θ_0 – температура окружающей среды, °С;

T – постоянная времени нагрева, сек.

$$T = \frac{c}{k_t \cdot S},$$

где c – теплоемкость электрического аппарата, Дж/К.

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

$$\tau = \tau_n \cdot e^{-t/T},$$

где $\tau = \theta - \theta_0$; $\tau_n = \theta_n - \theta_0$;

T – постоянная времени охлаждения, равная постоянной времени нагрева, с.

Коэффициент перегрузки по мощности при повторно-кратковременном процессе нагрева

$$k_p = \frac{P_{\text{пк}}}{P_{\text{дл}}} = \frac{1 - e^{\frac{-t_p + t_n}{T}}}{1 - e^{\frac{-t_p}{T}}},$$

где $P_{\text{пк}}$ и $P_{\text{дл}}$ – соответственно мощности источников теплоты при повторно-кратковременном и длительном процессах нагрева электрического аппарата, Вт;

t_p и t_n – соответственно время рабочего периода и паузы, с.

Коэффициент перегрузки по току при повторно-кратковременном процессе нагрева

$$k_I = \frac{I_{\text{пк}}}{I_{\text{дл}}} = \sqrt{k_p}.$$

Относительная продолжительность включения аппарата

$$\text{ПВ \%} = \frac{t_p}{t_p + t_n} \cdot 100 \, \%.$$

Задачи к разделу I

Задача 1.1

Определить количество теплоты, выделяющейся в одном метре длины шинопровода распределительного устройства, шинопровод имеет диаметр d и нагрет до температуры θ .

| № вар. | I , А | Материал шинопровода | d , мм | θ , °С |
|--------|---------|----------------------|----------|---------------|
| 1 | 25 | Медь | 50 | 50 |
| 2 | 50 | --" | 60 | 55 |
| 3 | 75 | --" | 75 | 60 |
| 4 | 100 | Алюминий | 80 | 65 |
| 5 | 150 | --" | 90 | 70 |
| 6 | 25 | --" | 55 | 75 |
| 7 | 50 | Сталь | 65 | 80 |
| 8 | 75 | --" | 70 | 85 |
| 9 | 100 | --" | 85 | 90 |
| 10 | 150 | Медь | 95 | 50 |
| 11 | 200 | --" | 55 | 55 |
| 12 | 250 | --" | 105 | 60 |
| 13 | 300 | Алюминий | 45 | 65 |
| 14 | 350 | --" | 110 | 70 |
| 15 | 400 | --" | 120 | 75 |
| 16 | 200 | Сталь | 85 | 80 |
| 17 | 250 | --" | 60 | 85 |
| 18 | 300 | --" | 95 | 90 |
| 19 | 350 | Медь | 50 | 70 |
| 20 | 410 | --" | 54 | 85 |
| 21 | 450 | --" | 80 | 80 |
| 22 | 500 | Алюминий | 95 | 85 |
| 23 | 550 | --" | 60 | 90 |
| 24 | 600 | --" | 78 | 70 |
| 25 | 650 | Сталь | 92 | 75 |
| 26 | 700 | --" | 66 | 80 |
| 27 | 750 | --" | 74 | 85 |
| 28 | 800 | Медь | 68 | 90 |
| 29 | 850 | --" | 96 | 80 |
| 30 | 900 | --" | 88 | 85 |

Расчет произвести для двух случаев:

- при протекании по шинопроводу постоянного тока I ;
- при протекании по шинопроводу переменного тока I промышленной частоты 50 Гц. Для определения коэффициента поверхностного эффекта воспользуйтесь таблицей и постройте соответствующий график.

Объяснить причину расхождения количества теплоты, выделяющейся в одном метре длины шинопровода распределительного устройства, при протекании по нему токов различной природы.

Задача 1.2

Определить количество теплоты, выделяющейся в магнитопроводе катушки индуктивности переменного тока, намотанной на замкнутый магнитопровод. По катушке с числом витков w протекает ток I промышленной частоты 50 Гц; размеры магнитопровода приведены на рис.1.1.

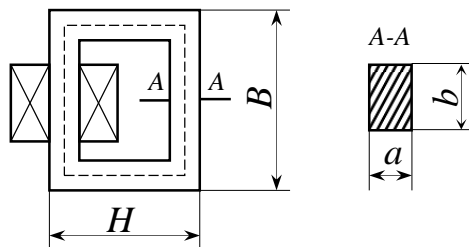


Рис. 1.1. Геометрические размеры магнитопровода

| № вар. | w | I, A | $a, мм$ | $b, мм$ | $B, мм$ | $H, мм$ |
|--------|-----|--------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | 500 | 0,25 | 10 | 20 | 100 | 50 |
| 2 | 600 | 0,5 | 12 | 25 | 110 | 55 |
| 3 | 700 | 0,75 | 15 | 10 | 120 | 60 |
| 4 | 800 | 0,1 | 11 | 15 | 130 | 65 |
| 5 | 900 | 0,15 | 16 | 20 | 140 | 70 |
| 6 | 550 | 0,25 | 18 | 25 | 150 | 75 |
| 7 | 650 | 0,5 | 14 | 30 | 100 | 80 |
| 8 | 730 | 0,75 | 20 | 35 | 110 | 85 |
| 9 | 870 | 1 | 22 | 40 | 120 | 90 |
| 10 | 370 | 1,5 | 12 | 45 | 130 | 50 |
| 11 | 420 | 1,6 | 10 | 50 | 140 | 55 |
| 12 | 290 | 1,25 | 9 | 10 | 150 | 60 |
| 13 | 310 | 1,3 | 11 | 15 | 100 | 65 |
| 14 | 580 | 1,35 | 13 | 20 | 110 | 70 |
| 15 | 600 | 1,4 | 14 | 25 | 120 | 75 |
| 16 | 770 | 2 | 16 | 30 | 130 | 80 |
| 17 | 820 | 2,5 | 18 | 35 | 140 | 85 |
| 18 | 340 | 3 | 20 | 40 | 150 | 90 |
| 19 | 250 | 3,5 | 11 | 45 | 100 | 50 |
| 20 | 210 | 3,25 | 7 | 48 | 115 | 78 |
| 21 | 280 | 0,45 | 13 | 10 | 120 | 60 |
| 22 | 330 | 0,5 | 14 | 15 | 130 | 65 |
| 23 | 350 | 0,55 | 18 | 20 | 140 | 70 |
| 24 | 470 | 0,6 | 20 | 25 | 150 | 75 |
| 25 | 690 | 0,65 | 17 | 30 | 100 | 80 |
| 26 | 580 | 0,7 | 19 | 35 | 110 | 85 |
| 27 | 810 | 0,75 | 22 | 40 | 120 | 90 |
| 28 | 210 | 0,8 | 21 | 45 | 130 | 70 |
| 29 | 150 | 0,85 | 14 | 50 | 140 | 75 |
| 30 | 450 | 0,9 | 21 | 35 | 150 | 80 |

Расчет произвести для двух случаев:

1. Магнитопровод изготовлен из сплошного бруска стали. При определении количества теплоты рассчитать возможный интервал ее изменения (в соответствии с применяемой эмпирической формулой).

2. Материал магнитопровода:

– для вариантов 1–10 шихтованный из горячекатаной трансформаторной листовой стали марки 1514; толщина листа для четных вариантов 0,35 мм, для нечетных – 0,5 мм;

– для вариантов 11–20 шихтованный из горячекатаной трансформаторной листовой стали марки 1412; толщина листа для четных вариантов 0,5 мм, для нечетных – 0,35 мм;

– для вариантов 21–30 шихтованный из горячекатаной трансформаторной листовой стали марки 1511; толщина листа для четных вариантов 0,35 мм, для нечетных – 0,5 мм;

Коэффициент заполнения поперечного сечения шихтованного магнитопровода принять равным 0,9.

Объяснить причину расхождения количества теплоты, выделяющейся в магнитопроводе катушки индуктивности переменного тока, намотанной на этот замкнутый магнитопровод, при различных способах изготовления магнитопровода.

Задача 1.3

Определить допустимую длительную величину постоянного тока для прямоугольной шины размерами $a \times b$, установленной на ребро, или круглого проводника с диаметром d в спокойном воздухе, если их допустимая температура равна $\theta_{\text{доп}}$, температура окружающей среды $\theta_0 = 35^\circ\text{C}$.

| № вар. | $\theta_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$ | $a, \text{мм}$ | $b, \text{мм}$ | $d, \text{мм}$ |
|--------|---------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 60 | 50 | 2 | — |
| 2 | 65 | 60 | 2,5 | — |
| 3 | 70 | 70 | 2,5 | — |
| 4 | 75 | 80 | 2,5 | — |
| 5 | 80 | 90 | 5 | — |
| 6 | 85 | 100 | 5 | — |
| 7 | 90 | 110 | 10 | — |
| 8 | 60 | 120 | 10 | — |
| 9 | 65 | 130 | 10 | — |
| 10 | 70 | 140 | 15 | — |
| 11 | 75 | 150 | 15 | — |
| 12 | 80 | — | — | 10 |
| 13 | 85 | — | — | 15 |
| 14 | 90 | — | — | 20 |
| 15 | 60 | — | — | 25 |
| 16 | 65 | — | — | 30 |
| 17 | 70 | — | — | 40 |
| 18 | 75 | — | — | 50 |
| 19 | 80 | 120 | 10 | — |
| 20 | 83 | 140 | 15 | — |
| 21 | 90 | 140 | 10 | — |
| 22 | 60 | 150 | 10 | — |
| 23 | 65 | 50 | 2,5 | — |
| 24 | 70 | 60 | 2,5 | — |
| 25 | 75 | 70 | 10 | — |
| 26 | 80 | 80 | 10 | — |
| 27 | 85 | — | — | 10 |
| 28 | 90 | — | — | 20 |
| 29 | 85 | — | — | 30 |
| 30 | 80 | — | — | 40 |

Материал шины:

- для вариантов 1 – 10 – медь;
- для вариантов 11 – 20 – алюминий;
- для вариантов 21 – 30 – сталь.

Примечание: при решении задачи исходить из равенства в длительном режиме работы выделяемой в проводнике теплоты и теплоты, отдаваемой в окружающую среду с его боковых поверхностей.

Задача 1.4

Написать уравнение кривой нагрева прямоугольного проводника (в табл. заданы размеры сечения ($a \times b$), большая сторона которого расположена вертикально) или круглого (в табл. задан диаметр d) проводника, по которому протекает постоянный ток. В начале процесса нагревания температура проводника и окружающего его спокойного воздуха одинакова и составляет 35°C . Значение удельного сопротивления материала проводника за время нарастания температуры принять неизменным.

| № вар. | I, A | Материал проводника | $a, \text{мм}$ | $b, \text{мм}$ | $d, \text{мм}$ |
|--------|---------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 205 | Алюминий | 50 | 20 | — |
| 2 | 150 | --" | 55 | 25 | — |
| 3 | 275 | --" | 75 | 23 | — |
| 4 | 300 | Медь | 80 | 21 | — |
| 5 | 250 | --" | 60 | 15 | — |
| 6 | 325 | --" | 85 | 35 | — |
| 7 | 450 | Алюминий | 30 | 10 | — |
| 8 | 375 | --" | 50 | 15 | — |
| 9 | 400 | --" | 70 | 18 | — |
| 10 | 350 | Сталь | 40 | 15 | — |
| 11 | 500 | --" | 30 | 10 | — |
| 12 | 630 | --" | — | — | 0,3 |
| 13 | 340 | Медь | — | — | 10 |
| 14 | 370 | --" | — | — | 40 |
| 15 | 420 | --" | — | — | 200 |
| 16 | 290 | Алюминий | — | — | 80 |
| 17 | 380 | --" | — | — | 10 |
| 18 | 320 | --" | — | — | 0,3 |
| 19 | 650 | Медь | 40 | 20 | — |
| 20 | 460 | --" | 38 | 17 | — |
| 21 | 250 | --" | 70 | 30 | — |
| 22 | 510 | Сталь | 57 | 19 | — |
| 23 | 390 | --" | 63 | 27 | — |
| 24 | 580 | --" | 55 | 25 | — |
| 25 | 450 | Медь | 60 | 25 | — |
| 26 | 770 | --" | 50 | 20 | — |
| 27 | 740 | --" | — | — | 200 |
| 28 | 195 | Алюминий | — | — | 10 |
| 29 | 320 | --" | — | — | 40 |
| 30 | 600 | --" | — | — | 80 |

Задача 1.5

Определить допустимую перегрузку по току и мощности, а также допустимое число включений в час катушки постоянного тока в повторно-кратковременном режиме нагрева, если время рабочего периода катушки t_p и по ней протекает ток $I_{пк}$. Катушка цилиндрическая, намотана прямоугольным (круглым) проводом, ее внутренний диаметр $D_{вн} = 70$ мм, наружный $D_{нар} = 140$ мм, высота катушки $h = 70$ мм. В начале процесса нагревания температура катушки и окружающего его спокойного воздуха одинакова и составляет 35°C .

| № вар. | t_p , сек | $I_{пк}$, А | Изоляция провода | w, витко в | Материал проводника | a, мм | b, мм | d, мм |
|-----------|----------------|-----------------|-----------------------------------|------------------|------------------------|----------|----------|----------|
| 1 | 150 | 20 | Бумажно-пропитанная | 500 | Медь | 50 | 20 | — |
| 2 | 200 | 10 | Бумажно-пропитанная под давлением | 450 | Алюминий | 55 | 25 | — |
| 3 | 120 | 25 | Поливинилхлоридный пластикат | 400 | Сталь | 75 | 23 | — |
| 4 | 80 | 30 | Полиэтилен | 350 | Медь | 80 | 21 | — |
| 5 | 250 | 25 | Лакотканевая | 300 | Алюминий | 60 | 15 | — |
| 6 | 125 | 32 | Волокнистая непропитанная | 250 | Сталь | 85 | 35 | — |
| 7 | 110 | 45 | Волокнистая пропитанная | 200 | Медь | 30 | 10 | — |
| 8 | 235 | 37 | Лакостойкая эмаль (масляная) | 150 | Алюминий | 50 | 15 | — |
| 9 | 155 | 40 | Высокопрочная эмаль | 100 | Сталь | 70 | 18 | — |
| 10 | 170 | 35 | Нагревостойкая эмаль | 125 | Медь | 40 | 15 | — |
| 11 | 95 | 33 | Асбестовая | 175 | Алюминий | 30 | 10 | — |
| 12 | 105 | 630 | Триацетатная пленка | 225 | Сталь | — | — | 0,3 |
| 13 | 180 | 34 | Фторлон-4 | 275 | Медь | — | — | 10 |
| 14 | 220 | 37 | Бумажно-пропитанная | 325 | Алюминий | — | — | 40 |
| 15 | 280 | 42 | Пластикат | 375 | Сталь | — | — | 200 |
| 16 | 300 | 29 | Полиэтилен | 425 | Медь | — | — | 80 |
| 17 | 245 | 38 | Лакотканевая | 475 | Алюминий | — | — | 10 |
| 18 | 165 | 32 | Высокопрочная эмаль | 525 | Сталь | — | — | 0,3 |
| 19 | 285 | 51 | Нагревостойкая эмаль | 575 | Медь | 40 | 20 | — |
| 20 | 185 | 53 | Асбестовая | 590 | Алюминий | 35 | 25 | — |
| 21 | 145 | 25 | Триацетатная пленка | 580 | Сталь | 70 | 30 | — |
| 22 | 230 | 51 | Фторлон-4 | 540 | Медь | 57 | 19 | — |
| 23 | 90 | 39 | Волокнистая непропитанная | 480 | Алюминий | 63 | 27 | — |
| 24 | 140 | 58 | Волокнистая пропитанная | 440 | Сталь | 55 | 25 | — |
| 25 | 160 | 45 | Лакостойкая эмаль (масляная) | 380 | Медь | 60 | 25 | — |
| 26 | 135 | 27 | Бумажно-пропитанная под давлением | 340 | Алюминий | 50 | 20 | — |
| 27 | 270 | 41 | Поливинилхлоридный пластикат | 280 | Сталь | — | — | 200 |
| 28 | 305 | 19 | Лакотканевая | 240 | Медь | — | — | 10 |
| 29 | 170 | 32 | Волокнистая непропитанная | 180 | Алюминий | — | — | 40 |
| 30 | 180 | 11 | Волокнистая пропитанная | 140 | Сталь | — | — | 80 |

Пример решения задач к разделу I

Задача 1.1

Определить количество теплоты, выделяющейся в одном метре длины шинопровода распределительного устройства.

Шинопровод имеет диаметр d и нагрет до температуры θ .

| № вар. | I, A | Материал шинопровода | $d, мм$ | $\theta, ^\circ C$ |
|--------|--------|----------------------|---------|--------------------|
| 31 | 400 | Медь | 45 | 75 |

Расчет произвести для двух случаев:

- при протекании по шинопроводу постоянного тока I ;
- при протекании по шинопроводу переменного тока I промышленной частоты $f = 50 Гц$.

Для определения коэффициента поверхностного эффекта воспользуйтесь таблицей и постройте соответствующий график.

Объяснить причину расхождения количества теплоты, выделяющейся в одном метре длины шинопровода распределительного устройства, при протекании по нему токов различной природы.

Решение

Мощность, выделяемая в однородном проводнике при прохождении через него тока I , определяется формулой

$$P = k_n \cdot k_6 \cdot I^2 \cdot \frac{\rho_0 \cdot (1 + \alpha \theta) \cdot l}{S},$$

где α – температурный коэффициент сопротивления, для меди

$$\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ } 1/^\circ C;$$

ρ_0 – удельное сопротивление материала проводника при температуре $0^\circ C$, для меди $\rho_0 = 1,62 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$;

θ – температура проводника, $\theta = 75^\circ C$;

l – длина проводника, $l = 1 \text{ м}$;

S – площадь поперечного сечения проводника,

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,045^2}{4} = 0,0016 \text{ м}^2;$$

k_n – коэффициент поверхностного эффекта;

k_6 – коэффициент эффекта близости.

Постоянный ток

Для постоянного тока принимаем коэффициенты $k_n = 1$ и $k_6 = 1$.

Вычислим сопротивление постоянному току одного метра медного шинопровода в нагретом состоянии:

$$R_0 = \frac{\rho_0(1 + \alpha\theta)l}{S} = \frac{1,62 \cdot 10^{-8}(1 + 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot 75)1}{0,0016} = 13,475 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

Вычислим мощность, выделяющуюся в медном шинопроводе, при протекании постоянного тока

$$P_0 = I^2 \cdot R_0 = 400^2 \cdot 13,475 \cdot 10^{-6} = 2,156 \text{ Вт.}$$

Переменный ток

Определим сопротивление нагретого медного шинопровода длиной $l = 100$ м:

$$R_{0,100} = \frac{1,62 \cdot 10^{-8}(1 + 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot 75)100}{0,0016} = 13,475 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

Определим частотный параметр поверхностного эффекта:

$$\sqrt{\frac{f}{R_{0,100}}},$$

где f — частота переменного тока, $f = 50$ Гц;

$R_{0,100}$ — активное сопротивление постоянному току нагретого шинопровода длиной 100 м, $R_{0,100} = 13,475 \cdot 10^{-4}$ Ом.

$$\sqrt{\frac{f}{R_{0,100}}} = \sqrt{\frac{50}{13,475 \cdot 10^{-4}}} = 192,6 \sqrt{\frac{\text{Гц}}{\text{Ом}}}.$$

Для определения коэффициента поверхностного эффекта построим график его зависимости от частотного параметра (рис. 1.2).

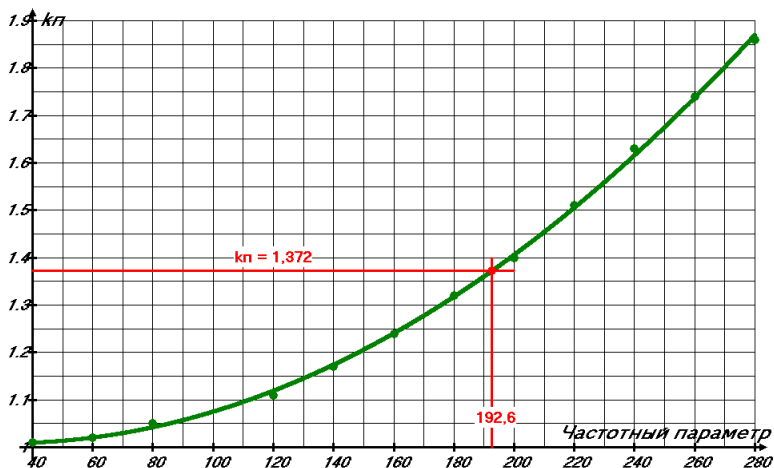


Рис. 1.2. График зависимости коэффициента поверхностного эффекта от частотного параметра

По этому графику найдём коэффициент поверхностного эффекта, $k_n = 1,372$.

Вычислим сопротивление переменному току одного метра медного шинопровода в нагретом состоянии:

$$R_{\theta, f} = k_n \cdot R_{\theta} = 1,372 \cdot 13,475 \cdot 10^{-6} = 18,487 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

Вычислим мощность, которая выделяется в медном шинопроводе, при протекании переменного тока:

$$P_{\theta, f} = k_n \cdot P_{\theta} = 1,372 \cdot 2,156 = 2,958 \text{ Вт.}$$

Вывод. При протекании тока в проводнике выделяется теплота, однако на переменном токе теплоты выделяется больше, чем при таком же постоянном токе, так как большая часть тока протекает по наружным слоям. То есть происходит неравномерное распределение переменного тока по сечению проводника, так что плотность тока будет возрастать от оси к поверхности проводника. Это явление называется поверхностным эффектом. Неравномерное распределение плотности тока приводит к увеличению сопротивления проводника. При стандартной частоте 50 Гц, небольшом сечении и медных проводах явление поверхностного эффекта сказывается слабо. При высокой частоте, большом сечении и железных проводах оно значительно.

Задача 1.2

Определить количество теплоты, выделяющейся в магнитопроводе катушки индуктивности переменного тока, намотанной на замкнутый магнитопровод.

По катушке с числом витков $w = 230$ протекает ток $I = 4$ А промышленной частоты $f = 50$ Гц.

Размеры магнитопровода приведены на рис. 1.3.

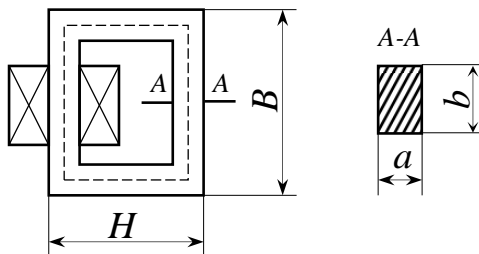


Рис. 1.3. Геометрические размеры магнитопровода

| № вар. | w | I , А | a , мм | b , мм | B , мм | H , мм |
|--------|-----|---------|----------|----------|----------|----------|
| 31 | 230 | 4 | 8 | 50 | 110 | 55 |

Расчет произвести для двух случаев:

1. Магнитопровод изготовлен из сплошного бруска стали. При определении количества теплоты рассчитать возможный интервал ее изменения (в соответствии с применяемой эмпирической формулой).

2. Магнитопровод шихтованный из горячекатаной трансформаторной листовой стали марки 1412; толщина листа 0,5 мм.

Коэффициент заполнения поперечного сечения шихтованного магнитопровода принять равным 0,9.

Объяснить причину расхождения количества теплоты, выделяющейся в магнитопроводе катушки индуктивности переменного тока, намотанной на этот замкнутый магнитопровод, при различных способах изготовления магнитопровода.

Решение

Определим мощность, выделяемую в замкнутом сплошном магнитопроводе, на который надета катушка, создающая переменное магнитное поле:

$$P = (2,9...3,25) \cdot 10^{-4} \left(\frac{Iw}{l_{cp}} \right)^{5/3} \cdot F \cdot \sqrt{f},$$

где w — число витков катушки, $w = 230$ витков;

l_{cp} — длина средней магнитной силовой линии,

$$l_{\text{ср}} = 2(H + B - 2 \cdot a) = 2(0,055 + 0,110 - 2 \cdot 0,008) = 0,298 \text{ м},$$

F – боковая поверхность магнитопровода,

$$F = 4(H + B - 2 \cdot a) \cdot (a + b),$$

$$F = 4(0,055 + 0,110 - 2 \cdot 0,008) \cdot (0,008 + 0,05) = 0,069136 \text{ м}^2.$$

Вычислим мощность, выделяемую в сплошном магнитопроводе:

$$P_{\text{с}} = (2,9...3,25) \cdot 10^{-4} \left(\frac{4 \cdot 230}{0,298} \right)^{5/3} \cdot 0,069136 \cdot \sqrt{50} = (656,2...735,4) \text{ Вт}.$$

Определим мощность, выделяемую в замкнутом шихтованном магнитопроводе, на который надета катушка, создающая переменное магнитное поле:

$$P = p_{\text{уд}} \cdot m,$$

где $p_{\text{уд}}$ – удельные потери, зависящие от материала, толщины листов и индукции, Вт/кг;

m – масса магнитопровода, кг.

Определим напряженность магнитного поля в магнитопроводе:

$$H = \frac{I \cdot w}{l_{\text{ср}}} = \frac{4 \cdot 230}{0,298} = 3087,2 \text{ А/м}.$$

Для горячекатаной стали 1412 при напряженности магнитного поля $H = 3087,2 \text{ А/м}$ магнитная индукция составляет не менее $B > 1,48 \text{ Тл}$.

При магнитной индукции $B = 1,50 \text{ Тл}$ удельные потери для горячекатаной стали 1412 составляют $p_{\text{уд}} = 3,8 \text{ Вт/кг}$.

Определим массу шихтованного магнитопровода:

$$m = k_3 \cdot a \cdot b \cdot l_{\text{ср}} \cdot \rho_{\text{ст}},$$

где $\rho_{\text{ст}}$ – удельная плотность электротехнической стали, $\rho_{\text{ст}} = 7,85 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

$$m = 0,9 \cdot 0,008 \cdot 0,050 \cdot 0,298 \cdot 7,85 \cdot 10^3 = 0,842 \text{ кг}.$$

Вычислим мощность, выделяемую в шихтованном магнитопроводе

$$P_{\text{ш}} = 3,8 \cdot 0,842 = 3,2.$$

Вывод. Количество теплоты, выделяющейся в сплошном магнитопроводе, находящемся в переменном магнитном поле, превосходит более чем в 200 раз количество теплоты, выделяющейся в шихтованном магнитопроводе, находящемся в таком же магнитном поле. Это обусловлено тем, что переменное магнитное поле индуцирует вихревые токи в проводящем материале магнитопровода. Поскольку магнитопровод из сплошного материала обладает малым электрическим сопротивлением в плоскости, перпендикулярной рабочему магнитному потоку, то вихревые токи достигают очень больших величин, и вся мощность этих токов уходит на нагревание магнитопровода. Для увеличения этого сопротивления магнитопровод выполняют шихтованным из листовых ферромагнитных

материалов. Это повышает электрическое сопротивление для вихревых токов и уменьшает потери мощности в магнитопроводах.

Задача 1.3

Определить допустимую длительную величину постоянного тока для прямоугольной шины размерами $a \times b$, установленной на ребро в спокойном воздухе, если её допустимая температура равна $\theta_{\text{доп}}$, температура окружающей среды $\theta_0 = 35^\circ\text{C}$.

| № вар. | $\theta_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$ | a , мм | b , мм |
|--------|---------------------------------------|----------|----------|
| 31 | 85 | 130 | 10 |

Материал шины – алюминий.

Примечание. При решении задачи исходить из равенства в длительном режиме работы выделяемой в проводнике теплоты и теплоты, отдаваемой в окружающую среду с его боковых поверхностей.

Решение

Определим допустимую мощность, отводимую с поверхности прямоугольной шины в окружающую среду в стационарном режиме:

$$P_{\text{доп}} = k_t \cdot S(\theta_{\text{доп}} - \theta_0),$$

где θ_0 – температура окружающей среды, $\theta_0 = 35^\circ\text{C}$;

$\theta_{\text{доп}}$ – допустимая температуры поверхности шины, $\theta_{\text{доп}} = 85^\circ\text{C}$;

S – поверхность теплоотдачи шины длиной $l = 1$ м,

$$S = 2 \cdot (a + b) \cdot l = 2 \cdot (0,130 + 0,010) \cdot 1 = 0,280 \text{ м}^2,$$

k_t – коэффициент теплоотдачи.

Для окрашенной краской шины прямоугольного сечения, находящейся в спокойном воздухе, большая сторона которой расположена вертикально

$$k_t = 9,2(1 + 0,9 \cdot 10^{-2}(\theta_{\text{доп}} - \theta_0)) = 9,2(1 + 0,9 \cdot 10^{-2} \cdot (85 - 35)) = 13,340 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{K})$$

Вычислим допустимую мощность, отводимую с шины:

$$P_{\text{доп}} = 13,340 \cdot 0,280 \cdot (85 - 35) = 186,760 \text{ Вт}.$$

Для определения допустимого тока для этой шины будем исходить из того, что на шине может выделяться мощность не более, чем эта шина может рассеивать, т.е.

$$P_{\text{выд}} \leq P_{\text{доп}}.$$

Для этого используем формулу из задачи 1.1, преобразовав её относительно тока:

$$I_{\text{доп}} \leq \sqrt{\frac{P_{\text{доп}} \cdot S_{\text{ш}}}{\rho_0 \cdot (1 + \alpha \theta_{\text{доп}}) \cdot l_{\text{ш}}}},$$

где α – температурный коэффициент сопротивления, для меди $\alpha = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$;

ρ_0 – удельное сопротивление материала проводника при температуре 0°C , для алюминия $\rho_0 = 2,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$;

$\theta_{\text{доп}}$ – допустимая температуры поверхности шины, $\theta_{\text{доп}} = 85^{\circ}\text{C}$;

$l_{\text{ш}}$ – длина шины, $l_{\text{ш}} = 1 \text{ м}$;

$S_{\text{ш}}$ – площадь поперечного сечения шины,

$$S = a \cdot b = 0,130 \cdot 0,010 = 0,0013 \text{ м}^2.$$

Вычислим допустимый ток шины:

$$I_{\text{доп}} \leq \sqrt{\frac{186,760 \cdot 0,0013}{2,8 \cdot 10^{-8} (1 + 4,2 \cdot 10^{-3} \cdot 85) 1}} = 2527,8 \text{ А}.$$

Задача 1.4

Написать уравнение кривой нагрева прямоугольного проводника, большая сторона которого расположена вертикально и по которому протекает постоянный ток.

В начале процесса нагревания температура проводника и окружающего его спокойного воздуха одинакова и составляет 35°C .

Значение удельного сопротивления материала проводника за время нарастания температуры принять неизменным.

| № вар. | I, A | Материал проводника | $a, \text{мм}$ | $b, \text{мм}$ |
|--------|---------------|---------------------|----------------|----------------|
| 31 | 470 | Медь | 30 | 15 |

Решение

Уравнение кривой нагрева токоведущей части электрического аппарата от времени в процессе нагрева имеет вид

$$\theta(t) = \theta_{\text{уст}} \cdot (1 - \exp(-t/T)) + \theta_{\text{нач}} \cdot \exp(-t/T),$$

где $\theta_{\text{нач}}$ – начальное значение температуры, $\theta_{\text{нач}} = 35^\circ\text{C}$;

$\theta_{\text{уст}}$ – установившееся значение температуры,

T – постоянная времени нагрева,

$$T = \frac{c}{k_t \cdot S},$$

где c – теплоемкость прямоугольного проводника длиной $l_{\text{пр}} = 1 \text{ м}$;

$$\theta_{\text{уст}} = \frac{P}{k_t \cdot S} + \theta_{\text{окр}},$$

где P – мощность источников теплоты при $\theta(t) = \theta_{\text{уст}}$;

$\theta_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, $\theta_{\text{окр}} = \theta_{\text{нач}} = 35^\circ\text{C}$;

S – поверхность теплоотдачи шины длиной $l_{\text{ш}} = 1 \text{ м}$,

$$S = 2(a + b) \cdot l_{\text{ш}} = 2(0,030 + 0,015)1 = 0,090 \text{ м}^2;$$

k_t – коэффициент теплоотдачи.

Для окрашенной краской прямоугольного проводника, находящегося в спокойном воздухе, большая сторона которого расположена вертикально

$$k_t = 9,2 \cdot (1 + 0,9 \cdot 10^{-2} \cdot (\theta_{\text{уст}} - \theta_{\text{окр}})).$$

Подставим известные величины и выполним преобразования:

$$k_t = 9,2 \cdot (1 + 0,9 \cdot 10^{-2} \cdot (\theta_{\text{уст}} - 35)),$$

$$k_T = 8,4382 + 0,0828 \cdot \theta_{уст}.$$

Определим мощность, выделяющуюся в проводнике при протекании тока:

$$P = I^2 \cdot \frac{\rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \theta_{окр}) \cdot l_{пр}}{a \cdot b},$$

где α – температурный коэффициент сопротивления, для меди $\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$;

ρ_0 – удельное сопротивление материала проводника при температуре 0°C , для меди $\rho_0 = 1,62 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$;

$\theta_{окр}$ – температура проводника в начальный момент времени, $\theta_{окр} = 35^{\circ}\text{C}$;

$l_{пр}$ – длина проводника, $l_{пр} = 1 \text{ м}$.

$$P = 470^2 \cdot \frac{1,62 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot 35) \cdot 1}{0,030 \cdot 0,015} = 9,149 \text{ Вт}.$$

Определим установившуюся температуру, используя формулу

$$\theta_{уст} = \frac{P}{k_T \cdot S} + \theta_{окр}.$$

Подставим известные данные и выполним преобразования:

$$\theta_{уст} = \frac{9,149}{(8,4382 + 0,0828 \cdot \theta_{уст}) \cdot 0,090} + 35,$$

$$\theta_{уст} = \frac{9,149}{0,7594 + 0,007452 \cdot \theta_{уст}} + 35,$$

$$0,007452 \cdot \theta_{уст}^2 + 0,4986 \cdot \theta_{уст} - 35,7280 = 0.$$

Решим это квадратное уравнение и получим его корни

$$\theta_{уст.1} = 43,45^{\circ}\text{C} \text{ и } \theta_{уст.2} = -110,35^{\circ}\text{C}.$$

Для данной задачи отрицательное значение установившейся температуры противоречит смыслу процесса нагревания, поэтому это значение игнорируем.

Определим коэффициент теплопередачи:

$$k_T = 8,4382 + 0,0828 \cdot \theta_{уст} = 8,4382 + 0,0828 \cdot 43,45 = 12,036 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{K}).$$

Определим теплоемкость прямоугольного проводника длиной $l_{\text{пр}} = 1$ м:

$$c = c_{\text{уд}} \cdot a \cdot b \cdot l_{\text{пр}} \cdot \gamma_{\text{уд}},$$

где $c_{\text{уд}}$ – удельная теплоёмкость меди, $c_{\text{уд}} = 381$ Дж/(кг·К);

$\gamma_{\text{уд}}$ – удельная плотность меди, $\gamma_{\text{уд}} = 8933$ кг/м³.

Вычислим теплоёмкость проводника:

$$c = 381 \cdot 0,030 \cdot 0,015 \cdot 1 \cdot 8933 = 1531,6 \text{ Дж/К.}$$

Определим постоянную времени нагрева:

$$T = \frac{c}{k_t \cdot S} = \frac{1531,6}{12,036 \cdot 0,090} = 1413,9 \text{ с} = 23,6 \text{ мин.}$$

Запишем уравнение кривой нагрева (рис. 1.4) медного проводника прямоугольного сечения:

$$\theta(t) = 44,45(1 - \exp(-t/1413,9)) + 35\exp(-t/1413,9)$$

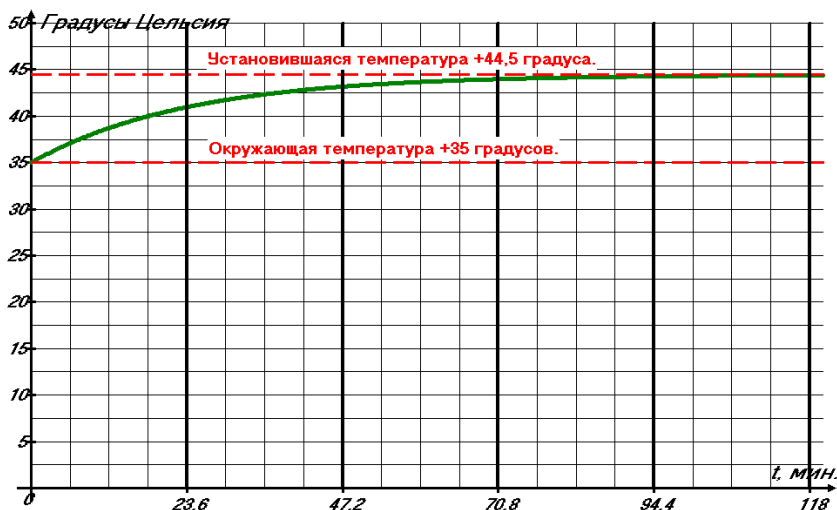


Рис. 1.4. Кривая нагрева медного проводника

Задача 1.5

Определить допустимую перегрузку по току и мощности, а также допустимое число включений в час катушки постоянного тока в повторно-кратковременном режиме нагрева, если время рабочего периода катушки t_p и по ней протекает ток $I_{пк}$.

Катушка цилиндрическая, намотана прямоугольным проводом, её внутренний диаметр $D_{вн} = 70$ мм, наружный $D_{нар} = 140$ мм, высота катушки $h = 70$ мм.

В начале процесса нагревания температура катушки и окружающего его спокойного воздуха одинакова и составляет $\theta_{окр} = 35^\circ\text{C}$.

| Вар. | $t_p, \text{с}$ | $I_{пк}, \text{А}$ | Изоляция провода | w , витков | Материал проводника | a , мм | b , мм |
|------|-----------------|--------------------|------------------|-----------------|------------------------|-------------|-------------|
| 31 | 85 | 47 | Асбестовая | 600 | Алюминий | 3,0 | 1,5 |

Решение

В качестве алюминиевого обмоточного провода прямоугольного сечения с асбестовой изоляцией применим провод типа АПБД $1,5 \times 3,0$.

Допустимая рабочая температура для такого провода $\theta_{окр} = 180^\circ\text{C}$.

С учётом изоляции его поперечные размеры: $a_{из} = 0,0035$ м; $b_{из} = 0,0020$ м.

Определим расположение витков обмотки на каркасе катушки (рис. 1.5)

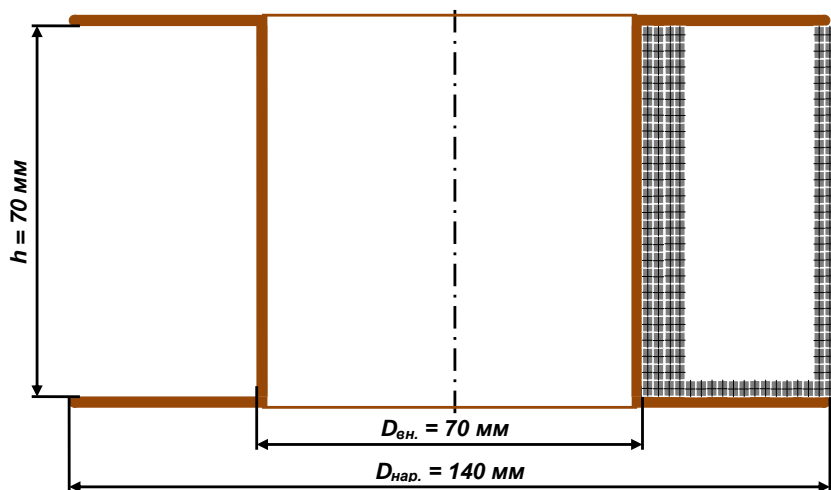


Рис. 1.5. Каркас с обмоткой

Определим количество витков на цилиндре каркаса в одном слое обмотки:

$$w_{\text{сл}} = \frac{h}{a_{\text{из}}} = \frac{0,070}{0,0035} = 20 \text{ витков/слой.}$$

Определим количество слоёв обмотки:

$$n_{\text{сл}} = \frac{w}{w_{\text{сл}}} = \frac{600}{20} = 30 \text{ слоев.}$$

Определим реальный наружный диаметр:

$$D_{\text{нар}} = D_{\text{вн}} + 2n_{\text{сл}} \cdot b_{\text{из}} = 0,070 + 2 \cdot 30 \cdot 0,002 = 0,190 \text{ м.}$$

Вычислим необходимую длину провода обмотки:

$$l_{\text{пр}} = n_{\text{сл}} \cdot \pi(D_{\text{вн}} + (n_{\text{сл}} + 1) \cdot b_{\text{из}}) \cdot w_{\text{сл}};$$

$$l_{\text{пр}} = 30\pi(0,070 + (30 + 1) \cdot 0,002)20 = 245,0 \text{ м.}$$

Вычислим сопротивление постоянному току обмотки катушки при допустимой рабочей температуре:

$$R_{\text{доп}} = \frac{\rho_0 \cdot (1 + \alpha \theta_{\text{доп}}) \cdot l_{\text{пр}}}{a \cdot b},$$

где α – температурный коэффициент сопротивления, для алюминия $\alpha = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$;

ρ_0 – удельное сопротивление материала проводника при температуре 0°C , для алюминия $\rho_0 = 2,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$;

$\theta_{\text{окр}}$ – температура катушки в начале процесса нагревания, $\theta_{\text{окр}} = 35^{\circ}\text{C}$.

$$R_{\text{доп}} = \frac{2,8 \cdot 10^{-8} (1 + 4,2 \cdot 10^{-3} \cdot 180) l}{0,0030 \cdot 0,0015} = 2,677 \text{ Ом.}$$

Вычислим площадь поверхности охлаждения катушки:

$$S = \pi(D_{\text{нар}} - D_{\text{вн}}) \cdot (0,05(D_{\text{нар}} + D_{\text{вн}}) + h);$$

$$S = \pi(0,190 - 0,070) \cdot (0,05(0,190 + 0,070) + 0,070) = 0,0754 \text{ м}^2.$$

Определим коэффициент теплоотдачи цилиндрической катушки с площадью охлаждения более $S > 0,01 \text{ м}^2$:

$$k_{\text{т}} = \frac{3,6(1 + 0,005(\theta_{\text{доп}} - \theta_{\text{окр}}))}{\sqrt[3]{S}} = \frac{3,6(1 + 0,005(180 - 35))}{\sqrt[3]{0,0754}} = 10,414 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{K}).$$

Вычислим мощность, отводимую с поверхности катушки в окружающую среду,

$$P = k_{\text{т}} \cdot S(\theta_{\text{доп}} - \theta_{\text{окр}}) = 10,414 \cdot 0,0754(180 - 35) = 113,857 \text{ Вт.}$$

Исходя из этого, определим длительно-допустимый ток катушки, при котором температура катушки не превысит допустимую температуру:

$$I_{\text{дл}} = \sqrt{\frac{P}{P_{\text{доп}}}} = \sqrt{\frac{113,857}{2,677}} = 6,522 \text{ А.}$$

Определим коэффициент перегрузки по току при повторно-кратковременном включении катушки:

$$k_I = \frac{I_{\text{пк}}}{I_{\text{дл}}} = \frac{47,0}{6,522} = 7,207.$$

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

$$T = \frac{c_{\text{уд}} \cdot \gamma_{\text{уд}} \cdot (a \cdot b \cdot l_{\text{пр}})}{k_t \cdot S},$$

где $c_{\text{уд}}$ – удельная теплоёмкость алюминия, $c_{\text{уд}} = 800 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;

$\gamma_{\text{уд}}$ – удельная плотность алюминия, $\gamma_{\text{уд}} = 2697 \text{ кг}/\text{м}^3$.

$$T = \frac{800 \cdot 2697 \cdot (0,0030 \cdot 0,0015 \cdot 245)}{10,414 \cdot 0,0754} = 3029,5 \text{ с.}$$

Коэффициент перегрузки по мощности при повторно-кратковременном процессе нагрева

$$k_P = \frac{P_{\text{пк}}}{P_{\text{дл}}} = \frac{I_{\text{пк}}^2 \cdot R_{\text{доп}}}{I_{\text{дл}}^2 \cdot R_{\text{доп}}} = \frac{I_{\text{пк}}^2}{I_{\text{дл}}^2} = k_I^2 = \frac{1 - e^{-t_n/T}}{1 - e^{-t_p/T}},$$

где $P_{\text{пк}}$ – мощность источников теплоты при повторно-кратковременном процессе нагрева электрического аппарата;

$P_{\text{дл}}$ – мощность источников теплоты при длительном процессе нагрева электрического аппарата;

t_p – время рабочего периода;

t_n – время рабочей паузы.

Решим это уравнение относительно неизвестного времени длительности цикла t_n :

$$t_n = -T \ln(1 - k_I^2 \cdot (1 - e^{-t_p/T})).$$

Вычислим время длительности цикла повторно-кратковременного включения:

$$t_n = -3029,5 \ln(1 - 7,207^2 \cdot (1 - e^{-85/3029,5})).$$

При данных параметрах это уравнение не имеет решения, так как не существует логарифм отрицательного числа.

Это вызвано очень большой перегрузкой по току ($k_I > 720 \%$). Обычно коэффициент перегрузки не превышает 200 %.

Раздел II. Электродинамические усилия в электрических аппаратах Основные расчетные формулы и соотношения

Формула Ампера для определения электродинамических усилий (ЭДУ), действующих на линейный проводник с током, находящийся в однородном магнитном поле:

$$F = I \cdot l \cdot B \cdot \sin \gamma,$$

где I – значение тока, А;

l – длина проводника, м;

B – магнитная индукция, Тл;

γ – угол между направлением тока и вектором индукции, рад.

Формула Ампера в векторном виде:

$$\vec{F} = I[\vec{l}, \vec{B}].$$

Закон Био-Савара-Лапласа:

$$dH = \frac{I \cdot dl \cdot \sin \alpha}{4 \cdot \pi \cdot r^2},$$

где dl – элементарный участок проводника, м;

α – угол между направлением тока и направлением радиус-вектора от середины участка dl до точки пространства, в которой определяется напряженность магнитного поля dH , рад;

r – длина радиус-вектора, м.

Закон Био-Савара – Лапласа в векторной форме:

$$dH = \frac{I}{4\pi \cdot r^2} \left[d\vec{l} \times \frac{\vec{r}}{r} \right].$$

Электродинамическое усилие между двумя проводниками, по которым протекают токи I_1 и I_2 :

$$F = \frac{\mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2}{4\pi} \cdot k_r,$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная;

k_r – геометрический коэффициент контура электродинамических усилий.

Задачи к разделу II

Определить направление и величину электродинамического усилия, действующего на проводник длины l_1 с постоянным током I_1 . Все необходимые для расчета величины и геометрические размеры заданы в таблице. В вариантах по рис. 2.1 – 2.3 по проводнику с длиной l_2 течет постоянный ток I_2 , вариантах по рис. 2.4 – 2.5 по проводнику с длиной l_2 течет постоянный ток I_1 . Направления токов задать произвольно.

| № вар. | I_1 , кА | I_2 , кА | l_1 , м | l_2 , м | l_3 , м | l_4 , м | a , м | r , см | α , град | № рис. |
|-----------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|-------------|--------------------|-----------|
| 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | — | — | 0,2 | — | — | 2.1 |
| 2 | 5 | 2 | 2 | 3 | 0,1 | 0,05 | — | — | — | 2.2 |
| 3 | 8 | 2 | 2 | 4 | — | — | 0,1 | — | — | 2.3 |
| 4 | 10 | — | 1 | 1 | — | — | — | 0,5 | — | 2.4 |
| 5 | 15 | — | 1 | 1 | — | — | 0,2 | — | 15 | 2.5 |
| 6 | 20 | 10 | 10 | 8 | — | — | 0,2 | — | — | 2.1 |
| 7 | 25 | 15 | 1 | 2 | 0,2 | 0,05 | — | — | — | 2.2 |
| 8 | 30 | 20 | 4 | 6 | — | — | 1 | — | — | 2.3 |
| 9 | 2 | — | 2 | 2 | — | — | — | 1 | — | 2.4 |
| 10 | 5 | — | 2 | 1 | — | — | 0,5 | — | 25 | 2.5 |
| 11 | 8 | 5 | 8 | 10 | — | — | 2 | — | — | 2.1 |
| 12 | 10 | 8 | 3 | 1 | 0,5 | 0,1 | — | — | — | 2.2 |
| 13 | 15 | 10 | 3 | 12 | — | — | 0,01 | — | — | 2.3 |
| 14 | 20 | — | 3 | 1 | — | — | — | 2 | — | 2.4 |
| 15 | 25 | — | 3 | 3 | — | — | 1 | — | 30 | 2.5 |
| 16 | 30 | 20 | 15 | 5 | — | — | 0,02 | — | — | 2.1 |
| 17 | 2 | 25 | 5 | 15 | 0,05 | 0,2 | — | — | — | 2.2 |
| 18 | 5 | 30 | 5 | 10 | — | — | 0,5 | — | — | 2.3 |
| 19 | 8 | — | 5 | 4 | — | — | — | 3 | — | 2.4 |
| 20 | 17 | — | 6 | 7 | — | — | 2,5 | — | 50 | 2.5 |
| 21 | 15 | 5 | 20 | 2 | — | — | 0,5 | — | — | 2.1 |
| 22 | 20 | 8 | 7 | 7 | 0,25 | 0,05 | — | — | — | 2.2 |
| 23 | 25 | 10 | 7 | 10 | — | — | 0,01 | — | — | 2.3 |
| 24 | 30 | — | 7 | 6 | — | — | — | 4 | — | 2.4 |
| 25 | 5 | — | 7 | 4 | — | — | 2 | — | 60 | 2.5 |
| 26 | 10 | 25 | 100 | 25 | — | — | 0,02 | — | — | 2.1 |
| 27 | 15 | 30 | 8 | 6 | 1 | 0,05 | — | — | — | 2.2 |
| 28 | 20 | 50 | 10 | 10 | — | — | 0,15 | — | — | 2.3 |
| 29 | 40 | — | 8 | 5 | — | — | — | 5 | — | 2.4 |
| 30 | 50 | — | 10 | 10 | — | — | 3 | — | 75 | 2.5 |

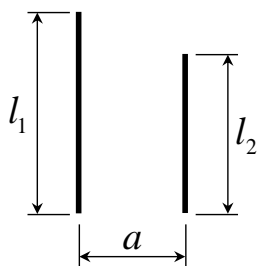


Рис. 2.1

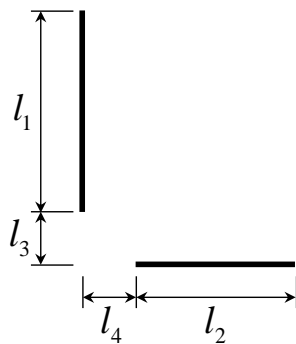


Рис. 2.2

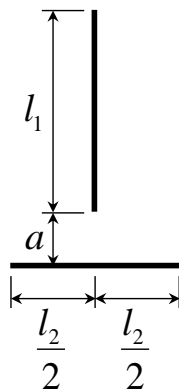


Рис. 2.3

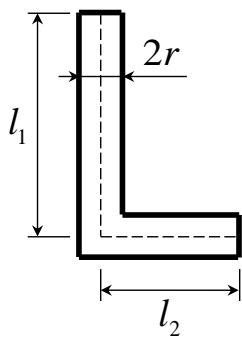


Рис. 2.4

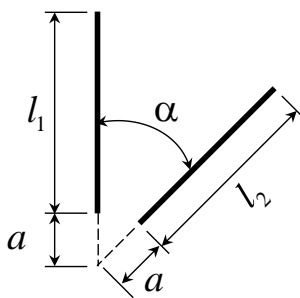


Рис. 2.5

Пример решения задач к разделу II

Задача 2.1

Определить направление и величину электродинамического усилия, действующего на проводник длины l_1 с постоянным током I_1 .

Направления токов на рис. 2.6 задать произвольно.

| № вар. | $I_1, \text{кА}$ | $I_2, \text{кА}$ | $l_1, \text{м}$ | $l_2, \text{м}$ | $a, \text{м}$ | $\alpha, \text{град}$ | № рис. |
|--------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------------|--------|
| 31 | 10 | - | 5 | 6 | 2 | 45 | 2.5 |

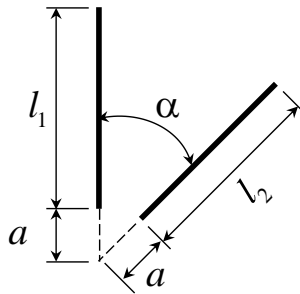


Рис. 2.6

Решение

Электродинамическое усилие между двумя проводниками, по которым протекают токи I_1 и I_2 , определяется по формуле:

$$F = \frac{\mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2}{4 \cdot \pi} \cdot k_r,$$

где μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$;

k_r – геометрический коэффициент контура электродинамических усилий.

Для определения геометрического коэффициента построим в масштабе геометрический контур взаимного расположения проводников конечной длины, расположенных в одной плоскости с углом между ними менее 90° (рис. 2.7).

Определим координаты концов проводников, точек A, B, C и D:

- $(\cdot)A(0; a) = (\cdot)A(0; 2,0)$;
- $(\cdot)B(0; a+l_1) = (\cdot)B(0; 7,0)$;
- $(\cdot)C(a \cdot \cos \alpha; a \cdot \sin \alpha) = (\cdot)C(\sqrt{2}; \sqrt{2})$;
- $(\cdot)D[(a+l_2) \cdot \cos \alpha; (a+l_2) \cdot \sin \alpha] = (\cdot)D(4 \cdot \sqrt{2}; 4 \cdot \sqrt{2})$.

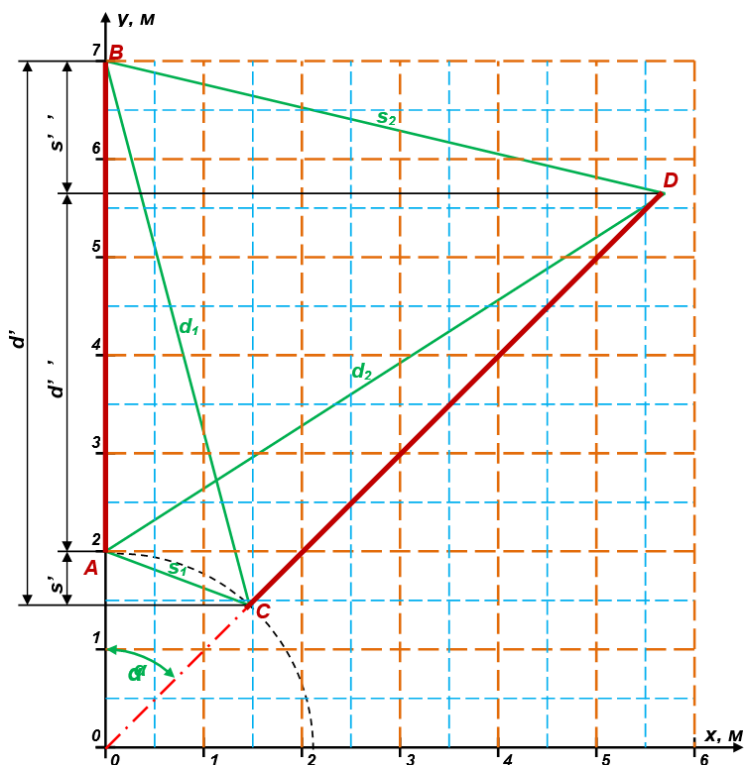


Рис. 2.7. Геометрический контур взаимного расположения проводников

Определим взаимные и смежные расстояния между концами проводников:

$$d_1 = l_{BC} = \sqrt{(y_B - y_C)^2 + (x_B - x_C)^2} = \sqrt{(7 - \sqrt{2})^2 + (0 - \sqrt{2})^2} = 5,762 \text{ м};$$

$$d_2 = l_{AD} = \sqrt{(y_D - y_A)^2 + (x_D - x_A)^2} = \sqrt{(4 \cdot \sqrt{2} - 2)^2 + (4 \cdot \sqrt{2} - 0)^2} = 6,736 \text{ м};$$

$$s_1 = l_{AC} = \sqrt{(y_A - y_C)^2 + (x_A - x_C)^2} = \sqrt{(2 - \sqrt{2})^2 + (0 - \sqrt{2})^2} = 1,531 \text{ м};$$

$$s_2 = l_{BD} = \sqrt{(y_B - y_D)^2 + (x_B - x_D)^2} = \sqrt{(7 - 4 \cdot \sqrt{2})^2 + (0 - 4 \cdot \sqrt{2})^2} = 5,814 \text{ м}.$$

Определим проекции этих расстояний на ось Y:

$$d' = y_B - y_C = 7 - \sqrt{2} = 5,586 \text{ м};$$

$$d'' = y_D - y_A = 4 \cdot \sqrt{2} - 2 = 3,657 \text{ м};$$

$$s' = y_A - y_C = 2 - \sqrt{2} = 0,586 \text{ м};$$

$$s'' = y_B - y_D = 7 - 4 \cdot \sqrt{2} = 1,343 \text{ м}.$$

Используя полученные геометрические данные, определим геометрический коэффициент контура электродинамических усилий для первого проводника:

$$k_r = \frac{1 + \cos \alpha}{\sin \alpha} \cdot \ln \left[\frac{(d_1 + d') \cdot (d_2 - d'')}{(s_1 + s') \cdot (s_2 + s'')} \right];$$

$$k_r = \frac{1 + \frac{1}{\sqrt{2}}}{\frac{1}{\sqrt{2}}} \cdot \ln \left[\frac{(5,762 + 5,586) \cdot (6,736 - 3,657)}{(1,531 + 0,586) \cdot (5,814 + 1,343)} \right] = 2,017.$$

Вычислим электродинамическое усилие между двумя проводниками:

$$F = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10^4 \cdot 10^4}{4 \cdot \pi} \cdot 2,017 = 20,17 \text{ Н.}$$

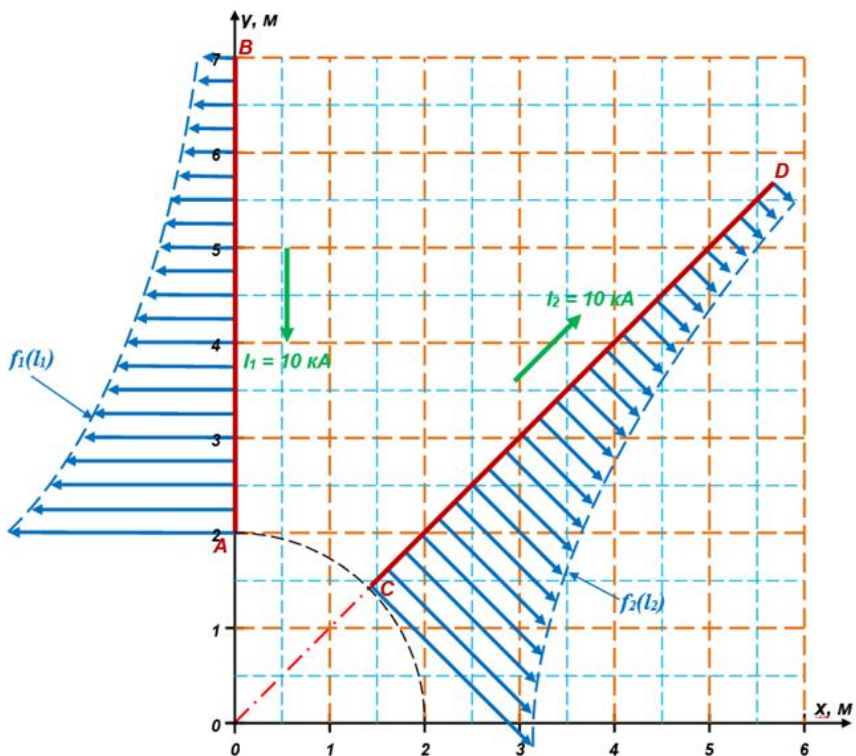


Рис. 2.8. Силы электродинамического взаимодействия

Определим направление действия электродинамических усилий. Между лежащими в одной плоскости двумя проводниками с токами возникают электродинамические усилия, лежащие также в этой плоскости.

Если токи в проводниках протекают в одном направлении, то эти усилия направлены на сближение (притягивание) проводников.

Если токи в проводниках протекают в противоположных направлениях, то эти усилия направлены на раздвижение (отталкивание) проводников.

Электромагнитная сила, действующая на участок проводника с током, действует перпендикулярно к направлению протекания тока на этом участке проводника (правило левой руки).

Величина этой электромагнитной силы изменяется обратно пропорционально расстоянию до оси проводника до точки приложения этой силы.

На основе этих утверждений построим качественную картину распределения электродинамических усилий, действующих между проводниками с током (рис. 2.8).

Раздел III. Электрические контакты аппаратов

Основные расчетные формулы и соотношения

Сопротивление стягивания одноточечного контакта при чистых контактных поверхностях:

$$R_c = \frac{\rho}{2 \cdot a},$$

где ρ – удельное сопротивление материала контактов, Ом·м;

a – радиус площадки касания, м.

Для круглых площадок касания в случае упругих деформаций радиус площадки касания

$$a = \sqrt[3]{\frac{\frac{3}{4} \cdot P \cdot \left(\frac{1 - \sigma_1^2}{E_1} + \frac{1 - \sigma_2^2}{E_2} \right)}{\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)}},$$

где P – контактное нажатие, Н;

$\sigma_1, \sigma_2, E_1, E_2$ – коэффициенты Пуассона и модули упругости материалов контактов;

r_1, r_2 – радиусы кривизны контактирующих поверхностей, м.

При контактировании шара с плоскостью, выполненных из одинаковых материалов при $\sigma = 0,3$ (для меди, железа и никеля)

$$a = 1,11 \cdot \sqrt[3]{\frac{P \cdot r}{E}}.$$

Для тех же условий при контактировании двух сферических поверхностей

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

В случае наличия пластических деформаций

$$a = \sqrt{\frac{P}{\pi \cdot \sigma_{см}}},$$

где $\sigma_{см}$ – напряжение смятия, Н/м².

Эмпирическая формула для контактного сопротивления

$$R_k = \frac{k}{P^m},$$

где k – коэффициент, зависящий от материала контактов;

P – контактное нажатие, кГ;

m – зависит от числа точек контактирования и вида контактного соединения.

$$k = k_{Cu} \frac{\rho \sqrt{\sigma}}{\rho_{Cu} \sqrt{\sigma_{Cu}}},$$

где $k_{Cu} = 2,3 \cdot 10^{-4}$, ρ_{Cu} , σ_{Cu} – коэффициент контактного сопротивления, удельное сопротивление и напряжение смятия для меди;

k , ρ , σ – те же величины для другого материала контактов.

Зависимость сопротивления контактов от температуры:

$$R_k = R_{k0} \cdot \left[1 + \frac{2}{3} \cdot \alpha \cdot (\theta_a - \theta_k) \right],$$

где R_{k0} – контактное сопротивление при температуре на границе области стягивания, Ом;

α – температурный коэффициент сопротивления материала контакта, K^{-1} ;

θ_a и θ_k – температуры контактов площадок и границы области стягивания, К.

Минимальный ток сваривания контактов

$$I_{св} = m \cdot a \cdot \sqrt{32\lambda \cdot \frac{\theta_{пл}}{\rho}},$$

где m – коэффициент, $m = 1,5..2$;

a – радиус площадки касания, м;

λ – коэффициент теплопроводности материала контактов, Вт/мК;

$\theta_{пл}$ – температура плавления материала контактов, $^{\circ}C$;

ρ – удельное сопротивление материала контактов, Ом·м.

Дуговой износ контактов в масле (для токов от 1 до 30 кА) определяется по формуле Пухера:

$$m = b \cdot I^{\alpha} \cdot t_d,$$

где m – масса изношенной части контакта, мг;

b, α – коэффициенты (для меди $b = 2,15$, $\alpha = 1,58$; для медно-вольфрамовой композиции $b = 0,39$, $\alpha = 1,81$);

t_d – время горения дуги, с.

Объемный дуговой износ на пару контактов

$$V = p \cdot I \cdot n \cdot t_d,$$

где V – износ контактов, $см^3$;

p – удельный износ, $см^3/(кА \cdot с)$;

I – действующее значение тока, кА;

n – число коммутаций тока;

t_d – время горения дуги, с.

Задачи к разделу III

3.1. Определить величину требуемого контактного нажатия мостикового контакта вспомогательной цепи контактора, если через контакты протекает ток, а все контакты изготовлены из накладок. Принять допустимое напряжение на контактах равным 0,1 напряжения размягчения.

| № вар. | Ток, А | Материал накладки контакта 1 | Материал накладки контакта 2 | Форма накладки контакта 1 | Форма накладки контакта 2 | Радиус контакта 1, мм | Радиус контакта 2, мм |
|--------|--------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 1 | Серебро | Медь | Плоскость | Сфера | | 3 |
| 2 | 2 | Золото | Никель | Сфера | Сфера | 4 | 4 |
| 3 | 3 | Медь | Цинк | Сфера | Плоскость | 6 | |
| 4 | 4 | Никель | Сталь | Сфера | Сфера | 8 | 9 |
| 5 | 5 | Цинк | Железо | Плоскость | Сфера | | 9 |
| 6 | 6 | Сталь | Сталь | Сфера | Сфера | 12 | 11 |
| 7 | 7 | Железо | Цинк | Сфера | Сфера | 14 | 12 |
| 8 | 8 | Сталь | Никель | Сфера | Плоскость | 16 | |
| 9 | 9 | Цинк | Медь | Сфера | Сфера | 13 | 15 |
| 10 | 10 | Никель | Золото | Плоскость | Сфера | | 11 |
| 11 | 11 | Медь | Серебро | Сфера | Сфера | 8 | 9 |
| 12 | 12 | Золото | Медь | Сфера | Сфера | 5 | 5 |
| 13 | 13 | Серебро | Никель | Сфера | Сфера | 9 | 11 |
| 14 | 14 | Цинк | Цинк | Сфера | Плоскость | 17 | |
| 15 | 15 | Медь | Сталь | Плоскость | Сфера | | 10 |
| 16 | 1,5 | Никель | Железо | Сфера | Сфера | 10 | 9 |
| 17 | 14 | Цинк | Сталь | Сфера | Сфера | 6 | 5 |
| 18 | 13 | Сталь | Цинк | Сфера | Сфера | 8 | 8 |
| 19 | 12 | Железо | Никель | Сфера | Сфера | 10 | 11 |
| 20 | 11 | Сталь | Медь | Плоскость | Сфера | | 4 |
| 21 | 10 | Цинк | Золото | Сфера | Сфера | 4 | 5 |
| 22 | 9 | Никель | Серебро | Сфера | Плоскость | 8 | |
| 23 | 8 | Медь | Золото | Сфера | Сфера | 5 | 4 |
| 24 | 7 | Золото | Медь | Сфера | Сфера | 9 | 12 |
| 25 | 6 | Серебро | Никель | Плоскость | Сфера | | 13 |
| 26 | 5 | Золото | Цинк | Сфера | Сфера | 18 | 16 |
| 27 | 4 | Медь | Сталь | Сфера | Плоскость | 8 | |
| 28 | 3 | Никель | Медь | Сфера | Сфера | 1 | 1,5 |
| 29 | 2 | Цинк | Золото | Сфера | Сфера | 7 | 8 |
| 30 | 1 | Сталь | Серебро | Плоскость | Сфера | | 11 |

3.2. Контакты реле изготовлены в виде напаяек, радиус кривизны задан в таблице. Определить значение сопротивления стягивания этих контактов, если сила контактного нажатия указана в таблице.

| № вар. | Сила контактного нажатия, Н | Материал накладки контакта 1 | Материал накладки контакта 2 | Форма накладки контакта 1 | Форма накладки контакта 2 | Радиус контакта 1, мм | Радиус контакта 2, мм |
|-----------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1 | 0,07 | Никель | Сталь | Сфера | Сфера | 1 | 1,5 |
| 2 | 0,06 | Цинк | Цинк | Сфера | Сфера | 7 | 8 |
| 3 | 0,05 | Сталь | Никель | Плоскость | Сфера | | 11 |
| 4 | 0,04 | Серебро | Медь | Плоскость | Сфера | | 3 |
| 5 | 0,03 | Золото | Золото | Сфера | Сфера | 4 | 4 |
| 6 | 0,02 | Медь | Серебро | Сфера | Плоскость | 6 | |
| 7 | 0,01 | Никель | Медь | Сфера | Сфера | 8 | 9 |
| 8 | 0,01 | Цинк | Никель | Плоскость | Сфера | | 9 |
| 9 | 0,02 | Сталь | Цинк | Сфера | Сфера | 12 | 11 |
| 10 | 0,03 | Железо | Сталь | Сфера | Сфера | 14 | 12 |
| 11 | 0,04 | Сталь | Железо | Сфера | Плоскость | 16 | |
| 12 | 0,05 | Цинк | Сталь | Сфера | Сфера | 13 | 15 |
| 13 | 0,06 | Никель | Цинк | Плоскость | Сфера | | 11 |
| 14 | 0,07 | Медь | Никель | Сфера | Сфера | 8 | 9 |
| 15 | 0,08 | Золото | Медь | Сфера | Сфера | 5 | 5 |
| 16 | 0,09 | Серебро | Золото | Сфера | Сфера | 9 | 11 |
| 17 | 0,1 | Цинк | Серебро | Сфера | Плоскость | 17 | |
| 18 | 0,11 | Медь | Золото | Плоскость | Сфера | | 10 |
| 19 | 0,12 | Никель | Медь | Сфера | Сфера | 10 | 9 |
| 20 | 0,17 | Цинк | Никель | Сфера | Сфера | 5 | 6 |
| 21 | 0,14 | Сталь | Цинк | Сфера | Сфера | 8 | 8 |
| 22 | 0,15 | Железо | Сталь | Сфера | Сфера | 10 | 11 |
| 23 | 0,015 | Сталь | Медь | Плоскость | Сфера | | 2 |
| 24 | 0,14 | Цинк | Золото | Сфера | Сфера | 4 | 5 |
| 25 | 0,13 | Никель | Серебро | Сфера | Плоскость | 8 | |
| 26 | 0,12 | Медь | Медь | Сфера | Сфера | 5 | 4 |
| 27 | 0,11 | Золото | Никель | Сфера | Сфера | 9 | 12 |
| 28 | 0,1 | Серебро | Цинк | Плоскость | Сфера | | 13 |
| 29 | 0,09 | Золото | Сталь | Сфера | Сфера | 18 | 16 |
| 30 | 0,08 | Медь | Железо | Сфера | Плоскость | 8 | |

3.3. Два стержня сжаты с силой. Сферические поверхности торцов имеют радиус. Определить, при каком постоянном токе эти контакты могут свариться.

| № вар. | Сила сжатия, Н | Материал стержня 1 | Материал стержня 2 | Диаметр стержня 1, мм | Диаметр стержня 2, мм | Радиус сферических поверхностей торцов, мм |
|--------|----------------|--------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|--|
| 1 | 150 | Никель | Сталь | 22 | 26 | 26 |
| 2 | 1400 | Цинк | Цинк | 24 | 22 | 22 |
| 3 | 1300 | Сталь | Никель | 16 | 14 | 14 |
| 4 | 1200 | Серебро | Медь | 16 | 18 | 18 |
| 5 | 1100 | Золото | Золото | 2 | 3 | 3 |
| 6 | 1000 | Медь | Серебро | 14 | 16 | 16 |
| 7 | 900 | Никель | Медь | 10 | 12 | 12 |
| 8 | 800 | Цинк | Никель | 12 | 6 | 6 |
| 9 | 700 | Сталь | Цинк | 8 | 8 | 8 |
| 10 | 600 | Железо | Сталь | 12 | 10 | 10 |
| 11 | 500 | Сталь | Железо | 16 | 18 | 18 |
| 12 | 400 | Цинк | Сталь | 20 | 18 | 18 |
| 13 | 300 | Никель | Цинк | 24 | 22 | 22 |
| 14 | 200 | Медь | Никель | 26 | 24 | 24 |
| 15 | 100 | Золото | Медь | 32 | 30 | 30 |
| 16 | 100 | Серебро | Золото | 26 | 27 | 27 |
| 17 | 200 | Цинк | Серебро | 22 | 22 | 22 |
| 18 | 300 | Медь | Золото | 16 | 18 | 18 |
| 19 | 400 | Никель | Медь | 10 | 10 | 10 |
| 20 | 550 | Цинк | Никель | 20 | 21 | 20 |
| 21 | 600 | Сталь | Цинк | 34 | 32 | 32 |
| 22 | 700 | Железо | Сталь | 30 | 29 | 29 |
| 23 | 800 | Сталь | Медь | 20 | 18 | 18 |
| 24 | 900 | Цинк | Золото | 12 | 10 | 10 |
| 25 | 1000 | Никель | Серебро | 16 | 16 | 16 |
| 26 | 1100 | Медь | Медь | 20 | 22 | 22 |
| 27 | 1200 | Золото | Никель | 12 | 4 | 4 |
| 28 | 1300 | Серебро | Цинк | 8 | 10 | 10 |
| 29 | 1400 | Золото | Сталь | 16 | 18 | 18 |
| 30 | 1500 | Медь | Железо | 10 | 8 | 8 |

3.4. Определить износ стержневого подвижного контакта маломасляного медного выключателя при отключении тока с длительностью горения дуги при одном отключении.

| № вар. | Ток, кА | Длительностью горения дуги, с |
|--------|---------|-------------------------------|
| 1 | 7 | 0,01 |
| 2 | 6 | 0,07 |
| 3 | 5 | 0,05 |
| 4 | 4 | 0,03 |
| 5 | 3 | 0,04 |
| 6 | 2 | 0,06 |
| 7 | 1 | 0,08 |
| 8 | 1 | 0,09 |
| 9 | 2 | 0,12 |
| 10 | 3 | 0,14 |
| 11 | 4 | 0,16 |
| 12 | 5 | 0,13 |
| 13 | 6 | 0,11 |
| 14 | 7 | 0,08 |
| 15 | 8 | 0,05 |
| 16 | 9 | 0,09 |
| 17 | 10 | 0,17 |
| 18 | 11 | 0,15 |
| 19 | 12 | 0,1 |
| 20 | 16 | 0,11 |
| 21 | 14 | 0,08 |
| 22 | 15 | 0,1 |
| 23 | 1,5 | 0,08 |
| 24 | 14 | 0,04 |
| 25 | 13 | 0,08 |
| 26 | 12 | 0,05 |
| 27 | 11 | 0,09 |
| 28 | 10 | 0,14 |
| 29 | 9 | 0,18 |
| 30 | 8 | 0,08 |

3.5. Оценить износ пары контактов при отключении тока и установить число допустимых отключений, если общий износ контактов 5 см^3 , длительность одной операции (с дугой) задана в таблице.

| № вар. | Ток, А | Материал контактов | Длительность одной операции (с дугой), с |
|--------|--------|--------------------|--|
| 1 | 14 | Серебро | 0,01 |
| 2 | 13 | Золото | 0,07 |
| 3 | 21 | Медь | 0,05 |
| 4 | 12 | Никель | 0,03 |
| 5 | 10 | Цинк | 0,04 |
| 6 | 21 | Сталь | 0,06 |
| 7 | 23 | Железо | 0,08 |
| 8 | 14 | Сталь | 0,09 |
| 9 | 25 | Цинк | 0,012 |
| 10 | 16 | Никель | 0,014 |
| 11 | 17 | Медь | 0,016 |
| 12 | 18 | Золото | 0,013 |
| 13 | 19 | Серебро | 0,011 |
| 14 | 10 | Цинк | 0,08 |
| 15 | 11 | Медь | 0,05 |
| 16 | 12 | Никель | 0,09 |
| 17 | 13 | Цинк | 0,017 |
| 18 | 14 | Сталь | 0,015 |
| 19 | 15 | Железо | 0,01 |
| 20 | 18 | Сталь | 0,05 |
| 21 | 14 | Цинк | 0,08 |
| 22 | 13 | Никель | 0,01 |
| 23 | 12 | Медь | 0,08 |
| 24 | 11 | Золото | 0,04 |
| 25 | 10 | Серебро | 0,08 |
| 26 | 19 | Золото | 0,05 |
| 27 | 18 | Медь | 0,09 |
| 28 | 17 | Никель | 0,014 |
| 29 | 16 | Цинк | 0,018 |
| 30 | 15 | Сталь | 0,08 |

Пример решения задач к разделу III

Задача 3.1

Определить величину требуемого контактного нажатия мостикового контакта вспомогательной цепи контактора, если через контакты протекает ток, а все контакты изготовлены из накладок. Принять допустимое напряжение на контактах равным 0,1 напряжения размягчения.

| № вар. | Ток, А | Материал накладки контакта 1 | Материал накладки контакта 2 | Форма накладки контакта 1 | Форма накладки контакта 2 | Радиус контакта 1, мм | Радиус контакта 2, мм |
|--------|--------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 31 | 11 | Сталь | Медь | Плоскость | Сфера | – | 2 |

Решение

Справочное напряжение размягчения:

– для меди $U_{p.m} = 0,12$ В;

– для стали $U_{p.ст} = 0,21$ В.

Поскольку напряжение размягчения для меди меньше, чем для стали, величину требуемого контактного нажатия будем определять по свойствам меди.

Определим допустимую величину напряжения на однотоочечном контакте:

$$U_k = 0,1U_{p.m} = 0,1 \cdot 0,12 = 0,012 \text{ В.}$$

Определим допустимое сопротивление стягивания однотоочечного контакта:

$$R_c \leq \frac{U_k}{I} = \frac{0,012}{11,0} = 0,0011 \text{ Ом.}$$

Определим радиус площадки касания контакта:

$$a = \frac{\rho_0}{2R_c},$$

где ρ_0 – удельное сопротивление материала контактов, Ом м, $\rho_0 = 1,62 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

$$a = \frac{1,62 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 0,0011} = 7,425 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

При соприкосновении пары контактов сферической формы и плоской формы создаётся площадка касания контакта радиуса a , который можно определить по формуле

$$a = 1,11 \cdot \sqrt[3]{\frac{P_1 \cdot r}{E}},$$

где P_1 – контактное нажатие на односточный контакт;

E – модуль упругости материала контактов, для меди $E = 12,3 \cdot 10^{10}$ Па;

r – радиус сферического контакта, $r = 2 \cdot 10^{-3}$ м.

После преобразования этой формулы можем определить величину требуемого нажатия на односточный контакт:

$$P_1 = \frac{a^3 \cdot E}{1,0354 \cdot r} = \frac{(7,425 \cdot 10^{-6})^3 \cdot 12,3 \cdot 10^{10}}{1,0354 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} = 0,0184 \text{ Н.}$$

Определим величину требуемого контактного нажатия мостикового контакта:

$$P = 2P_1 = 2 \cdot 0,0184 = 0,0368 \text{ Н.}$$

Задача 3.2

Контакты реле изготовлены в виде напаек, радиус кривизны задан в таблице. Определить значение сопротивления стягивания этих контактов, если сила контактного нажатия известна.

| № вар. | Сила контактного нажатия, Н | Материал накладки контакта 1 | Материал накладки контакта 2 | Форма накладки контакта 1 | Форма накладки контакта 2 | Радиус контакта 1, мм | Радиус контакта 2, мм |
|--------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 31 | 0,13 | Цинк | Никель | Сфера | Сфера | 6 | 5 |

Решение

Определим радиус площадки касания пары контактов "сфера–сфера":

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

где P – контактное нажатие на одноточечный контакт, $P = 0,13$ Н;

E – модуль упругости материала контактов:

– для цинка $E_1 = 9,4 \cdot 10^{10}$ Па;

– для никеля $E_2 = 20,5 \cdot 10^{10}$ Па;

r – радиус сферического контакта:

– $r_1 = 6 \cdot 10^{-3}$ м;

– $r_2 = 5 \cdot 10^{-3}$ м.

Вычислим радиус площадки касания для каждого сферического контакта:

$$a_1 = 0,86 \cdot \sqrt[3]{\frac{P \cdot r_1}{E_1}} = 0,86 \cdot \sqrt[3]{\frac{0,13 \cdot 6 \cdot 10^{-3}}{9,4 \cdot 10^{10}}} = 0,0174 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$a_2 = 0,86 \cdot \sqrt[3]{\frac{P \cdot r_2}{E_2}} = 0,86 \cdot \sqrt[3]{\frac{0,13 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{20,5 \cdot 10^{10}}} = 0,0126 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Определим значение сопротивления стягивания для каждого сферического контакта:

$$R_c = \frac{\rho}{2 \cdot a},$$

где ρ – удельное сопротивление материала контактов:

– для цинка $\rho_1 = 5,9 \cdot 10^{-8}$ Ом·м;

– для никеля $\rho_2 = 8,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

Вычислим значение сопротивления стягивания со стороны каждого контакта:

$$R_{c1} = \frac{\rho_1}{2 \cdot a_1} = \frac{5,9 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 0,0174 \cdot 10^{-3}} = 1,694 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$$

$$R_{c2} = \frac{\rho_2}{2 \cdot a_2} = \frac{8,7 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 0,0126 \cdot 10^{-3}} = 3,452 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}.$$

Значение сопротивления стягивания этой пары соединенных последовательно между собой контактов из разнородных материалов определим как сумму двух сопротивлений:

$$R_c = R_{c1} + R_{c2} = 1,694 \cdot 10^{-3} + 3,452 \cdot 10^{-3} = 5,146 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Задача 3.3

Два стержня сжаты с силой $P = 500$ Н. Сферические поверхности торцов имеют радиус, указанный в таблице.

Определить при каком постоянном токе эти контакты могут свариться.

| № вар. | Материал стержня 1 | Материал стержня 2 | Диаметр стержня 1, мм | Диаметр стержня 2, мм | Радиус сферических поверхностей торцов, мм |
|--------|--------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|--|
| 31 | цинк | никель | 18 | 19 | 19 |

Решение

Минимальный ток сваривания контактов:

$$I_{св} = m \cdot a \cdot \sqrt{32 \cdot \lambda \cdot \frac{\theta_{пл}}{\rho}},$$

- где m – коэффициент, $m = 1,5 \dots 2,0$;
 a – радиус площадки касания;
 λ – коэффициент теплопроводности материала контактов:
 – для цинка $\lambda_1 = 116 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$;
 – для никеля $\lambda_2 = 91 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$;
 $\theta_{пл}$ – температура плавления материала контактов:
 – для цинка $\theta_{пл1} = 419^\circ \text{C}$;
 – для никеля $\theta_{пл2} = 1455^\circ \text{C}$;
 ρ – удельное сопротивление материала контактов:
 – для цинка $\rho_1 = 5,9 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$;
 – для никеля $\rho_1 = 8,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Определим радиус площадки касания контактов сферической формы

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

- где P – контактное нажатие на однотоочный контакт, $P = 500$ Н;
 E – модуль упругости материала контактов:
 – для цинка $E_1 = 9,4 \cdot 10^{10} \text{ Па}$;
 – для никеля $E_2 = 20,5 \cdot 10^{10} \text{ Па}$;
 r – радиус сферического контакта:
 – $r_1 = 19 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;
 – $r_2 = 19 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Вычислим радиус площадки касания для каждого сферического контакта:

$$a_1 = 0,86 \cdot \sqrt[3]{\frac{P \cdot r_1}{E_1}} = 0,86 \cdot \sqrt[3]{\frac{500 \cdot 19 \cdot 10^{-3}}{9,4 \cdot 10^{10}}} = 0,401 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$a_2 = 0,86 \cdot \sqrt[3]{\frac{P \cdot r_2}{E_2}} = 0,86 \cdot \sqrt[3]{\frac{500 \cdot 19 \cdot 10^{-3}}{20,5 \cdot 10^{10}}} = 0,309 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Вычислим минимальный ток сваривания контактов стержней:

– из цинка:

$$I_{св1} = m \cdot a_1 \cdot \sqrt{32 \cdot \lambda_1 \cdot \frac{\theta_{пл1}}{\rho_1}} = 1,5 \cdot 0,401 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{32 \cdot 116 \cdot \frac{419}{5,9 \cdot 10^{-8}}} = 3088,3 \text{ А};$$

– из никеля:

$$I_{св2} = m \cdot a_2 \cdot \sqrt{32 \cdot \lambda_2 \cdot \frac{\theta_{пл2}}{\rho_2}} = 1,5 \cdot 0,309 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{32 \cdot 91 \cdot \frac{1455}{8,7 \cdot 10^{-8}}} = 3234,6 \text{ А}.$$

Контакты из цинка и никеля, выполненные в виде двух стержней с торцами в виде полусфер, могут свариться при минимальном из двух определенных постоянных токов сваривания, а именно при протекании по обоим стержням тока величиной $I_{св} = 3088,3 \text{ А}$.

Задача 3.4

Определить износ стержневого подвижного контакта маломасляного медного выключателя при отключении заданного тока с указанной длительностью горения дуги при одном отключении.

| № вар. | Ток, кА | Длительность горения дуги, с |
|--------|---------|------------------------------|
| 31 | 13 | 0,06 |

Решение

Относительная дугостойкость контактов из различных металлов оценивается по диаграмме (рис. 3.1), построенной по результатам опытов с короткой дугой (0,8 мм) при токе 12 кА и продолжительностью его протекания 0,0085 с.

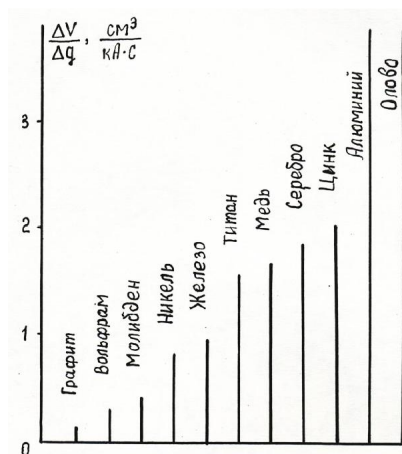


Рис. 3.1. Диаграмма соотношения объёма испарившегося металла к количеству прошедшего через дугу электричества

Для цинка из этой диаграммы соотношение объёма испарившегося металла к количеству прошедшего через дугу электричества определяется как

$$\frac{V}{I \cdot t_d} = 1,6 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/(\text{А} \cdot \text{с}).$$

Отсюда определим объём испарившегося металла:

$$V = 1,6 \cdot 10^{-9} \cdot I \cdot t_d = 1,6 \cdot 10^{-9} \cdot 13 \cdot 10^3 \cdot 0,06 = 1,248 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Дуговой износ контактов в масле (для токов от 1 до 30 кА):

$$m = b \cdot I^\alpha \cdot t_d$$

где m — масса изношенной части контакта;

I — ток дуги между контактами, $I = 13 \cdot 10^3 \text{ А}$;

b – коэффициент, для меди $b = 2,15$;

α – коэффициент, для меди $\alpha = 1,58$;

t_d – длительность горения дуги, $t_d = 0,06$ с.

$$m = 2,15(13 \cdot 10^3)^{1,58} 0,06 = 407962,5 \text{ мг.}$$

Задача 3.5

Оценить износ пары контактов при отключении тока и установить число допустимых отключений, если общий износ контактов $V = 5 \text{ см}^3$, длительность одной операции (с дугой) $t_d = 0,06$ с.

| № вар. | Ток, А | Материал контактов |
|--------|--------|--------------------|
| 31 | 16 | Сталь |

Решение

Объемный дуговой износ на пару контактов:

$$V = p \cdot I \cdot n \cdot t_d,$$

где V – износ контактов, $V = 5 \text{ см}^3$;

p – удельный износ, $p = 1 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3/(\text{А} \cdot \text{с})$;

I – действующее значение тока, $I = 16 \text{ А}$;

n – число коммутаций тока;

t_d – время горения дуги, $t_d = 0,06$ с.

Установим число допустимых отключений:

$$n = \frac{V}{p \cdot I \cdot t_d} = \frac{5}{1 \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot 0,06} = 5208.$$

Раздел IV. Алгебра логики

Основные расчетные формулы и соотношения

Математической основой цифровой электроники и вычислительной техники является алгебра логики, или булева алгебра (по имени английского математика **Джорджа Буля** (1815–1864 гг.).

В булевой алгебре независимые переменные или аргументы (X) принимают только два значения: 0 или 1. Зависимые переменные или функции (Y) также могут принимать только одно из двух значений: 0 или 1.

Функция алгебры логики представляется в виде:

$$Y = F(X_1; X_2; X_3 \dots X_N).$$

Логические операции булевой алгебры *подобны арифметическим операциям элементарной алгебры*. Если последние применяются к числам, то первые – к логическим значениям соответствующих высказываний. Составные высказывания можно получать с помощью логических операций так же, как в элементарной алгебре формулы. И если известны значения исходных высказываний, значение составного высказывания можно вычислить, прибегая лишь к формальным правилам. Уравнения, составленные в алгебре логики, можно формально решать.

Все это обеспечивает широкие возможности по применению математического аппарата к суждениям из реальной жизни.

Основными логическими операциями являются:

- логическое отрицание (инверсия):

$$Y = X' = \sim X = \underline{X} = !X$$

- логическое сложение (дизъюнкция):

$$Y = X_1 + X_2 \text{ или } Y = X_1 \vee X_2$$

- логическое умножение (конъюнкция):

$$Y = X_1 \bullet X_2 \text{ или } Y = X_1 \wedge X_2 \text{ или } Y = X_1 \& X_2$$

К более сложным функциям алгебры логики относятся:

- функция равнозначности (эквивалентности):

$$Y = X_1 \bullet X_2 + X_1' \bullet X_2' \text{ или } Y = X_1 \sim X_2$$

- функция неравнозначности (сложение по модулю два):

$$Y = X_1 \bullet X_2' + X_1' \bullet X_2 \text{ или } Y = X_1 \oplus X_2$$

- функция Пирса (логическое сложение с отрицанием):

$$Y = (X_1 + X_2)'$$

- функция Шеффера (логическое умножение с отрицанием):

$$Y = (X_1 \bullet X_2)'$$

Понятие функциональной полноты набора логических элементов

Набор логических элементов, достаточный для построения любой сколь угодно сложной логической схемы, называется функционально полным.

Функционально полным является набор элементов И, ИЛИ, НЕ. Из этого набора можно исключить некоторые элементы без нарушения функциональной полноты. В частности, функционально-полным считается набор из двух элементов И и НЕ. В этом случае для выполнения операции ИЛИ двух переменных просто по уравнению строится схема на трех элементах НЕ и одном элементе И.

Аналогично функционально полным является набор из элементов ИЛИ и элементов НЕ.

Свойство функциональной полноты используется при разработке и реализации многовыходовых логических схем, так как реальные элементы интегральных схем выполняют или функцию И-НЕ (схемы транзисторно-транзисторной логики и КМОП технологии), или функцию ИЛИ-НЕ (схемы и МОП, и КМОП технологии). С помощью логических элементов ИЛИ-НЕ или И-НЕ можно собрать любую логическую схему. На таких элементах собран микропроцессор компьютера и другие логические устройства.

Законы алгебры логики, определяющие набор эквивалентных формул:

Законы коммутативности

$$\begin{aligned}x \&y &= y \&x \\ x \vee y &= y \vee x\end{aligned}$$

Законы ассоциативности

$$\begin{aligned}(x \&y) \&z &= x \&(y \&z) \\ (x \vee y) \vee z &= x \vee (y \vee z)\end{aligned}$$

Законы поглощения

$$\begin{aligned}x \vee 0 &= x \\ x \&1 &= x\end{aligned}$$

Законы дистрибутивности

$$\begin{aligned}x \&(y \vee z) &= (x \&y) \vee (x \&z) \\ x \vee (y \&z) &= (x \vee y) \&(x \vee z)\end{aligned}$$

Закон противоречия

$$x \& \bar{x} = 0$$

Закон исключения третьего

$$x \vee \bar{x} = 1$$

Закон равносильности

$$\begin{aligned}x \&x &= x \\ x \vee x &= x\end{aligned}$$

Закон двойного отрицания

$$\overline{\overline{x}} = x$$

Законы де Моргана

$$\begin{aligned}\overline{x \& y} &= \bar{x} \vee \bar{y} \\ \overline{x \vee y} &= \bar{x} \& \bar{y}\end{aligned}$$

Законы поглощения

$$\begin{aligned}x \vee (x \&y) &= x \\ x \&(x \vee y) &= x\end{aligned}$$

Все перечисленные законы элементарно доказываются составлением таблиц истинности.

Задачи к разделу IV

Задача 4.1

В приведенной на рис. 4.1 схеме определить логические величины на выходах y_1 , y_2 , y_3 . Логические значения входных величин заданы в таблице.

| № вар. | Логические значения входных величин | | | | | | | |
|--------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | x_5 | x_6 | x_7 | x_8 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 3 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 4 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 6 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 8 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 9 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 10 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 11 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 12 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 14 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 15 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 16 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 17 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 18 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 19 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 20 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 21 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 22 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 23 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 24 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 25 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 26 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 27 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 28 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 29 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 30 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |

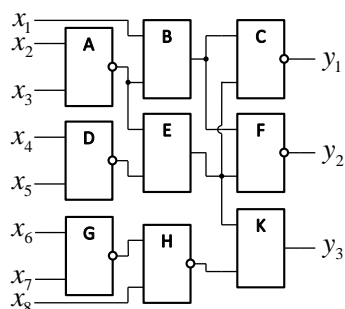


Рис. 4.1. Схема соединения логических элементов

| № вар. | Обозначение логических элементов | | | | | | | | |
|-----------|----------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E | F | G | H | K |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | & | & | & | 1 | & |
| 2 | 1 | 1 | 1 | & | 1 | & | & | & | & |
| 3 | 1 | 1 | 1 | & | & | 1 | 1 | & | & |
| 4 | 1 | 1 | & | 1 | 1 | 1 | & | & | & |
| 5 | 1 | 1 | & | 1 | & | & | & | 1 | & |
| 6 | 1 | 1 | & | & | 1 | & | 1 | & | & |
| 7 | 1 | 1 | & | & | 1 | & | & | 1 | & |
| 8 | 1 | 1 | & | & | & | & | 1 | 1 | & |
| 9 | 1 | & | 1 | 1 | & | 1 | & | & | 1 |
| 10 | 1 | & | 1 | 1 | & | & | 1 | & | 1 |
| 11 | 1 | & | 1 | & | 1 | 1 | & | & | 1 |
| 12 | 1 | & | 1 | & | 1 | & | & | 1 | & |
| 13 | 1 | & | 1 | & | & | 1 | & | & | 1 |
| 14 | 1 | & | & | 1 | & | 1 | 1 | & | 1 |
| 15 | 1 | & | & | 1 | & | & | 1 | 1 | & |
| 16 | 1 | & | & | & | 1 | 1 | & | 1 | 1 |
| 17 | 1 | & | & | & | & | 1 | 1 | & | 1 |
| 18 | & | 1 | 1 | & | 1 | 1 | & | & | 1 |
| 19 | & | 1 | 1 | & | 1 | & | 1 | & | & |
| 20 | & | 1 | & | 1 | & | 1 | & | & | 1 |
| 21 | & | 1 | 1 | & | & | & | 1 | 1 | 1 |
| 22 | & | 1 | & | 1 | & | 1 | 1 | 1 | & |
| 23 | & | 1 | & | 1 | & | 1 | & | 1 | 1 |
| 24 | & | 1 | & | 1 | & | & | 1 | 1 | 1 |
| 25 | & | 1 | & | 1 | & | & | 1 | & | 1 |
| 26 | & | 1 | & | & | 1 | 1 | 1 | 1 | & |
| 27 | & | 1 | & | & | & | & | 1 | 1 | 1 |
| 28 | & | & | 1 | 1 | & | 1 | & | & | 1 |
| 29 | & | & | & | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | & |
| 30 | & | & | & | & | 1 | 1 | & | 1 | 1 |

Задача 4.2

По представленным ниже логическим функциям построить схему и составить таблицу истинности в двух вариантах:

- с использованием элементов И-НЕ;
- с использованием элементов ИЛИ-НЕ.

| № вар. | Логическая функция |
|--------|---|
| 1 | $\overline{x + y \cdot x \cdot (x + y + z)} + \overline{y}$ |
| 2 | $x \cdot (\overline{x} + y) + \overline{z} \cdot \overline{x} \cdot \overline{y} + x \cdot z$ |
| 3 | $\overline{x} + (\overline{x} \cdot y) + z \cdot \overline{x + y}$ |
| 4 | $\overline{x + z \cdot (x + y)} + \overline{x \cdot y + y \cdot z}$ |
| 5 | $\overline{x \cdot y \cdot z(x + y)} + \overline{x \cdot y \cdot z}$ |
| 6 | $\overline{x \cdot z \cdot (x + y)} + \overline{x + y + x \cdot z}$ |
| 7 | $x \cdot y(\overline{x + y}) + \overline{x + z(x + y)}$ |
| 8 | $x \cdot z + (\overline{x} \cdot y) + \overline{y \cdot z + (x \cdot y)}$ |
| 9 | $x(y + \overline{z}) + y(\overline{x} + z)$ |
| 10 | $x + (y \cdot \overline{z}) + y + (\overline{x} \cdot z)$ |
| 11 | $(x + y)\overline{z} + y(\overline{x} \cdot z)$ |
| 12 | $x + (y + \overline{z}) + y \cdot (\overline{x} + z) + \overline{z}$ |
| 13 | $\overline{x \cdot y \cdot x \cdot y + x + z \cdot y}$ |
| 14 | $x \cdot \overline{y} + \overline{z \cdot x \cdot z \cdot y}$ |
| 15 | $(x + y)\overline{x + z + (y + z)x \cdot y}$ |
| 16 | $\overline{x \cdot y \cdot x \cdot z + y \cdot z \cdot x + y}$ |
| 17 | $x(\overline{z} + y) + \overline{z \cdot x \cdot y} + x \cdot y$ |
| 18 | $\overline{x \cdot z + (\overline{x} \cdot y)} + \overline{z \cdot x + z}$ |
| 19 | $\overline{x + y(x + z) + z \cdot y + y \cdot x}$ |
| 20 | $\overline{x + y \cdot z + (\overline{x} + y) + \overline{x \cdot y + z}}$ |
| 21 | $\overline{x + z(x + y) + \overline{x \cdot y + x \cdot z}}$ |
| 22 | $\overline{\overline{x} \cdot y + (\overline{x} + y) \cdot x + z \cdot (x + y)}$ |
| 23 | $x(\overline{x \cdot y}) + y \cdot \overline{z(x \cdot y)}$ |
| 24 | $x \cdot (\overline{y} + \overline{z}) + \overline{y \cdot (\overline{x} + z)}$ |
| 25 | $x(y \cdot \overline{z}) + y \cdot \overline{x \cdot z + (\overline{x} \cdot z)}$ |
| 26 | $\overline{x \cdot (y + z) + y \cdot (\overline{x} \cdot z) + \overline{x \cdot y \cdot z}}$ |
| 27 | $(y + \overline{z}) + y(\overline{x} + z) + \overline{z \cdot x}$ |
| 28 | $\overline{x \cdot y + x \cdot \overline{y} + \overline{x + z \cdot y}}$ |
| 29 | $\overline{x \cdot y + z + x \cdot z + y}$ |
| 30 | $(x + y) \cdot \overline{x \cdot z + (y + z) \cdot x + y}$ |

Задача 4.3

Изобразить условные обозначения логических схем И, И-НЕ, ИЛИ, ИЛИ-НЕ, НЕ и составить таблицы истинности для них.

Задача 4.4

Построить схему ЗАПРЕТ, в которой логическая единица проходит со входа на выход схемы только в том случае, когда на дополнительный запрещающий вход не подается логическая единица с помощью логических элементов:

- И, ИЛИ, НЕ;
- И-НЕ;
- ИЛИ-НЕ.

Пример решения задач к разделу IV

Задача 4.1

В схеме (см. рис. 4.1) определить логические величины на выходах y_1 , y_2 , y_3 . Логические значения входных величин заданы в таблице.

| № вар. | Логические значения входных величин | | | | | | | |
|-----------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | x_5 | x_6 | x_7 | x_8 |
| 31 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |

| № вар. | Обозначение логических элементов | | | | | | | | |
|-----------|----------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E | F | G | H | K |
| 31 | & | 1 | 1 | & | & | 1 | & | 1 | & |

Решение

Построим логическую схему согласно данным для варианта № 31 (рис. 4.2). Промежуточные логические величины обозначим буквой **z** с буквенным индексом

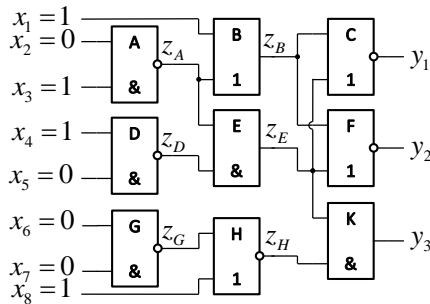


Рис. 4.2. Логическая схема

Пошагово определим промежуточные значения логических величин:

– 1-й ряд логических элементов:

$$z_A = \overline{x_2 \cdot x_3} = \overline{0 \cdot 1} = 1,$$

$$z_D = \overline{x_4 \cdot x_5} = \overline{1 \cdot 0} = 1,$$

$$z_G = \overline{x_6 \cdot x_7} = \overline{0 \cdot 0} = 1.$$

– 2-й ряд логических элементов:

$$z_B = x_1 + z_A = 1 + 1 = 1,$$

$$z_E = z_A \cdot z_D = 1 \cdot 1 = 1,$$

$$z_H = \overline{z_G + x_8} = \overline{1 + 1} = 0.$$

– 3-й ряд логических элементов:

$$y_1 = \overline{z_B + z_E} = \overline{1 + 1} = 0,$$

$$y_2 = \overline{z_B + z_E} = \overline{1 + 1} = 0,$$

$$y_3 = z_E \cdot z_H = 1 \cdot 0 = 0.$$

Задача 4.2

По представленной ниже логической функции составить таблицу истинности и построить схему в двух вариантах:

- с использованием логических элементов **И-НЕ**;
- с использованием логических элементов **ИЛИ-НЕ**.

| № вар. | Логическая функция |
|--------|---|
| 31 | $u = x + y \cdot z \cdot (x + y) + x \cdot y + z$ |

Решение

Составим таблицу истинности по логической функции u

| № | Входные величины | | | Промежуточные величины | | | | | | Выход | |
|---|------------------|-----|-----|------------------------------|---------------|-------|-----------------------------|---------|-------|-----------------|--|
| | | | | $u_1 = x + y \cdot z(x + y)$ | | | $u_2 = \bar{x} \cdot y + z$ | | | $u = u_1 + u_2$ | |
| | x | y | z | $\bar{x} + y$ | $\bar{x} + y$ | u_1 | \bar{x} | $y + z$ | u_2 | u | |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | |
| 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | |
| 4 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 5 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | |
| 6 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 7 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |

Проанализируем состояние входных величин, при которых логическая функция $u = 1$.

Если бы в состоянии №2 логическая функция имела состояние $u = 0$, то логическую функцию можно было бы записать: $u' = \bar{x}$. Теперь добавим исключённое состояние №2 по функции ИЛИ: $u'' = x \cdot y \cdot \bar{z}$.

На основании этого можем записать логическую функцию u :

$$u = u' + u'' = \bar{x} + x \cdot y \cdot \bar{z}.$$

Выполним преобразование этой функции:

$$u = \bar{x} + x \cdot y \cdot \bar{z} = \bar{x} \cdot \bar{x} + x \cdot y \cdot \bar{z} = \bar{x} \cdot \bar{x} \cdot y \cdot \bar{z} = \bar{x} \cdot x \cdot y \cdot \bar{z}.$$

На основании этого выражения можно построить логическую схему с использованием элементов И-НЕ (рис. 4.3)

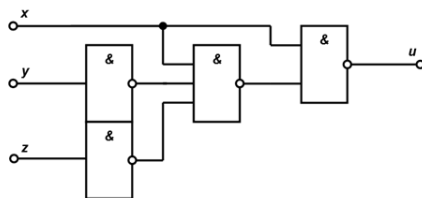


Рис. 4.3. Логическая схема на основе И-НЕ

Выполним второе преобразование полученной логической функции:

[illegible]

На основании этого выражения можно построить логическую схему с использованием элементов **ИЛИ-НЕ** (рис. 4.4).

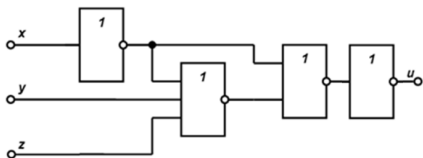


Рис. 4.4. Логическая схема на основе ИЛИ-НЕ

Задача 4.3

Изобразить условные графические обозначения логических элементов И, И-НЕ, ИЛИ, ИЛИ-НЕ, НЕ и составить таблицы истинности для них.

Решение

1. Запишем логическую функцию "И" на три входа, 3-И:

$$y = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$$

Изобразим условное обозначение логического элемента 3-И (рис. 4.5)

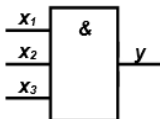


Рис. 4.5. Логический элемент 3-И

Составим таблицу истинности для логического элемента **3-И**.

| № | x1 | x2 | x3 | y |
|---|----|----|----|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 3 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 5 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 6 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 7 | 1 | 1 | 1 | 1 |

2. Запишем логическую функцию И-НЕ на три входа, 3-И-НЕ

$$y = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot$$

Изобразим условное обозначение логического элемента 3-И-НЕ (рис. 4.6).

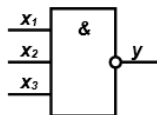


Рис. 4.6. Логический элемент 3-И-НЕ

Составим таблицу истинности для элемента 3-И-НЕ.

| № | x1 | x2 | x3 | y |
|---|----|----|----|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 2 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 3 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 4 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 5 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 6 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 7 | 1 | 1 | 1 | 0 |

3. Запишем логическую функцию ИЛИ на три входа, 3-ИЛИ:

$$y = x_1 + x_2 + x_3.$$

Изобразим условное обозначение логического элемента 3-ИЛИ (рис. 4.7).

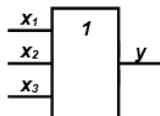


Рис. 4.7. Логический элемент 3-ИЛИ

Составим таблицу истинности для элемента 3-ИЛИ.

| № | x1 | x2 | x3 | y |
|---|----|----|----|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 2 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 3 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 4 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 5 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 6 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 7 | 1 | 1 | 1 | 1 |

4. Запишем логическую функцию ИЛИ-НЕ на три входа, 3-ИЛИ-НЕ:

$$y = x_1 + x_2 + x_3.$$

Изобразим условное обозначение логического элемента 3-ИЛИ-НЕ (рис. 4.8).

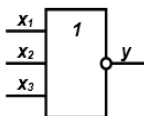


Рис. 4.8. Логический элемент 3-ИЛИ-НЕ

Составим таблицу истинности для элемента 3-ИЛИ-НЕ.

| № | x1 | x2 | x3 | y |
|---|----|----|----|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 3 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 5 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 6 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 7 | 1 | 1 | 1 | 0 |

5. Запишем логическую функцию НЕ:

$$y = \bar{x}.$$

Изобразим условное обозначение логического элемента НЕ (рис. 4.9).

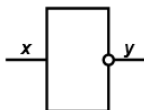


Рис. 4.9. Логический элемент НЕ

Составим таблицу истинности для элемента НЕ.

| № | x | y |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 |

Задача 4.4

Построить схему **ЗАПРЕТ**, в которой логическая единица проходит со входа на выход схемы только в том случае, когда на дополнительный запрещающий вход не подается логическая единица с помощью логических элементов:

- И, ИЛИ, НЕ;
- И-НЕ;
- ИЛИ-НЕ.

Решение

Составим таблицу истинности согласно заданному алгоритму работы устройства.

| Вход | Управление | Выход |
|------|------------|-------|
| x | z | y |
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 0 |

Составим логическую функцию, соответствующую этой таблице истинности:

$$y = x \cdot \bar{z}.$$

Выполним преобразование этой функции, используя правило де Моргана,

$$y = x \cdot \bar{z} = \overline{\overline{x + z}} = \overline{x + z}.$$

Составим схемы с помощью логических элементов:

- И, ИЛИ, НЕ;

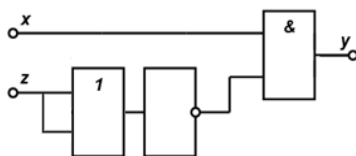


Рис. 4.10. Логическая схема на базе И, ИЛИ и НЕ

- И-НЕ;

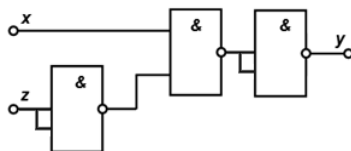


Рис. 4.11. Логическая схема на базе И-НЕ

- ИЛИ-НЕ;

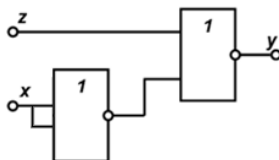


Рис. 4.12. Логическая схема на базе ИЛИ-НЕ

Раздел V Изучение релейно-контакторной схемы управления и защит асинхронного короткозамкнутого двигателя

Основные расчетные формулы и соотношения

Номинальная полную мощность двигателя:

$$S_n = \frac{P_n}{\eta \cdot \cos \varphi \cdot k_E},$$

где P_n – номинальная мощность двигателя (мощность на валу), Вт;

η – КПД двигателя, о.е.;

k_E – коэффициент, учитывающий число пар полюсов асинхронного двигателя, о.е.

Номинальный ток двигателя, А:

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} \text{ или } I_n \approx \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos \varphi_n},$$

где S_n – полная потребляемая мощность электродвигателем, ВА;

P_1 – активная потребляемая мощность электродвигателем, Вт;

U_n – номинальное линейное напряжение сети, В;

$\cos \varphi_n$ – коэффициент мощности, номинальный косинус угла сдвига фаз;

η – коэффициент полезного действия при номинальном моменте на валу двигателя.

Пусковой ток двигателя, А:

$$I_n = k_I \cdot I_n = \frac{I_n}{I_n} \cdot I_n,$$

где k_I – кратность пускового тока двигателя, $k_I = \frac{I_n}{I_n}$, $k_I = 5..8$.

Активное сопротивление обмотки ротора, Ом:

$$R_p = \frac{U_p \cdot s_n}{\sqrt{3} \cdot I_p}.$$

Ударный пусковой ток двигателя (амплитудное значение), А:

$$I_{удп} = (1,2...1,4) \cdot \sqrt{2} \cdot I_n.$$

Выбор сечения кабелей низкого напряжения, соединяющих электродвигатель с питающим трансформатором, производится по номинальному напряжению и току, учитывая, что длительно допустимый ток кабеля должен быть на 20 % больше номинального тока линии.

Определение сопротивления кабелей. Для расчета сопротивлений кабелей для выбранного сечения кабеля находят удельное активное сопротивление $r_{уд}$ (мОм/м) и удельное реактивное сопротивление $x_{уд}$ (мОм/м).

Сопротивление кабеля:

$$r_k = r_{уд} \cdot l_k; x_k = x_{уд} \cdot l_k,$$

где l_k – длина соединительного кабеля, м.

Суммарные сопротивления составляют:

– активное: $r_{кз} = r_t + r_k + r_{пк}$, Ом,

– реактивное: $x_{кз} = x_c + x_t + r_k$, Ом,

где r_t и x_t – соответственно активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности питающего трансформатора, Ом; x_c – приведенное индуктивное сопротивление энергосистемы (находим из заданного соотношения x_c/x_t), Ом; $r_{пк}$ – переходное сопротивление контактов в местах соединения. Активным сопротивлением системы пренебрегаем.

Модуль полного сопротивления до точки КЗ составит:

$$z_{кз} = \sqrt{r_{кз}^2 + x_{кз}^2}, \text{ Ом.}$$

Определение токов короткого замыкания (КЗ) в месте установки двигателя:

– ток трехфазного КЗ находится как

$$I_{кз}^{(3)} = \frac{U_n}{\sqrt{3}Z}, \text{ А;}$$

– ток двухфазного КЗ $I_{кз}^{(2)} = \frac{U_n}{2Z}$, А;

– ток однофазного КЗ в том же месте $I_{кз}^{(1)} = \frac{\sqrt{3}U_n}{\sqrt{(2x_1 + x_0)^2 + (2r_1 + r_0)^2}}$, А,

где r_1 и x_1 – соответственно активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности трансформатора, Ом, ($r_1 = r_t$ и $x_1 = x_t$); а r_0 и x_0 находятся как

$$r_0 = r_{0т} + r_{0к} + 3 \cdot r_{н.п} \text{ и } x_0 = x_{0т} + x_{0к} + 3 \cdot x_{н.п},$$

где $r_{0т}$ и $x_{0т}$ – соответственно активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности трансформатора, Ом; $r_{0к}$ и $x_{0к}$ – активное и индуктивное сопротивления кабелей, Ом ($r_{0к} = r_k$ и $x_{0к} = x_k$); $r_{н.п}$ и $x_{н.п}$ – активное и индуктивное сопротивления нулевого проводника, Ом (находится так же, как и сопротивление кабеля).

Необходимо рассчитать токи трех-, двух- и однофазного КЗ в месте установки двигателя, а также токи трехфазного КЗ на зажимах вышестоящих выключателей и трансформатора.

Определение ударного тока КЗ из соотношения: $I_{уд.кз} = k_{уд} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{кз}^{(3)}$, А,

где $k_{уд}$ – ударный коэффициент, зависящий от отношения $(X_t + X_k)/(R_t + R_k)$ и определяемый по кривым изменения ударного коэффициента (ГОСТ 28249-89).

Проверка условия нормального пуска двигателя:

– в условиях легкого пуска двигателя (длительность пуска не превышает 0,5 , 5с) $I_{\text{кз}}^{(3)} / I_{\text{п}} \geq 2$;

– в условиях тяжелого пуска двигателя (длительность пуска свыше 5 с) $I_{\text{кз}}^{(3)} / I_{\text{п}} \geq 3,5$;

где $I_{\text{кз}}^{(3)}$ – ток трехфазного КЗ на зажимах в двигателя.

Выбор электрических аппаратов управления и защиты электродвигателя

1. Выбор автоматических выключателей проводится по следующим параметрам:

а) по роду тока силовой цепи;

б) номинальному напряжению выключателя (номинальное напряжение выключателя должно быть не менее номинального напряжения нагрузки);

в) числу главных контактов;

г) типу расцепителя (в зависимости от схемы управления выбирается выключатель с электромагнитным (ЭМ) расцепителем или с ЭМ и тепловым (Т) расцепителями);

д) номинальному току расцепителя (ток расцепителя должен удовлетворять условию: $I_{\text{н.расц}} < I_{\text{н.нагр}} < 2 \cdot I_{\text{н.расц}}$);

е) току $I_{\text{сраб.о}}$ уставки срабатывания ЭМ расцепителя (ток уставки ЭМ расцепителя должен удовлетворять условию: $(1,1..1,2) I_{\text{уд.п}} < I_{\text{уст}} < I_{\text{кз}}^{(1)}$;

ж) предельной коммутационной способности (ПКС) (для ПКС должно удовлетворяться условию $I_{\text{кз}}^{(3)} < \text{ПКС}$);

и) времени $t_{\text{сраб}}$ срабатывания теплового расцепителя (для нормального пуска двигателя должно выполняться неравенство $t_{\text{п}} < t_{\text{сраб}} < 1,5 t_{\text{п}}$);

Выбираются выключатели без дополнительных расцепителей, свободных контактов и дополнительных механизмов, стационарного исполнения, с передним присоединением.

Проверить селективность работы выбранных автоматов и графически подтвердить соблюдение условий селективной работы. Для этого привести на одном графике время, токовые характеристики автоматов и пусковую характеристику двигателя.

2. Выбор магнитного пускателя или контактора проводится по следующим параметрам:

а) по роду тока силовой цепи;

б) номинальному напряжению пускателя (номинальное напряжение пускателя должно быть не менее номинального напряжения нагрузки);

в) числу главных контактов;

г) категории применения пускателя (категория применения определяется схемой управления двигателя);

д) номинальному рабочему току (для правильно выбранного пускателя $I_{\text{п}} < I_{\text{о}}$);

е) по тому, реверсивный или нет (определяется схемой управления двигателя);

ж) наличие теплового реле (определяется схемой управления двигателя);

з) степени защиты.

3. Выбор максимально-токовых реле производится по следующим условиям:

а) по номинальному напряжению реле (номинальное напряжение реле должно быть не менее номинального напряжения нагрузки);

б) числу полюсов;

в) номинальному току реле (номинальный ток реле не должен быть ниже номинального тока двигателя);

г) времени срабатывания реле (время срабатывания $t_{сраб}$ реле должно удовлетворять условию: $t_n < t_{сраб} < 1,5t_n$).

Способ соединения обмоток реле выбирается из условия реализации заданных номинального тока и тока уставки реле.

Если выбран пускатель со встроенным тепловым реле, то по рекомендованному в каталоге на пускатель типу реле уточняется номинальный ток нагревательного элемента $I_{н.нагр}$ и по характеристикам проверяется время срабатывания $t_{сраб}$ теплового реле ($t_n < t_{сраб} < 1,5t_n$).

4. Предохранитель для защиты двигателя выбирается по следующим условиям:

а) по номинальному напряжению (номинальное напряжение предохранителей должно быть не менее номинального напряжения нагрузки);

б) номинальному току плавкой вставки $I_{н.вст}$ ($I_{н.вст}$ меньше или равен номинальному току предохранителя и зависит от условий пуска двигателя).

Для короткозамкнутых асинхронных двигателей:

– при небольшой частоте включения и легких условиях пуска двигателя в течение $t_n = (2..10)$ номинальный ток вставки определяется из условия $I_{н.вст} < 0,4I_n$;

– при тяжелых условиях пуска в течение $t_n > 10$ с и при повторно-кратковременном режиме с ПВ%, 40%-ный номинальный ток вставки определяется из условия $I_{н.вст} < (0,5..0,6)I_n$.

Для надежного перегорания плавких вставок требуется, чтобы при КЗ на жимах двигателя соблюдалось условие: $\frac{I_{кз}^{(3)}}{I_{н.вст}} < 3..4$.

Для защиты цепей управления аппаратов предохранитель выбирается из условия: $I_{н.вст} < 1,25 \cdot I_n$, где I_n – наибольший номинальный ток в цепи управления.

5. Проведение проверки всех выбранных аппаратов по термической и динамической стойкости.

Задачи к разделу V

1. Привести подробное описание использованных в схеме электрических аппаратов (название, назначение, основные составные части).

2. Привести подробное описание алгоритма работы схемы управления и защит.

2.1. Процесс запуска двигателя.

2.2. Процесс останова двигателя.

2.3. Аварийный останов двигателя при возникновении короткого замыкания в обмотке двигателя или питающем кабеле.

2.4. Аварийный останов двигателя при возникновении недопустимой перегрузки по току (работа теплового реле ТР).

3. Используя паспортные данные двигателя для своего варианта (табл. 5.1), произвести выбор всех используемых в схеме электрических аппаратов.

4. Привести тип, основные номинальные параметры выбранных аппаратов, необходимые характеристики.

5. Выполнить расчеты, доказывающие правильность выбора.

При выполнении расчетов давать письменные пояснения выполняемых действий; решение приводится сначала в общем виде, а затем с подстановкой численных значений.

Изучаемая релейно-контакторная схема управления и защит асинхронного короткозамкнутого двигателя приведена на рис. 5.1–5.10.

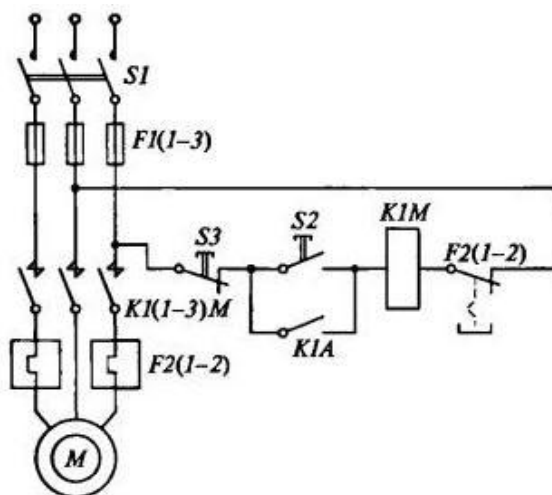


Рис. 5.1. Схема управления асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором

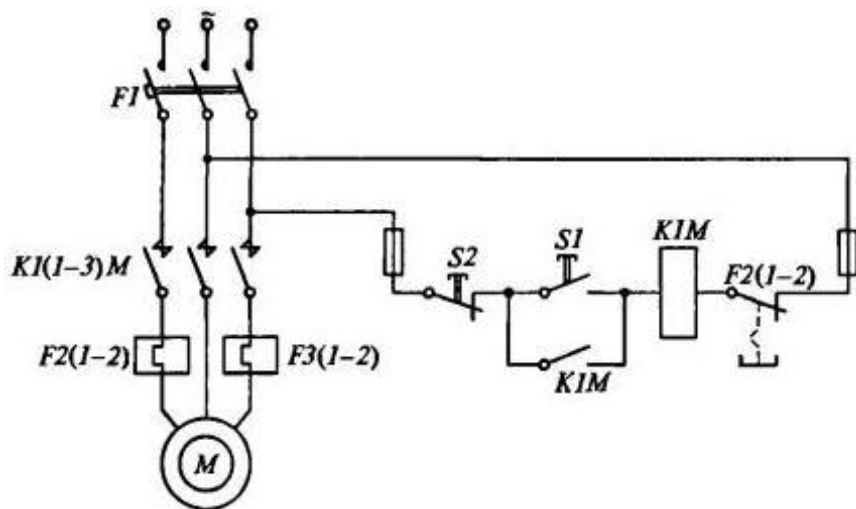


Рис. 5.2. Схема управления асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором с использованием воздушного автоматического выключателя

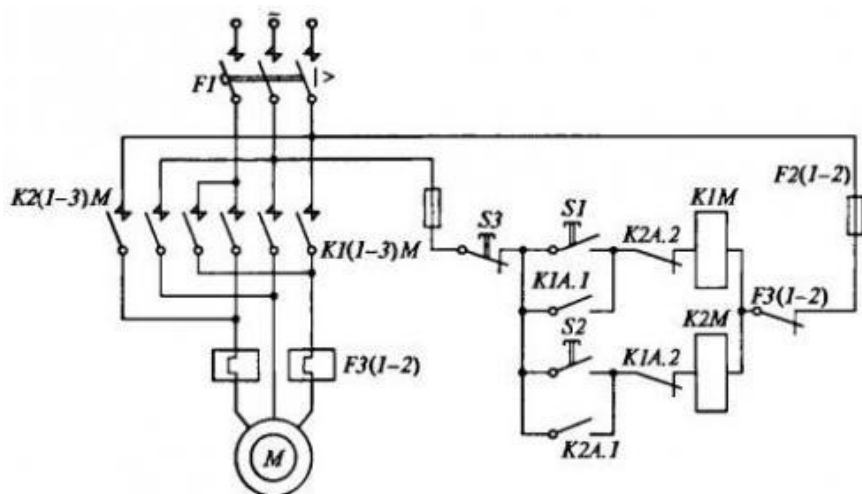


Рис. 5.3. Схема управления асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором с реверсивным пускателем

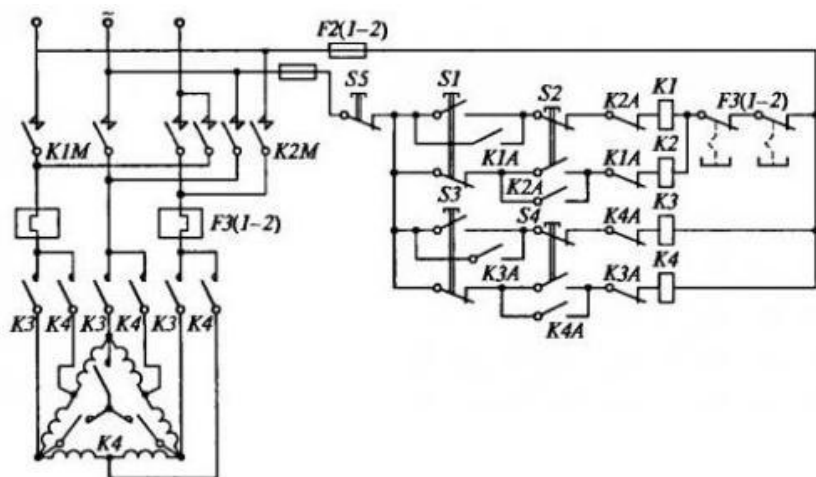


Рис. 5.4. Схема управления двухскоростным асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором

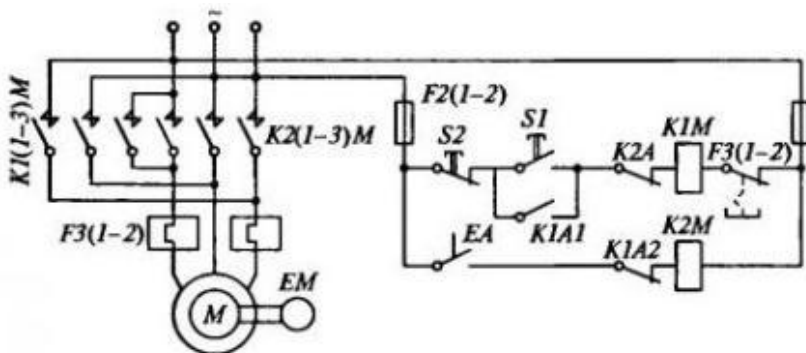


Рис. 5.5. Схема управления асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором с использованием торможения противовключением

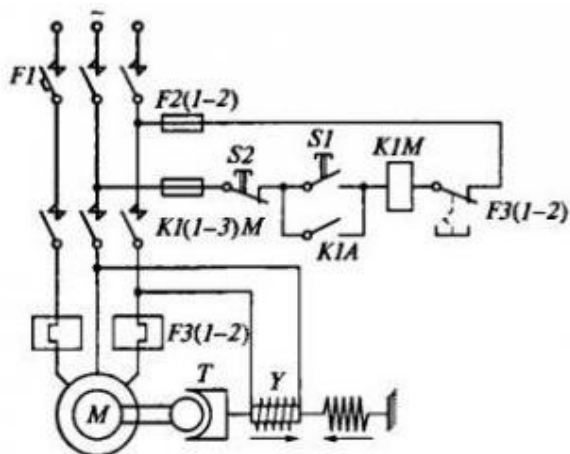


Рис. 5.6. Схема фрикционного торможения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором грузоподъемного механизма

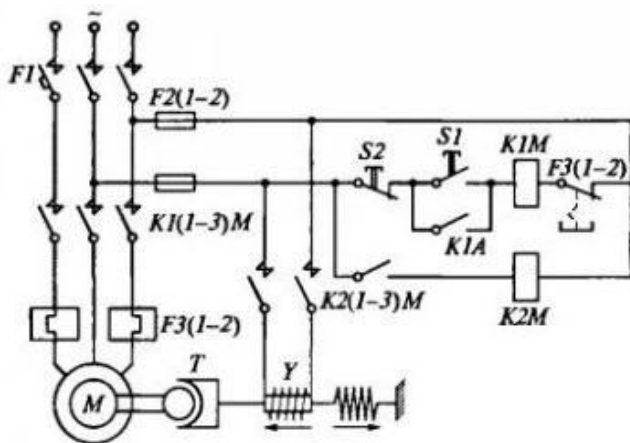


Рис. 5.7. Схема фрикционного торможения асинхронного электродвигателем с короткозамкнутым ротором станочного оборудования

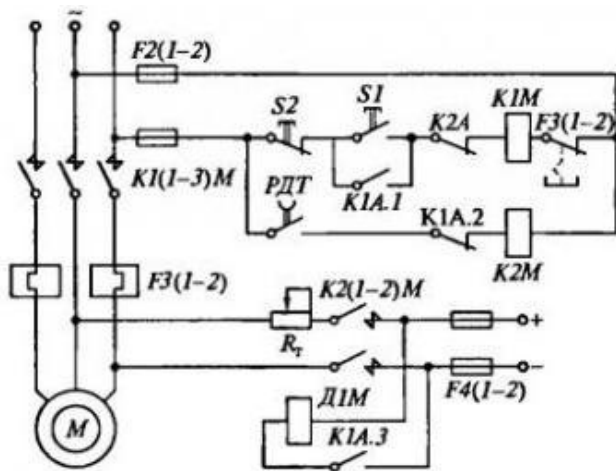


Рис. 5.8. Схема управления асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором с использованием динамического торможения

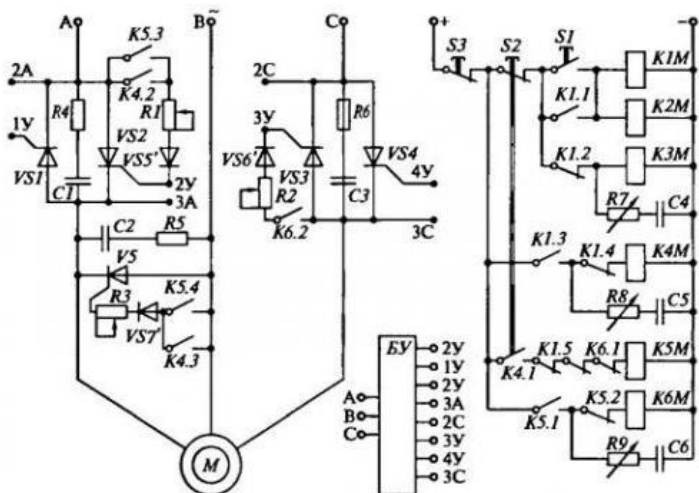


Рис. 5.9. Схема тиристорного управления пуском и торможением асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором

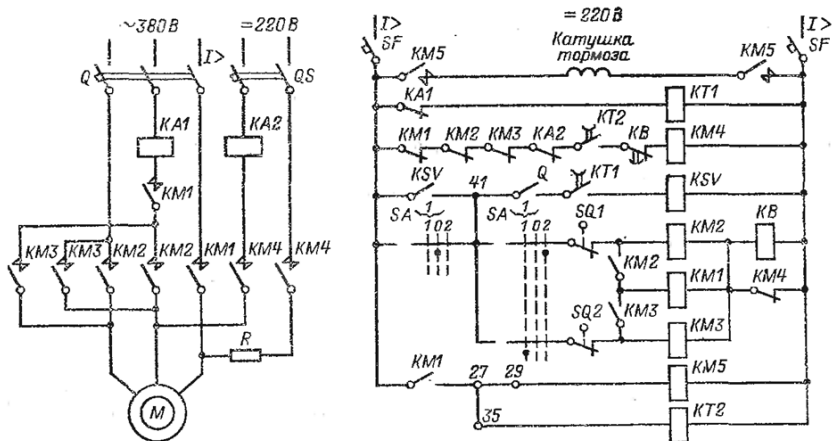


Рис. 5.10. Схема управления короткозамкнутым асинхронным электродвигателем с динамическим торможением и противовключением

Таблица 5.1

Паспортные данные электродвигателей

| № вар. | Схема | Тип двигателя | Мощность, кВт | $\eta, \%$ | $\cos \varphi$, о.е. | $I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}}$, о.е. | Время пуска двигателя, с |
|-----------|-----------|---------------|------------------|------------|--------------------------|--|-----------------------------|
| 1 | Рис. 5.1 | 4A71B2Y3 | 1,1 | 77,5 | 0,87 | 5,5 | 3 |
| 2 | Рис. 5.2 | 4A80A2Y3 | 1,5 | 81 | 0,88 | 6,5 | 4 |
| 3 | Рис. 5.3 | 4A80B2Y3 | 2,2 | 82 | 0,87 | 6,5 | 5 |
| 4 | Рис. 5.4 | 4A90L2Y3 | 3 | 84,5 | 0,88 | 6,5 | 6 |
| 5 | Рис. 5.5 | 4A100S2Y3 | 4 | 86,5 | 0,89 | 7,5 | 7 |
| 6 | Рис. 5.6 | 4A100L2Y3 | 5,5 | 87,5 | 0,91 | 7,5 | 8 |
| 7 | Рис. 5.7 | 4A112M2Y3 | 7,5 | 87,5 | 0,88 | 7,5 | 3 |
| 8 | Рис. 5.8 | 4A132M2Y3 | 11 | 88 | 0,9 | 7,5 | 4 |
| 9 | Рис. 5.9 | 4A160S2Y3 | 15 | 88 | 0,91 | 7,5 | 5 |
| 10 | Рис. 5.10 | 4A160M2Y3 | 18,5 | 88,5 | 0,92 | 7,5 | 6 |
| 11 | Рис. 5.1 | 4A180S2Y3 | 22 | 88,5 | 0,91 | 7,5 | 7 |
| 12 | Рис. 5.2 | 4A180M2Y3 | 30 | 90,5 | 0,9 | 7,5 | 8 |
| 13 | Рис. 5.3 | 4A200M2Y3 | 37 | 91 | 0,89 | 7,5 | 3 |
| 14 | Рис. 5.4 | 4A200L2Y3 | 45 | 91 | 0,9 | 7,5 | 4 |
| 15 | Рис. 5.5 | 4A225M2Y3 | 55 | 91 | 0,89 | 7,5 | 5 |
| 16 | Рис. 5.6 | 4A250S2Y3 | 75 | 92 | 0,9 | 7,5 | 6 |
| 17 | Рис. 5.7 | 4A250M2Y3 | 90 | 91 | 0,89 | 7,5 | 7 |
| 18 | Рис. 5.8 | 4A280S2Y3 | 110 | 91 | 0,89 | 7 | 8 |
| 19 | Рис. 5.9 | 4A280M2Y3 | 132 | 91,5 | 0,9 | 7 | 3 |
| 20 | Рис. 5.10 | 4A315S2Y3 | 160 | 92 | 0,9 | 7 | 4 |
| 21 | Рис. 5.1 | 4A315M2Y3 | 200 | 92,5 | 0,9 | 7 | 5 |
| 22 | Рис. 5.2 | 4A355S2Y3 | 250 | 92,5 | 0,9 | 7 | 6 |
| 23 | Рис. 5.3 | 4A355M2Y3 | 315 | 93 | 0,91 | 7 | 7 |
| 24 | Рис. 5.4 | 4A80A4Y3 | 1,1 | 75 | 0,81 | 5 | 8 |
| 25 | Рис. 5.5 | 4A80B4Y3 | 1,5 | 77 | 0,83 | 5 | 3 |
| 26 | Рис. 5.6 | 4A90L4Y3 | 2,2 | 80 | 0,83 | 6 | 4 |
| 27 | Рис. 5.7 | 4A100S4Y3 | 3 | 82 | 0,83 | 6,5 | 5 |
| 28 | Рис. 5.8 | 4A100L4Y3 | 4 | 84 | 0,84 | 6 | 6 |
| 29 | Рис. 5.9 | 4A112M4Y3 | 5,5 | 85,5 | 0,86 | 7 | 7 |
| 30 | Рис. 5.10 | 4A132 S4Y3 | 7,5 | 87,5 | 0,86 | 7,5 | 8 |

Ток короткого замыкания в месте установки автоматического выключателя принять равным 1 кА.

Содержание работы

Приведём схему (см. рис. 5.1) в соответствие действующим нормативным документам в части буквенно-цифровых обозначений элементов электрических аппаратов на принципиальных схемах и получим схему (см. рис. 5.2).

1. Описание использованных в схеме (см. рис. 5.2) электрических аппаратов

Силовая часть.

QS – трёхполюсный (трёхфазный) рубильник с ручным приводом, предназначен для подачи и снятия рабочего напряжения на силовой питающий кабель.

KM1 – трёхфазный контактор, силовые контакты которого имеют дугогасительные камеры. Контактор имеет вспомогательные контакты и электрический привод и предназначен для подачи и снятия рабочего напряжения с подводящего кабеля и статорной обмотки асинхронного двигателя.

KM2 – KM4 – двухфазные контакторы с силовыми и вспомогательными контактами. Эти контакторы имеют электрический привод, они предназначены для коммутации секций реостатов R1 – R3, включённых в цепь трёхфазной обмотки ротора асинхронного двигателя. Коммутация реостатов происходит во время пуска двигателя с целью уменьшения пусковых токов в статорной обмотке двигателя и плавного пуска приводимого рабочего механизма.

M – трёхфазный асинхронный двигатель (АД) с фазным ротором типа 4A315S2Y3.

QF – двухполюсный автоматический выключатель, предназначен для подачи и снятия рабочего напряжения с цепей управления и защиты двигателя в рабочих и аварийных режимах работы аппаратуры управления и защиты АД.

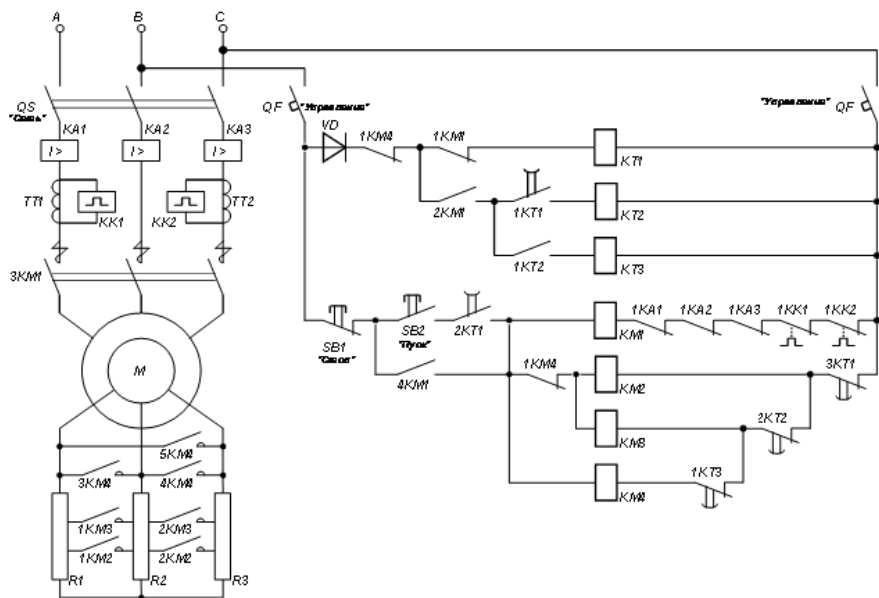


Рис. 5.12. Схема управления асинхронным двигателем с фазным ротором в функции времени

Цепи защиты АД.

KA1 – KA3 – реле максимального тока, срабатывают мгновенно в момент превышения заданного максимума тока АД. Нормально-замкнутые контакты этих реле включены последовательно в цепь катушки контактора KM1. При срабатывании этих реле в любой комбинации контактор KM1 снимает рабочее напряжение со статорной обмотки АД, который вместе с рабочим механизмом останавливается. Обычно эта защита предназначена для защиты подводящего кабеля и обмоток АД при коротких замыканиях в этих цепях.

KK1 и KA2 – тепловые реле, срабатывают при длительном незначительном превышении номинального тока АД, т.е. при перегрузке АД. Нормально-замкнутые контакты этих реле включены последовательно в цепь катушки контактора KM1. При срабатывании этих реле в любой комбинации контактор KM1 снимает рабочее напряжение со статорной обмотки АД и рабочий механизм останавливается.

TT1 и TT2 – трансформаторы тока, предназначены для согласования рабочего тока АД с номинальным током реле KK1 и KK2.

Цепи управления АД.

VD – диод, предназначен для выпрямления переменного тока, так как катушки питания реле времени KT1 – KT3 должны питаться постоянным напряжением.

КТ1 – КТ3 – реле времени, предназначены для создания временных задержек при переключении секций пусковых реостатов АД.

SB1 и SB2 – стандартная кнопочная станция с кнопками «Пуск» и «Стоп».

2. Описание алгоритма работы схемы управления и защит

Перед пуском двигателя в работу включают рубильник «Сеть» (QS), рабочее напряжение поступает на контактор КМ1.

Если всё в порядке, то после этого включают автоматический выключатель «Управление» (QF), вследствие чего рабочее напряжение подаётся на цепи управления.

По цепи VD – 1KM4 – 1KM1 напряжение поступает на реле времени КТ1, которое срабатывает и замыкает свои контакты 1КТ1 и 2КТ1.

После этого схема управления готова к запуску в работу приводного АД.

2.1. Процесс запуска двигателя

Запуск двигателя производится нажатием кнопки «Пуск» (SB2), по цепи SB1 – SB2 – 2КТ1 – 1КА1 – 1КА2 – 1КА3 – 1КК1 – 1КК2 напряжение поступает на катушку контактора КМ1. Контактор срабатывает и своими силовыми контактами подаёт напряжение на статорную обмотку АД. Поскольку в цепи роторной обмотки пусковые реостаты включены по схеме «звезда» на полное сопротивление, ротор АД начинает своё вращение на малой скорости.

Одновременно контакты 4KM1 шунтируют контакты кнопки «Пуск» (SB1), контактор КМ1 встаёт на самоблокировку, и кнопку «Пуск» можно опустить.

Замыкающиеся контакты 2KM1 взводят реле времени КТ2.

Размыкающиеся контакты 1KM1 приводят реле времени КТ1 в состояние «Возврат», с этого момента начинается отсчёт времени на замыкание контактов 3КТ1 (выдержка t_1).

Одновременно замыкающиеся контакты 2KM1 приводят реле времени КТ2 в состояние «Срабатывание». Его замыкающиеся контакты 1КТ2 взводят реле времени КТ3.

После этого с небольшой задержкой времени размыкаются контакты 1КТ1 и приводят реле времени КТ2 в состояние «Возврат», с этого момента начинается отсчёт времени на замыкание контактов 2КТ2 (выдержка $t_2 > t_1$).

Одновременно размыкаются контакты 1КТ2 и приводят реле времени КТ3 в состояние «Возврат», с этого момента начинается отсчёт времени на замыкание контактов 1КТ3 (выдержка $t_3 > t_2 > t_1$).

После выдержки времени t_1 замыкаются контакты 3КТ1 и срабатывает контактор КМ2, который своими силовыми контактами 1KM2 и 2KM2 шунтирует первую секцию пусковых реостатов АД, после чего начинает возрастать скорость вращения ротора АД.

После выдержки времени t_2 замыкаются контакты 2КТ2 и срабатывает контактор КМ3, который своими силовыми контактами 1КМ3 и 2КМ3 шунтирует вторую секцию пусковых реостатов АД, после чего начинает возрастать ещё больше скорость вращения ротора АД.

После выдержки времени t_3 замыкаются контакты 1КТ3 и срабатывает контактор КМ4, который своими силовыми контактами 3КМ4, 4КМ4 и 5КМ4 шунтирует третью секцию пусковых реостатов АД и замыкает цепь роторных обмоток по схеме «звезда» напрямую без пусковых реостатов, после чего скорость вращения ротора АД может иметь своё максимальное значение в зависимости от величины механической нагрузки.

Одновременно размыкающиеся вспомогательные контакты 1КМ4 и 2КМ4 контактора КМ4 разрывают цепи питания катушек всех реле времени и контакторов КМ2 и КМ3.

На этом процесс запуска АД с фазным ротором закончен.

2.2. Процесс останова двигателя

Для останова двигателя нажимают кнопку «Стоп» (SB1), вследствие этого разрывается цепь питания катушек контакторов КМ1 и КМ4. Со статорной обмотки снимается рабочее напряжение, а в цепи роторной обмотки пусковые реостаты включаются по схеме «звезда» на полное сопротивление.

Время останова двигателя определяется инерционностью вращающихся частей самого двигателя и инерционностью рабочего механизма.

2.3. Аварийный останов двигателя при возникновении короткого замыкания в обмотке двигателя или питающем кабеле

При достижении тока в питающем кабеле величины минимального тока короткого замыкания в любой из фаз в любой комбинации мгновенно срабатывают соответствующие реле максимального тока КА1, КА2 и КА3, которые своими последовательно соединёнными контактами 1КА1, 1КА2 и 1КА3 разрывают цепь питания катушки контактора КМ1. Контактор КМ1 размыкает свои силовые контакты 3КМ1 и отключает статорную обмотку АД от сети. Одновременно контактор КМ1 своими вспомогательными контактами 4КМ1 разрывает цепь питания катушки контактора КМ4. Приводной двигатель и рабочий механизм останавливаются.

2.4. Аварийный останов двигателя при возникновении недопустимой перегрузки по току (работа тепловых реле КК1 и КК2)

Тепловые реле являются тепловой моделью защищаемого двигателя. Их термочувствительные элементы (ТЧЭ) нагреваются и остывают примерно так же, как и обмотки двигателя при его работе. При токах двигателя меньше номинального тепловые элементы не нагреваются до порога срабатывания. В кратковременных перегрузочных режимах тепловые элементы нагреваются и остывают, но их температура не превышает порога срабатывания.

Но если ток перегрузки большой, то нагрев ТЧЭ до пороговой температуры произойдёт быстро и тепловое реле работает. Тепловое реле

может сработать и при относительно малой перегрузки в случае, когда эта перегрузка длится очень долго.

При срабатывании тепловых реле КК1 и КК2 в любой их комбинации их контакты 1КК1 и 1КК2 разрывают цепь и происходит останов двигателя, как и при срабатывании реле максимального тока.

Самовозврат контактов тепловых реле при их остывании не происходит, контакты тепловых реле после их остывания приводят в замкнутое состояние вручную.

3. Выбор всех используемых в схеме электрических аппаратов

Рабочее напряжение электрических аппаратов схемы управления и защиты должно быть не менее 400 В.

Рабочее напряжение катушек контакторов переменное с номинальным напряжением 380 В.

Рабочее напряжение катушек реле времени постоянное с номинальным напряжением 190 В.

Диапазон регулировки задержки срабатывания или возврата контактов реле времени от 0,1 до 4 с с точностью установки не хуже 0,1 с.

Ток короткого замыкания в месте установки автоматического выключателя принимаем равным 1 кА.

Паспортные данные электродвигателя

| № вар. | Тип двигателя | Мощность, кВт | η , % | $\cos \varphi$, о.е. | $\frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}}$, о.е. | Ток ротора, А | Напряжение ротора, В | Время пуска двигателя, с |
|--------|---------------|---------------|------------|-----------------------|---|---------------|----------------------|--------------------------|
| 31 | 4А315S2У3 | 160 | 92 | 0,9 | 7 | 352 | 291 | 4 |

Используя паспортные данные двигателя, рассчитаем его номинальный ток.

Определим номинальную полную мощность двигателя:

$$S_n = \frac{P_n}{\eta \cdot \cos \varphi \cdot k_E},$$

где P_n – номинальная мощность двигателя (мощность на валу),

$P_n = 16 \cdot 10^4$ Вт;

η – КПД двигателя, $\eta = 0,92$;

k_E – коэффициент, учитывающий число пар полюсов АД с ФР, для $2p = 1$ $k_E = 0,98$.

$$S_n = \frac{16 \cdot 10^4}{0,92 \cdot 0,90 \cdot 0,98} = 197180 \text{ ВА.}$$

Определим номинальный ток двигателя:

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{197180}{\sqrt{3} \cdot 380} = 299,58 \text{ А.}$$

Определим пусковой ток двигателя:

$$I_{\text{пуск}} = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}} \cdot I_{\text{ном}} = 7,0 \cdot 299,58 = 2097,09 \text{ А.}$$

Определим активное сопротивление обмотки ротора:

$$R_p = \frac{U_p \cdot s_n}{\sqrt{3} \cdot I_p} = \frac{291 \cdot 0,03}{\sqrt{3} \cdot 352} = 0,0143 \text{ Ом.}$$

Составим схему для тока в роторной цепи (рис. 5.13).

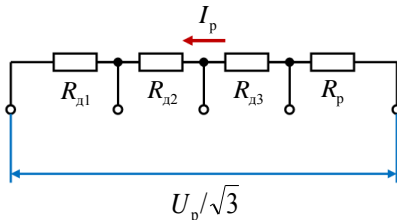


Рис. 5.13. Схема роторной цепи (одна фаза)

Успешный запуск двигателя с рабочим механизмом осуществляется при условии, что пусковой момент искусственной механической характеристики должен превышать номинальный момент на (20–25) %, так как момент сопротивления приводимого рабочего механизма всегда несколько меньше номинального момента АД.

Запишем соотношение этих моментов:

$$\frac{M_n}{M_{\text{п.и}}} = \frac{1,00}{1,25} = 0,80.$$

Определим коэффициент расчёта пусковых реостатов:

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{M_n}{M_{\text{п.и}}} \cdot \frac{1}{s_n}},$$

где m – количество ступеней пусковых реостатов, $m=3$ согласно заданной схеме.

$$\lambda = \sqrt[3]{0,80 \cdot \frac{1}{0,03}} = 2,988 \approx 3,0.$$

Определим величину сопротивления отдельных ступеней реостата (рис. 5.3):

$$R_{\text{д}m} = R_{\text{д}3} = R_p \cdot (\lambda - 1) = 0,0143 \cdot (3,0 - 1) = 0,0286 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{д}(m-1)} = R_{\text{д}2} = R_{\text{д}3} \cdot \lambda = 0,0143 \cdot 3,0 = 0,0429 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{д}(m-2)} = R_{\text{д}1} = R_{\text{д}3} \cdot \lambda = 0,0143 \cdot 3,0 = 0,0429 \text{ Ом.}$$

Определим сопротивление всей роторной цепи в момент пуска на первой ступени:

$$R_{\text{п.макс}} = R_p + R_{\text{д}3} + R_{\text{д}2} + R_{\text{д}1} = 0,0143 + 0,0286 + 0,0429 + 0,0429 = 0,1287 \text{ Ом.}$$

Определим номинальный ток в роторной цепи при полном введении пусковых реостатов:

$$I_{p.1} = \frac{U_p \cdot s_n}{\sqrt{3} \cdot R_{п.макс}} = \frac{291 \cdot 0,03}{\sqrt{3} \cdot 0,1287} = 39,163 \text{ А.}$$

Определим номинальный ток в роторной цепи при шунтировании первой ступени пусковых реостатов контактором КМ2:

$$I_{p.1} = \frac{U_p \cdot s_n}{\sqrt{3} \cdot R_{п.макс}} = \frac{291 \cdot 0,03}{\sqrt{3} \cdot (0,1287 - 0,0429)} = 58,75 \text{ А.}$$

Определим номинальный ток в роторной цепи при шунтировании второй ступени пусковых реостатов контактором КМ3:

$$I_{p.1} = \frac{U_p \cdot s_n}{\sqrt{3} \cdot R_{п.макс}} = \frac{291 \cdot 0,03}{\sqrt{3} \cdot (0,1287 - 0,0429 - 0,0429)} = 117,5 \text{ А.}$$

4. Выбор электрических аппаратов

Определяющими параметрами при выборе аппаратов будут следующие:

- номинальное рабочее напряжение, $U_{н.раб} = 380 \text{ В}$;
- номинальный рабочий ток, $I_{н.1} = 300 \text{ А}$ и $I_{н.2} = 352 \text{ А}$, $117,5 \text{ А}$, 60 А ;
- ударный ток короткого замыкания, $I_{уд.к.з.} = 1 \text{ кА}$.

Для выбора силовых коммутационных аппаратов используем каталог фирмы Legrand.

4.1. Трёхполюсный выключатель (рубильник, выключатель нагрузки) QS – 1 шт.:

- выключатель нагрузки DPX-IS 630 3п 400А:
 - $U_{н.раб} = 690 \text{ В} > 380 \text{ В}$;
 - $I_{н.1} = 400 \text{ А} > 300 \text{ А}$;
 - $I_{уд.к.з.} = 12 \text{ кА} > 1 \text{ кА}$.

4.2. Трёхполюсный контактор КМ1 – 1 шт.:

- контактор Конт.СТХ³– 400 330А
 - $U_{н.раб} = 690 \text{ В} > 380 \text{ В}$;
 - $I_{н.1} = 330 \text{ А} > 300 \text{ А}$;
 - ток короткого замыкания $I_q = 50 \text{ кА} > 1 \text{ кА}$.

4.3.1. Трёхполюсный контактор КМ2 – 1 шт.:

- контактор СТХ³– 65 65А
 - $U_{н.раб} = 690 \text{ В} > 380 \text{ В}$;
 - $I_{н.2} = 65 \text{ А} > 58 \text{ А}$.

4.3.2. Трёхполюсный контактор КМ3 – 1 шт.:

- контактор СТХ³–150 130А
 - $U_{н.раб} = 1000 \text{ В} > 380 \text{ В}$;
 - $I_{н.2} = 130 \text{ А} > 117 \text{ А}$.

4.3.3. Трёхполюсный контактор КМ4 – 1 шт.:

– контактор СТХ³ – 400 400А

– $U_{\text{н.раб}} = 1000 \text{ В} > 380 \text{ В};$

– $I_{\text{н.2}} = 400 \text{ А} > 352 \text{ А}.$

4.4. Трансформаторы тока ТТ1 и ТТ2 – 2 шт.:

– трансформатор тока ТТИ-А 300/5:

– коэффициент трансформации, $k_{\text{тр}} = 300/5;$

– класс точности, $\delta = 0,5;$

– полная мощность, $S = 5 \text{ ВА}.$

4.5. Тепловые реле КК1 и КК2 – 2 шт.:

– тепловое реле RX³40:

– минимальный ток, $I_{\text{мин}} = 5 \text{ А};$

– максимальный ток, $I_{\text{макс}} = 8 \text{ А}.$

4.6. Двухполюсный автоматический выключатель QF – 1 шт.:

– автоматический выключатель RX³ С6А:

– $U_{\text{н.раб}} = 600 \text{ В} > 380 \text{ В};$

– $I_{\text{н}} = 6 \text{ А} > 1 \text{ А};$

– ТО (5-10) $I_{\text{н}} = 60 \text{ А} < 1 \text{ кА};$

– максимальный ток коммутации $6 \text{ кА} > 1 \text{ кА}.$

4.7. Реле времени КТ1 – КТ3 – 3 шт.:

– реле времени RP1505 – 1BT20 (Siemens):

– диапазон изменения времени 0,05 – 360 000 с;

– напряжение питания и управления $U = (400...440) \text{ В}, 50 \text{ Гц}$, а это значит, что из схемы управления АД можно исключить диод VD (см. рис. 5.1 и 5.2).

4.8. Реле максимального тока КА1 – КА3 – 3 шт.:

Реле максимального тока с номинальным током 300 А и пределом регулирования по току срабатывания до $7 \cdot I_{\text{н}} = 7 \cdot 300 = 2100 \text{ А}$ в настоящее время не производятся и в каталогах отсутствуют. Максимальный рабочий ток 320 А имеет реле РЭО – 401 2ТД, диапазон регулирования тока срабатывания которого лежит в пределах 420–1280 А переменного или постоянного тока. Реле этого типа можно применять для защиты асинхронных двигателей мощностью не выше 90 кВт. Защита асинхронных двигателей мощностью выше 90 кВт с помощью реле максимального тока может быть построена только с применением трансформаторов тока.

Поэтому для защиты АД с ФР мощностью 160 кВт необходимо в схему управления им ввести третий трансформатор тока, а три реле максимального тока с номинальным током 5 А включить во вторичные обмотки всех трёх трансформаторов тока.

Реле максимального тока РС40М-5/40:

– номинальный рабочий ток 25А:

– диапазон регулированиятока срабатывания (10,0 –41,5) А.

Список литературы

1. Электрические аппараты: учебник для вузов / под ред. Ю.К. Розанова. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Иформэлектро, 2001. – 420 с.
2. Шеховцов В.П. справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2009. – 136 с.
3. Чунихин А.А., Жаворонков М.А. Аппараты высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 420 с.
4. ГОСТ 403–73. Аппараты электрические на напряжение до 1000 В. Допустимые температуры нагрева частей аппаратов // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.
5. ГОСТ 12434–83 (1988). Аппараты электрические коммутационные на напряжение до 1000 В. Общие технические условия // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.
6. ГОСТ 8865–93. Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.
7. Буткевич Г. В. Задачник по электрическим аппаратам: учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1987. – 232 с.
8. Основы теории электрических аппаратов / под ред. Г.В. Буткевича. – М.: Высшая школа, 1970. – 600 с.
9. Основы теории электрических аппаратов: учеб. пособие для электротехн. спец. вузов / Б.К. Буль [и др.]; под ред. Г.В. Буткевича. – М.: Высшая школа, 1970. – 600 с.
10. Алиев И.И., Абрамов М.Б. Электрические аппараты: справочник. – М.: РадиоСофт, 2004. – 256 с.
11. Электрические и электронные аппараты: в 2 т. Т. 2: Силовые электронные аппараты: учебник для студ. высш. учеб. завед. / под ред. Ю.К. Розанова. – М.: Академия, 2010. – 320 с.
12. Электрические и электронные аппараты: в 2 т. Т. 1: Электромеханические аппараты: учебник для студ. высш. учеб. завед. / под ред. А.Г. Годжелло, Ю.К. Розанова. – М.: Академия, 2010. – 352 с.
13. Марков А.М. Электрические и электронные аппараты: учеб. пособие. Ч. I: Электромеханические аппараты. – Псков: Изд-во ПсковГУ, 2013. – 136 с.
14. Марков А.М. Электрические и электронные аппараты: учеб. пособие. Ч. II: Силовые электронные аппараты. – Псков: Изд-во ПсковГУ, 2013. – 132 с.
15. Марков А.М. Электромагнитный контактор постоянного тока: учебно-метод. пособие. Ч. I. – Псков: Изд-во ПсковГУ, 2012. – 76 с.
16. Марков А.М. Электромагнитный контактор постоянного тока: учебно-метод. пособие. Ч. II. – Псков: Изд-во ПсковГУ, 2012. – 112 с.
17. Электрические и электронные аппараты: лабор. работы / под ред. Ю.К. Розанова. – М.: Издательство МЭИ, 1998. – 321 с.

Приложение

Таблица П1

Зависимость коэффициента поверхностного эффекта

для сплошных круглых немагнитных проводников от параметра $\sqrt{\frac{f}{R_{100}}}$

| k_n | 1,01 | 1,02 | 1,05 | 1,08 | 1,11 | 1,17 | 1,24 | 1,32 | 1,4 | 1,51 | 1,63 | 1,74 | 1,86 |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|
| $\sqrt{\frac{f}{R_{100}}}$ | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 | 220 | 240 | 260 | 280 |

Примечание:

f – частота переменного тока, Гц;

R_{100} – активное сопротивление постоянному току проводника длиной 100 м, Ом.

Таблица П2

Основные свойства некоторых марок листовой электротехнической стали

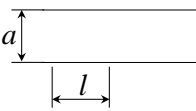
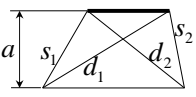
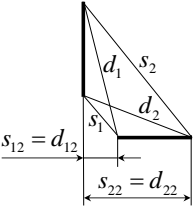
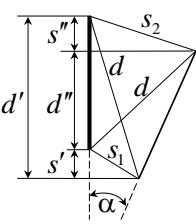
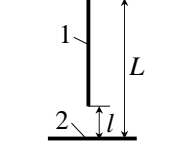
| Марка стали | Толщина листа | Магнитная индукция, Тл, при напряженности магнитного поля, А/см, не менее | | | | | |
|----------------------|------------------|--|------|------|------|-------|-------|
| | | 500 | 1000 | 2500 | 5000 | 10000 | 30000 |
| Горячекатанные стали | | | | | | | |
| 1411 | 0,5 | — | — | 1,46 | 1,57 | 1,72 | 1,94 |
| 1411 | 0,35 | — | — | 1,46 | 1,57 | 1,71 | 1,92 |
| 1412 | 0,5 | — | — | 1,46 | 1,57 | 1,71 | 1,92 |
| 1412 | 0,35 | — | — | 1,46 | 1,57 | 1,71 | 1,92 |
| 1511 | 0,5 | — | 1,3 | 1,46 | 1,57 | 1,71 | 1,9 |
| 1511 | 0,35 | — | 1,3 | 1,46 | 1,57 | 1,7 | 1,9 |
| 1514 | 0,5 | — | 1,29 | 1,44 | 1,55 | 1,69 | 1,89 |
| 1514 | 0,35 | — | 1,29 | 1,44 | 1,55 | 1,69 | 1,89 |
| 1521 | 0,35 | 1,21 | 1,3 | 1,44 | — | — | — |
| 1521 | 0,2 | 1,2 | 1,29 | 1,42 | — | — | — |
| 1521 | 0,1 | 1,19 | 1,28 | 1,4 | — | — | — |

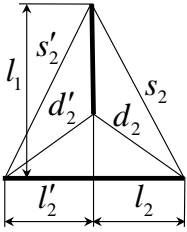
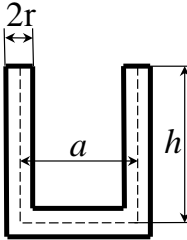
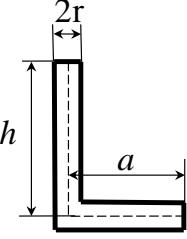
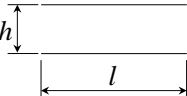
Таблица П3

Зависимость удельных потерь от магнитной индукции
для горячекатаных трансформаторных сталей ($f = 50$ Гц)

| Марка стали | Толщина листа | Удельные потери, Вт/кг при магнитной индукции, Тл | | | | | |
|-------------|---------------|---|------|------|------|------|------|
| | | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 1,0 | 1,25 | 1,5 |
| 1411 | 0,5 | 0,22 | 0,51 | 1,2 | 1,9 | 3 | 4,2 |
| 1411 | 0,35 | 0,2 | 0,49 | 0,9 | 1,5 | 2,35 | 3,7 |
| 1412 | 0,5 | 0,21 | 0,5 | 1 | 1,75 | 2,7 | 3,8 |
| 1412 | 0,35 | 0,2 | 0,48 | 0,8 | 1,4 | 2,15 | 3,1 |
| 1511 | 0,5 | 0,2 | 0,49 | 0,85 | 1,48 | 2,3 | 3,22 |
| 1511 | 0,35 | 0,18 | 0,4 | 0,75 | 1,3 | 1,95 | 2,8 |
| 1513 | 0,5 | 0,15 | 0,42 | 0,75 | 1,2 | 1,85 | 2,7 |
| 1513 | 0,35 | 0,1 | 0,35 | 0,55 | 1 | 1,53 | 2,25 |
| 1514 | 0,5 | 0,1 | 0,3 | 0,65 | 1,1 | 1,72 | 2,5 |
| 1514 | 0,35 | 0,05 | 0,24 | 0,5 | 0,8 | 1,4 | 2 |

Геометрические коэффициенты контуров электродинамических
усилий (ЭДУ) для первого проводника

| № п/п | Эскиз расположения проводников | Коэффициент контура ЭДУ | Примечание |
|----------|---|---|---|
| 1 |  | $k_r = \frac{2 \cdot l}{a}$ | Проводники параллельные бесконечно длинные |
| 2 |  | $k_r = \frac{(d_1 + d_2) - (s_1 + s_2)}{a}$ | Проводники параллельные конечной длины |
| 3 |  | $k_r = \ln \left(\frac{(d_1 + d_{12}) \cdot (d_2 + d_{22})}{(s_1 + s_{12}) \cdot (s_2 + s_{22})} \right)$ | Проводники конечной длины под прямым углом |
| 4 |  | $k_r = \frac{1 + \cos \alpha}{\sin \alpha} \times \ln \left(\frac{(d + d') \cdot (d - d'')}{(s_1 + s') \cdot (s_2 + s'')} \right)$ | Проводники конечной длины в одной плоскости под углом $\alpha < 90^\circ$ |
| 5 |  | $k_r = 2 \cdot \ln \frac{L}{l}$ | Проводники в одной плоскости под прямым углом, проводник 2 бесконечной длины |

| | | | |
|---|--|--|--|
| 6 |  | $k_r = \ln \left(\frac{l_1}{l_2} \right)^2 \times \frac{(d_2 + l_2) \cdot (d_2' + l_2')}{(s_2 + l_2) \cdot (s_2' + l_2')}$ | То же, но проводники конечной длины |
| 7 |  | $k_r = 2 \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot b}{1 + \sqrt{1 + c^2}} + 0,25 \right)$ <p>, где $b = \frac{a}{r}$, $c = \frac{a}{h}$</p> | Проводники круглые, в одной плоскости под прямым углом |
| 8 |  | $k_r = \ln \frac{2 \cdot b}{1 + \sqrt{1 + c^2}} + 0,25$ <p>где $b = \frac{a}{r}$, $c = \frac{a}{h}$</p> | Проводники круглые, в одной плоскости под прямым углом |
| 9 |  | $k_r = \frac{2 \cdot l}{h} \cdot \sqrt{l + \left(\frac{h}{l} \right)^2} - \frac{h}{l}$ | Параллельные проводники одинаковой длины |

Учебное издание

Чабанов Евгений Александрович

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ

Практикум

Редактор и корректор *И.Н. Жеганина*

Подписано в печать 24.10.2019. Формат 60×90/16.
Усл. печ. л. 5,25. Тираж 30 экз. Заказ № 191/2019.

Издательство
Пермского национального исследовательского
политехнического университета.
Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.
Тел.: + 7 (342) 219-80-33.