

ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный
университет»
электроэнергетический факультет
кафедра электроснабжения и эксплуатация электрооборудования

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

Учебное пособие

Ставрополь 2020

УДК 621.316

Рецензент:

к.т.н., доцент кафедры ПЭЭСХ СтГАУ С.Н. Антонов

Кобозев В.А., Мельников М.А., Адошев А.И., Ивашина А.В.
Электрические аппараты : Учебное пособие. Ставрополь, 2020. 16 с.

В учебном пособии приведена последовательность расчетов параметров электрических аппаратов и технически обоснованного выбора электрических аппаратов.

Учебное пособие предназначено для выполнения контрольной работы по дисциплине «Электрические аппараты» студентами заочной формы обучения электроэнергетического факультета, обучающимися по направлению подготовки 35.03.06 «Агроинженерия».

Методические указания к выполнению контрольной работы

Содержание выполняемой в соответствии с учебным планом контрольной работы направлено на закрепление теоретических положений курса, на получение студентами практических навыков расчета параметров электрических аппаратов и технически обоснованного выбора аппаратов.

При выполнении контрольной работы следует знать следующие правила:

1. Контрольная работа выполняется в отдельной тетради, на обложке которой указываются фамилия, имя и отчество студента (в именительном падеже), специальность, шифр, наименование предмета, домашний адрес (с индексом предприятия связи). На каждом листе тетради оставляются поля шириной 1...2 см для замечаний рецензента.

2. Текст контрольной работы следует аккуратно оформить, делая все записи чернилами или шариковой ручкой. Условие каждой задачи переписываются в тетрадь.

3. Расчетные формулы следует писать сначала в общем виде и лишь затем подставлять в них цифровые значения, указывая размерность полученного результата.

4. Выбранные величины должны быть обоснованы. При заимствовании расчетных данных, формул, методов расчета и т.п. следует сделать ссылку на использованную литературу с указанием страницы, номера формулы, рисунка и т.п. Перечень использованной литературы нужно привести в конце работы, указав автора книги, название и год ее издания.

5. Результаты вычислений и графических построений оформляются в виде расчетных таблиц. Графическая часть работы (графики, диаграммы и т.п.) выполняются на миллиметровой бумаге и вклеиваются в тетрадь.

6. Незачтенную контрольную работу необходимо исправить в соответствии с замечаниями рецензента и прислать на повторную рецензию. Исправления делаются в той же тетради в конце работы.

7. Выбор вариантов для решения задач производится преподавателем.

Задача 1

Токоподвод к автоматическому выключателю постоянного тока выполнен медными прямоугольными шинами сечением $b \times h$, расположенными параллельно широкой стороне друг к другу при расстоянии a и закрепленными на опорных изоляторах на расстоянии l между соседними изоляторами.

Выбрать размеры сечения b и h токоподводящих шин исходя из длительного режима работы выключателя при номинальном токе I_n и его электродинамической стойкости при токе короткого замыкания $I_{кз}$. (максимальное значение пропускаемого тока). Данные для расчета представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2

Параметры	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$a, мм$	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40
$l, мм$	150	160	170	170	180	180	200	200	210	210
$I_n, А$	160	200	250	400	600	800	1000	1600	2000	2500
$I_{кз}, кА$	55	60	75	80	100	120	160	200	250	300

Таблица 3

Параметры	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$a, мм$	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
$l, мм$	150	160	170	170	180	180	200	200	210	210
$I_n, А$	150	200	250	300	400	600	800	1000	1500	2000
$I_{кз}, кА$	50	60	75	90	100	110	150	170	190	230

Методические указания

1. Определение размеров сечения шин, исходя из длительного

режима работы

$$S_{\text{дол}} = \frac{I_n}{j_{\text{доп}}},$$

где $j_{\text{доп}} = 2 \text{ А/мм}^2$ – допустимая из условий нагрева шинпровода плотность тока.

Отношение узкой стороны сечения шинпровода к его широкой стороне b/h обычно принимается в пределах от 0,1 до 0,25. При этом размеры сечения выбираются из стандартных рядов для медного проката. Для размера b : ... 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12 ... мм, для размера h : ... 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120 ... мм. Выбранные размеры b и h должны обеспечивать сечение не менее $S_{\text{дол}}$, или максимально близкое к нему.

2. Определение размеров сечения шин, исходя из электродинамической стойкости при токе короткого замыкания.

Электродинамическая сила, действующая на участок шинпровода длиной l

$$P_{\text{эд}} = 10^{-7} k k_{\phi} I_{\text{кз}}^2,$$

где $k = \frac{2l}{a} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2} - \frac{a}{l} \right)$ – коэффициент контура;

k_{ϕ} – коэффициент формы, определяется по кривым Двайта ([1], с.38, рис.1.5 или [2], с.13. рис.2-4).

Максимальное изгибающее механическое напряжение в шине

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{P_{\text{эд}} l}{12 W_{\text{из}}} = \frac{P_{\text{эд}} l}{2 h b^2}.$$

где $W_{\text{из}} = \frac{h b^2}{6}$ – момент сопротивления изгибу шины, мм^3 .

Если $\sigma_{\text{max}} \leq \sigma_{\text{доп}} = 13,7 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$, то сечение медных токоподводящих шин, выбранное исходя из длительного режима работы, принимается окончательным. Если же $\sigma_{\text{max}} > \sigma_{\text{доп}}$ то необходимо увеличить толщину шинпровода, исходя из соотношения

$$b = \sqrt{\frac{P_{эд} l}{2h\sigma_{дон}}}$$

Это значение l также должно выбираться из стандартного ряда.

Литература: [1], с. 35...38, с. 56.

Задача 2

Для прямого пуска короткозамкнутого асинхронного электродвигателя серии 4А мощностью P_n , питающегося от сети с номинальным напряжением $U_n = 380V$, используется магнитный пускатель, схема включения которого представлена на рисунке 1. В состав пускателя входят контактор КМ1 и тепловое реле КК. Определить необходимые параметры двигателя и выбрать тип пускателя и параметры теплового реле. Данные для расчета приведены в таблица 4 и 5. Технические данные некоторых типов пускателей и тепловых реле приведены в таблице 6 и 7.

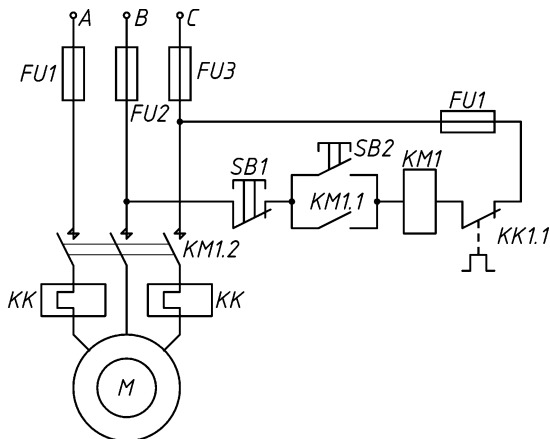


Рисунок 1 – Схема прямого пуска асинхронного электродвигателя

Таблица 4

Параметры	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_n, кВт$	15	18,5	22	15	18,5	22	11	15	11	15
$\cos \varphi$	0,91	0,92	0,91	0,88	0,88	0,90	0,86	0,87	0,75	0,82
η	0,88	0,885	0,885	0,885	0,895	0,90	0,86	0,875	0,87	0,87

Таблица 5

Параметры	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$P_n, кВт$	7,5	5,5	16	15	18,5	30	4	5,5	11	15
$\cos \varphi$	0,88	0,91	0,87	0,88	0,87	0,90	0,81	0,80	0,76	0,84
η	0,87 5	0,876	0,875	0,885	0,88	0,905	0,82	0,85	0,86	0,87

Методические указания

1. Определение номинального тока двигателя

$$I_n = \frac{P_n}{3 U_n \cos \varphi \eta},$$

где $\cos \varphi$ – коэффициент мощности двигателя;

U_n – номинальное напряжение обмотки двигателя, при соединении обмоток АД по схеме «звезда» $U_{n,Y} = 220В$, при схеме обмоток «треугольник» $U_{n,\Delta} = 380В$.

η – КПД двигателя.

По величине этого тока из таблицы 6 производится выбор пускателя таким образом, чтобы максимальный рабочий ток пускателя в категории применения АС-3 (пуск электродвигателей с короткозамкнутым ротором, отключение вращающихся двигателей при номинальной нагрузке) был не менее номинального тока двигателя и максимально близким к нему.

2. Определение номинального тока уставки теплового реле.

Для лучшего согласования перегрузочной характеристики двигателя и времятоковой характеристики реле, номинальный ток уставки выбирается на 15...20% выше номинального тока двигателя $I_{уст.ном} = (1,15...1,20)I_{ном.дв}$, так как в тепловое реле выбранного выше пускателя может быть установлен тепловой элемент с различным номинальным током, то из ряда этих токов для реле пускателя (таблица 7) необходимо выбрать значение, ближайшее к $I_{уст.ном}$ и проверить укладывается ли эта величина в пределы регулирования номинального тока уставки ($\pm 25\%$).

Таблица 6 – Технические данные магнитных пускателе при $U_{ном} = 380 В$

Тип защищенного исполнения	Номинальный ток, А	Максимальный рабочий ток при категории исполнения АС-3	Тип встроенного теплового реле
ПМЕ-122	10	7,5	ТРН-8
ПМЕ-222	23	18	ТРН-25
ПА-322	40	30	ТРН-32
ПА-422	56	50	ТРП-60
ПА-522	115	100	ТРП-150
ПА-622	140	135	ТРП-150

Таблица 7 – Технические данные тепловых реле

Тип защищенного исполнения	Номинальный ток, А	Номинальные токи тепловых элементов реле, А (при нулевом положении регулятора)	Пределы регулирования номинального тока уставки
ТРН-8	10	2; 2,5; 3,2; 4; 5; 6,8; 8; 10	(0,75...1,25) $I_{ном}$
ТРН-25	25	5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25	
ТРН-32	40	16; 20; 25; 32; 40	
ТРП-60	60	25; 30; 40; 50; 60	
ТРП-150	150	50; 60; 80; 100; 120; 150	

Выбранные таким образом параметры реле обеспечивают отключение двигателя, например, при токе перегрузки $1,3I_{ном.дв}$ за время не более 10...20 мин., а при перегрузке током $10I_{ном.дв}$ за время не более 2...5 с.

Литература: [1], с. 326...336, 355...360, 366.

Задача 3

Для защиты от токов короткого замыкания цепи питания короткозамкнутого асинхронного электродвигателя мощностью P_n (рисунок 1 и таблицы 4 и 5) используются плавкие предохранители серии ПР-2 (разборные, без наполнителя).

Определить номинальный и пограничный токи, а также сечение медной плавкой вставки и выбрать наиболее близкое по номинальному току плавкой вставки исполнение предохранителя.

Технические данные предохранителей серии ПР-2 приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Технические данные предохранителей серии ПР-2 при напряжении 380 В

Номинальный ток предохранителя, А	Номинальные токи плавки вставок, А	Предельный отключаемый ток при $\cos\varphi = 0,4$, А
15	6, 10 и 15	4500
60	15, 20, 25, 35, 45 и 60	8000
100	60,80 и 100	11000
200	100, 125, 160 и 200	11000
350	200, 225, 260, 300 и 350	13000
600	350, 430, 500 и 600	20000

Методические указания

1. Определение номинального тока плавкой вставки.

Плавкая вставка предохранителя не должна отключать двигатель при кратковременных перегрузках его пусковыми токами. Для двигателей серии 4А величина пускового тока

$$I_n = 7 I_{н.дв}.$$

Для защиты одиночных двигателей в большинстве практических случаев номинальный ток плавкой вставки

рекомендуется определять из соотношения

$$I_{вст.н} = \frac{I_n}{2,5}.$$

В соответствии с рассчитанным значением $I_{вст.н}$ из таблицы 8 выбирается номинальный ток плавкой вставки – ближайшее большее значение. В соответствии с выбранным значением $I_{вст.н}$ определяется исполнение предохранителя (по номинальному току).

2. Определение пограничного тока плавкой вставки.

Под пограничным током понимают ток, при котором сгорает плавкая вставка, достигнув температуры плавления. Расчетный пограничный ток $I_{погр}$ для медных вставок берется больше номинального тока, и составляет

$$I_{погр} = (1,6...1,8)I_{вст.н}.$$

3. Определение диаметра медной плавкой вставки.

Исходя из баланса подводимого и отводимого от плавкой вставки мощностей диаметр плавкой вставки определяется из уравнения

$$d = \sqrt[3]{\frac{4I_{погр}^2(1 + \alpha_c T_{пл})\rho_0}{\pi^2 k_T (T_{пл} - T_{окр})}},$$

где $\rho_0 = 1,75 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ – удельное сопротивление меди;

$\alpha_c = 0,004 \text{ град}^{-1}$ – температурный коэффициент сопротивления для меди;

$T_{пл} = 1083^\circ \text{C}$ – температура плавления меди;

$T_{окр} = 40^\circ \text{C}$ – температура окружающей среды;

$k_T = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/см}^2 \text{ град}$ – коэффициент теплопередачи с поверхности вставки.

Литература: [3], с. 229...242

Задача 4

Определить токи срабатывания и отпускания, а также коэффициент возврата нейтрального экранированного герконового реле, содержащего обмотку управления с числом витков W и один симметричный замыкающий магнитоуправляемый контакт, рисунок 2, (обмотка управления не показана).

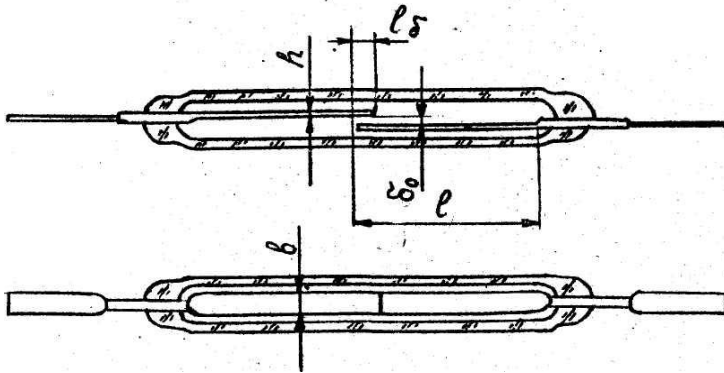


Рисунок 2 – Нейтральное экранированное герконовое реле

Исходные данные для расчетов

Размеры электродов геркона: длина $l = 20 \text{ мм}$; ширина $b = 2,6 \text{ мм}$; толщина $h = 0,5 \text{ мм}$. Жесткость электродов $c = 1,66 \cdot 10^3 \text{ Н/м}$. Длина перекрытия в рабочем зазоре $l_\delta = 1,2 \text{ мм}$. Величина конечного рабочего зазора $\delta_{\text{мин}} = 0,01 \text{ мм}$. Коэффициент симметрии геркона $k_{\text{см}} = 0,5$. Коэффициент магнитной проводимости путем рассеяния $k_{\text{рас}} = 0,1$. Коэффициент магнитной проводимости магнитопровода $k_{\text{см}} = 2$. Величина начального рабочего зазора δ_0 и число витков обмотки управления W приведены в таблице 9 и 10.

Таблица 9

Параметр	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\delta_0, мм$	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,22	0,23	0,24	0,25
W , витков	15000	18000	20000	22000	25000	30000	15000	18000	20000	25000

Таблица 10

Параметр	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\delta_0, мм$	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35
W , витков	15500	18500	20500	22500	25500	30500	15500	18500	20500	25500

Методические указания

1. МДС срабатывания реле определяется уравнением

$$F_{cp} = (IW)_{cp} = \frac{2\delta_0}{3} \left(\frac{1}{k_{cm}} + 1 + \frac{k_{pac}}{k_{cm}} \right) \cdot \sqrt{\frac{2\delta_0}{3} \left(1 + \frac{1}{k_{cm} + k_{pac}} \right) \frac{ck_{cm}}{\mu_0 b l \delta}}$$

2. Ток срабатывания реле

$$I_{cp} = \frac{F_{cp}}{W}$$

3. МДС отпускания реле

$$F_{omn} = (IW)_{omn} = \frac{\delta_0 / \delta_{мин} + k_{cm} + k_{pac}}{k_{cm}} \cdot \delta_{мин} \cdot \sqrt{\frac{2c(\delta_0 - \delta_{мин})k_{cm}}{\mu_0 b l \delta}}$$

4. Ток отпускания реле

$$I_{omn} = \frac{F_{omn}}{W}$$

5. Коэффициент возврата реле

$$k_e = \frac{I_{omn}}{I_{cp}}$$

Задача 5

В пускорегулировочном реостате используются резисторы, выполненные из константановой проволоки, намотанной на фарфоровый цилиндр, имеющий желобки для укладки константановой проволоки. Диаметр цилиндров $D = 36 \text{ мм}$, число желобков n , активная длина цилиндра l , масса цилиндра G_k , диаметр проволоки d .

Определить сопротивление и нагрузочную способность резистора при длительном режиме работы, а также постоянную времени нагрева, коэффициент перегрузки и допустимый ток перегрузки для кратковременного режима работы длительностью $t_{кр}$.

Данные для расчетов приведены в таблицах 11 и 12.

Таблица 11

Параметр	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d, \text{ мм}$	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2
$t_{кр}, \text{ с}$	10	12	15	18	20	11	14	17	22	25
n	30					40				
$l, \text{ мм}$	100					145				
$G_k, \text{ г}$	160					260				

Таблица 12

Параметр	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$d, \text{ мм}$	0,85	1,05	1,25	1,45	1,65	1,45	1,65	1,85	2,05	2,25
$t_{кр}, \text{ с}$	11	13	14	17	20	12	15	18	20	25
n	35					45				
$l, \text{ мм}$	150					165				
$G_k, \text{ г}$	180					280				

Методические указания

1. Сопротивление резистора

$$R = \rho \frac{l_{np}}{S_{np}} = \rho_0 (1 + \alpha T) \frac{4 D n}{d^2},$$

где $\rho_0 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ – удельное сопротивление константана при 0°C ;

$\alpha = 3 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ – температурный коэффициент сопротивления для константана;

$l_{np} = \pi D n$ – длина проволоки, укладываемой в желобки цилиндра, см;

S_{np} – сечение проволоки, см^2 ;

$T = 500^\circ\text{C}$ – допустимая температура нагрева константановой проволоки.

2. Нагрузочная способность резистора при длительном режиме работы оценивается допустимой величиной тока

$$I_{\text{дл}} = \sqrt{\frac{k_m F_{np} \tau_{\text{дон}}}{R}},$$

где $k_m = 0,02 \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности проволоки;

$F_{np} = \pi d l_{np} = \pi^2 d D n$ – поверхность проволоки, см^2 ;

$\tau_{\text{дон}} = 400^\circ\text{C}$ – допустимое превышение температуры константановой проволоки над температурой окружающей среды внутри реостата.

3. Постоянная времени нагрева резистора при кратковременном режиме работы

$$T_n = \frac{\beta_k c_k G_k + c_0 G_0}{k_m F_k},$$

где $\beta_k = 0,35$ – коэффициент, учитывающий участие фарфорового цилиндра в теплоотводе от проволоки в

кратковременном режиме работы;

$c_k = 1,05 \text{ Дж}/(\text{г} \cdot ^\circ \text{C})$ – удельная теплоемкость фарфора;

$c_0 = 0,4 \text{ Дж}/(\text{г} \cdot ^\circ \text{C})$ – удельная теплоемкость константа;

$G_0 = \gamma_0 S_{np} l_{np} = (\gamma_0 \pi^2 d^2 D n)/4$ – масса проволоки резистора;

$\gamma_0 = 8,9 \text{ г}/\text{см}^3$ – плотность константана;

$k_m = 0,0023 \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot ^\circ \text{C})$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности фарфорового цилиндра;

$F_k = \pi D l$ – наружная боковая поверхность охлаждения цилиндра, см .

4. Коэффициент перегрузки резистора по току в кратковременном режиме работы

$$p = \frac{1}{\sqrt{1 - e^{-(t_{кр}/T_H)}}},$$

5. Допустимый ток перегрузки резистора в кратковременном режиме работы

$$I_{кр} = p \cdot I_{дл}.$$

Литература: [1], с. 78...79; 294...304

Библиографический список

1. Чунихин А.А. Электрические аппараты. М.: Энергоатомиздат, 1966.
2. Родштейн Л.А. Электрические аппараты. Л.: Энергоиздат, 1981.
3. Таев И.О. Электрические аппараты управления. М.: Высш. школа, 1984.
4. Электрические и электронные аппараты / Под ред. Ю.К.Розанова. М.: Энергоатомиздат, 1998.
5. Основы теории электрических аппаратов / Под ред. И.С.Таева. М.: Высш. школа, 1987.
6. Таев И.О. Электрические контакты и дугогасительные устройства аппаратов низкого напряжения. М.: Энергия, 1972.
7. Электрические аппараты высокого напряжения / Под ред. Г.Н.Александрова. Л.: Энергоатомиздат, 1989.