

При оценочных расчетах параметры указанных элементов могут быть определены по $S_{ном тр}$ по соотношениям таблицы 8.2. Точные их значения, а также сведения об электрооборудовании, приведены в разделах 2–7.

Таблица 8.1

Характеристики элементов электрической сети промышленных предприятий (сопротивления приведены к напряжению 10 кВ)

Параметр	Номинальная мощность трансформатора, $S_{ном тр}$, кВА						
	160	250	400	630	1000	1600	2500
R_T , Ом	11,4	6,5	3,4	2,36	1,22	0,7	0,4
X_T , Ом	25,7	16,8	10,7	9,33	5,36	3,36	2,16
$\Delta P_{кз}$, кВт	2,65	3,7	5,5	8,5	12,02	18	25
$\Delta P_{ст}$, кВт	0,73	0,945	1,2	1,56	2,45	3,3	4,6
$\Delta Q_{ст}$, кВАр	3,84	5,75	8,4	12,6	14	20,8	25
F_k , мм ²	35	35	35	35	50	70	120
$r_{0к}$, Ом/км	0,92	0,92	0,92	0,92	0,64	0,46	0,26
$x_{0к}$, Ом/км	0,088	0,088	0,088	0,088	0,082	0,079	0,076
Шинопровод	ШРА-73	ШРА-73	ШРА-74	ШМА-73	ШМА-73	ШМА-68Н	ШМА-68Н
$r_{0ш}$, Ом/км	125	81,25	53,13	37,5	19,38	16,88	8,13
$x_{0ш}$, Ом /км	93,75	62,5	46,9	43,75	26,88	14,38	12,5

Таблица 8.2

Уравнения аппроксимации зависимостей параметров элементов электрической сети системы электроснабжения при изменении $S_{ном тр}$ от 160 до 2500 кВА

Параметр	Точное выражение
$r_{0к}$, Ом/км	$304 \cdot S_{ном тр}^{-0,89}$
$x_{0к}$, Ом/км	$0,1209 \cdot S_{ном тр}^{-0,06}$
$r_{0ш}$, Ом/км	$16552 \cdot S_{ном тр}^{-0,96}$
$x_{0ш}$, Ом /км	$4112 \cdot S_{ном тр}^{-0,74}$
R_T , Ом	$5109 \cdot S_{ном тр}^{-1,21}$
X_T , Ом	$2270 \cdot S_{ном тр}^{-0,88}$
$\Delta P_{кз}$, кВт	$0,0096 \cdot S_{ном тр} + 1,78$
$\Delta P_{ст}$, кВт	$0,0017 \cdot S_{ном тр} + 0,56$

8.2. Выбор электрооборудования напряжением до 1000 В

8.2.1. Защита электроприемников плавкими предохранителями

Плавкие предохранители напряжением до 1000 В выбирают по номинальному напряжению $U_{ном\ пред}$, номинальному току плавкой вставки $I_{ном\ вст}$ и номинальному току предохранителя $I_{ном\ пред}$.

При выборе по номинальному напряжению должно выполняться соотношение:

$$U_{ном\ пред} \geq U_{ном\ уст} \quad (8.1)$$

Плавкие предохранители должны защищать электроприемник (ЭП) от токов КЗ и не отключать цепь при их включении (пуске). При защите одиночных электродвигателей предохранителями с малой тепловой инерцией эти требования выполняются при соблюдении следующих условий:

$$I_{ном\ вст} \geq I_{ном\ дв} , \quad (8.2)$$

$$I_{ном\ вст} \geq \frac{I_{пуск.дв}}{\alpha} \quad (8.3)$$

где $I_{ном.дв}$, $I_{пуск.дв}$ – номинальный и пусковой ток электродвигателя, α – коэффициент кратковременной тепловой перегрузки вставки, учитывающий условия пуска двигателя.

Для легкого пуска (нечастые пуски и (или) время разгона не более 10 сек) $\alpha = 2,5$, при тяжелом – частые и (или) длительные пуски – $\alpha = 1,6 \div 2,0$.

При защите линии, питающей группу электродвигателей или смешанную нагрузку, выбор плавкой вставки предохранителя выполняется по соотношениям:

$$I_{ном.вст} \geq I_{расч} , \quad (8.4)$$

$$I_{ном\ вст} \geq \frac{I_{пик}}{2,5} \quad (8.5)$$

где $I_{расч}$, $I_{пик}$ – расчетный и пиковый ток защищаемой линии.

Номинальный ток плавкой вставки для защиты ответвления, идущего к ЭП без пускового тока, выбирается по его номинальному току из соотношения:

$$I_{ном\ вст} \geq I_{ном\ ЭП} , \quad (8.6)$$

а для защиты ответвления к сварочному аппарату – из соотношения:

$$I_{ном.вст} \geq 1,2 \cdot I_{св} \cdot \sqrt{ПВ} , \quad (8.6)$$

где $I_{св}$ – номинальный ток сварочного трансформатора, принимаемый по каталогу для повторно-кратковременного режима; $ПВ$ –

продолжительность включения, отн.ед., или может приниматься равным допустимому току проводника, питающего этот аппарат.

Плавкие вставки для защиты трехфазных конденсаторных установок выбираются из соотношения:

$$I_{\text{ном вст}} \geq \frac{n Q_{\kappa}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} \geq \frac{Q_{\text{ном БК}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}, \quad (8.8)$$

$$I_{\text{ном вст}} \leq \frac{1,6 n Q_{\kappa}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} \leq \frac{1,6 Q_{\text{ном БК}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}, \quad (8.9)$$

где Q_{κ} – номинальная мощность одного конденсатора; n – их общее количество в батарее (во всех фазах); $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение сети.

Плавкие вставки с большой тепловой инерцией выбираются по условию (8.2) или (8.4).

Выбранные по приведенным соотношениям номинальные токи плавких вставок предохранителей должны соответствовать:

- кратностям допустимых длительных токов (табл. 8.7);
- кратностям токов однофазного КЗ в сетях 0,4 кВ с глухозаземленной нейтралью (табл. 6.18).

При выборе предохранителя по его номинальному току должно выполняться условие:

$$I_{\text{ном пред}} \geq I_{\text{ном вст}}. \quad (8.10)$$

Если в сети установлено несколько последовательно включенных предохранителей, то при КЗ в какой либо точке сети срабатывать должен ближайший к точке короткого замыкания. При защите сетей предохранителями НПН и ПН2 селективность действия защиты будет выполняться, если между номинальным током плавкой вставки, защищающей головной участок сети I_2 , и номинальным током плавкой вставки на ответвлении к потребителю I_0 (рис. 8.2) выдерживаются определенные соотношения.

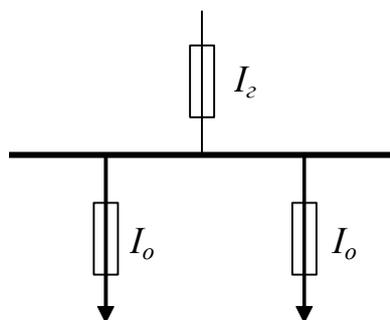


Рис. 8.2. Схема защиты сети предохранителями

При токах перегрузки 180 ... 250% $I_2 > I_o$ хотя бы на одну ступень стандартной шкалы номинальных токов плавких вставок.

При КЗ селективность защиты предохранителями типа НПН обеспечивается, если выдерживаются соотношения, приведенные в таблице 8.3.

Таблица 8.3

Соотношения между токами, обеспечивающие селективность защиты предохранителями НПН

$I_{кз} / I_o$, не менее	50	100	200
I_2 / I_o	2,0	2,5	3,3

Примечание: $I_{кз}$ – ток КЗ в начале защищаемого участка сети.

Соотношения между номинальными токами плавких вставок I_T и I_o для предохранителей типа ПН2, обеспечивающие надежную селективность, даны в таблице 8.4.

Таблица 8.4

Номинальные токи последовательно включенных предохранителей ПН2, обеспечивающих надежную селективность защиты

Номинальный ток меньшей плавкой вставки I_o , А	Номинальный ток большей плавкой вставки I_2 , А, при отношении $I_{кз}/I_o$			
	10	20	50	100 и более
30	40	50	80	120
40	50	60	100	120
50	60	80	120	120
60	80	100	120	120
80	100	120	120	150
100	120	120	150	150
120	150	150	250	250
150	200	200	250	250
200	250	250	300	300
250	300	300	400	Более 600
300	400	400	Более 600	–
400	500	Более 600	–	–

Примечание: $I_{кз}$ – ток короткого замыкания в начале защищаемого участка сети.

Предохранители характеризуются также предельным током отключения при данном напряжении. Под этим током понимается наибольшее действующее значение периодической составляющей тока КЗ в любой фазе в первый период протекания тока. Наибольшая отключающая способность предохранителей ПН2 при напряжении 380 В приведена в таблице 8.5.

Таблица 8.5

Наибольшая отключающая способность предохранителей ПН2

Тип предохранителя	Ток наибольшей отключающей способности, кА
ПН2-100	100
ПН2-250	100
ПН2-400	40
ПН2-600	25

Предохранители НПН2-60 с номинальным током до 100 А имеют наибольший отключающий ток до 60 кА.

8.2.2. Защита электрических сетей и электроприемников автоматическими выключателями

Выбор автоматов для защиты сетей и электроприемников производится по рассматриваемым ниже условиям на основании технических характеристик, приведенных в разделе 4.3.2:

1. При выборе автомата по номинальному напряжению должно выполняться соотношение: $U_{ном авт} \geq U_{ном уст}$.
2. Номинальный ток автомата и его расцепителя не должен быть меньше расчетного тока защищаемой линии $I_{расч}$ или номинального тока электроприемника $I_{ном эп}$. При этом номинальные токи расцепителей должны быть минимально возможными.
3. Для того, чтобы ЭП или участок сети не отключались при пуске или кратковременной перегрузке ($I_{пуск}$, $I_{тик}$), аппарат защиты должен быть выбран с учетом кратковременных перегрузок в нормальном или послеаварийном режиме. Критерии выбора для автоматов различных типов приведены в таблице 8.6. Аппараты защиты для ЭП, не имеющих пусковых токов, выбираются без учета кратковременных перегрузок.
4. Уставки последовательно включенных аппаратов защиты должны быть проверены на селективность действия, чтобы при каждом нарушении нормального режима отключался только поврежденный участок, но не срабатывали защитные аппараты в высших звеньях. Проверку селективности действия защиты производят по типовым время-токовым характеристикам примененных аппаратов (см. раздел 4.3.2) с учетом разброса характеристик (15–25% от среднего значения) и по рассчитанным токам КЗ в защищаемой сети построением карты селективности действия защиты.
5. Проверка тока срабатывания расцепителя на отключение тока однофазного КЗ в сетях с глухозаземленной нейтралью выполняется в соответствии с критериями, указанными в таблице 6.18.

Таблица 8.6

Расчетные выражения для выбора аппаратов защиты в силовых и осветительных сетях [11]

Аппарат защиты	Расчетные формулы			
	Силовые сети		Осветительные сети	
	Линии к одиночным ЭП	Линии к группам ЭП	Лампы накаливания и люмин.	Лампы ДРЛ, ДРИ
Тепловой расцепитель автоматического выключателя с регулируемой обратной зависимостью от тока характеристикой	$I_{сраб.тепл.нр} \geq 1,15 * I_{ном ЭП}$	$I_{сраб.тепл.нр(рег)} \geq 1,1 * I_{расч}$	$I_{сраб.тепл.нр(рег)} \geq I_{расч}$	$I_{сраб.тепл.нр(рег)} \geq 1,3 * I_{расч}$
Тепловой расцепитель автоматического выключателя с регулируемой обратной зависимостью от тока характеристикой	$I_{сраб.тепл.рег} \geq 1,25 * I_{ном ЭП}$			
Комбинированный расцепитель автоматического выключателя с регулируемой обратной зависимостью от тока характеристикой	$I_{сраб.комб.рег} \geq 1,25 * I_{ном ЭП}$	$I_{сраб.комб.рег} \geq 1,1 * I_{расч}$	$I_{сраб.комб.рег} \geq I_{расч}$	$I_{сраб.комб.рег} \geq 1,3 * I_{расч}$
	$I_{уст.эм} \geq 1,2 * I_{пуск}$	$I_{уст.эм} \geq 1,25 * I_{ник}$	—	—
Комбинированный расцепитель автоматического выключателя с нерегулируемой обратной зависимостью от тока характеристикой	$I_{сраб.комб.нр} \geq 1,15 * I_{ном ЭП}$	$I_{сраб.комб.нр} \geq 1,1 * I_{расч}$	$I_{сраб.комб.нр} \geq I_{расч}$	$I_{сраб.комб.нр} \geq 1,3 * I_{расч}$
	$I_{уст.эм} \geq 1,2 * I_{пуск}$	$I_{уст.эм} \geq 1,5 * I_{ник}$	—	—

* при установке автоматических выключателей в шкафу и для линий к силовым ЭП, не имеющих в своем составе электродвигателей, повышающие коэффициенты 1,25; 1,15 и 1,1 не вводятся.

Примечания: 1. Выражения даны для автоматических выключателей с кратностью тока отсечки не менее 10.

2. Приняты следующие обозначения: $I_{сраб.тепл.нр}$, $I_{сраб.тепл.рег}$, $I_{сраб.комб.нр}$, $I_{сраб.комб.рег}$ – номинальный ток нерегулируемого и регулируемого теплового или комбинированного расцепителя автомата; $I_{сраб.эм}$ – ток уставки (срабатывания) электромагнитного расцепителя мгновенного действия.

3. Для регулируемых расцепителей под $I_{сраб.тепл.рег}$ следует принимать не номинальный ток расцепителя, а его уставку. Например, для автомата АЕ-2046М с номинальным током расцепителя 63 А и пределами регулирования 0,9÷1,15, значение $I_{сраб.тепл.рег}$ можно принять равным $I_{сраб.тепл.рег} = 0,9 \cdot 63 = 56,7$ А.

6. Предельный ток, отключаемый выключателем $I_{откл}$, должен превышать ток трехфазного короткого замыкания:

$$I_{откл} > I_{кз}^{(3)}. \quad (8.11)$$

7. Динамическая стойкость токам трехфазного КЗ обеспечивается при выполнении соотношения:

$$i_{дин} > i_{уд}^{(3)}, \quad (8.12)$$

где $i_{дин}$ – ток электродинамической стойкости, $i_{уд}^{(3)}$ – ударный ток трехфазного короткого замыкания.

8.2.3. Выбор магнитных пускателей

Магнитные пускатели выбирают по номинальному току управляемых ими электроприемников, а тепловые элементы реле, встраиваемые в пускатели для защиты от перегрузки, – по выражениям таблицы 8.6 как для тепловых расцепителей автоматических выключателей. Кроме этого, выбор магнитных пускателей производится:

– по напряжению установки:

$$U_{уст} \leq U_{ном\ пуск}; \quad (8.13)$$

– по категории применения.

8.2.4. Выбор рубильников

Выбор рубильников производится:

– по напряжению установки:

$$U_{уст} \leq U_{ном\ руб}; \quad (8.14)$$

– по току нагрузки:

$$I_{ном\ руб} \geq I_{расч}; \quad (8.15)$$

– по конструктивному исполнению;

– по электродинамической стойкости:

$$i_{уд}^{(3)} \leq i_{дин}; \quad (8.16)$$

– по термической стойкости:

$$B_k \leq I_{терм}^2 \cdot t_{терм}. \quad (8.17)$$

Номинальный ток $I_{ном\ руб}$, предельный сквозной (или динамический) ток $i_{дин}$, ток и время термической стойкости $I_{терм}$, $t_{терм}$ приводятся в каталогах и справочниках. Определение расчетного импульса квадратичного тока короткого замыкания B_k рассматривается при расчете токов короткого замыкания.

8.2.5. Выбор сечений проводов и кабелей по условиям нагрева и защиты

Сечение проводов и кабелей напряжением до 1000 В по условию нагрева определяют в зависимости от расчетного значения допустимой длительной нагрузки при нормальных условиях прокладки, определенной как большая величина из двух соотношений:

- по условию нагрева длительным расчетным током:

$$I_{доп} \geq I_{дл}, \quad (8.18)$$

где $I_{доп}$ – допустимый ток кабеля или провода в нормальном режиме, его значения для различных типов проводников приведены в разделах 3.2 и 3.3; $I_{дл}$ – длительный расчетный ток линии: для ответвления к одиночному ЭП – это номинальный ток электроприемника, а для линии, питающей группу электроприемников, – расчетный ток линии.

- по условию соответствия выбранному аппарату максимальной токовой защиты:

$$I_{доп} \geq k_{защ} \cdot I_{защ}, \quad (8.19)$$

где $I_{защ}$ – ток уставки срабатывания защитного аппарата; $k_{защ}$ – кратность длительно допустимого тока для провода или кабеля по отношению к току срабатывания защитного аппарата.

Значения $k_{защ}$ и $I_{защ}$ определяют из таблицы 8.7 в зависимости от характера сети, типа изоляции проводов и кабелей, условий окружающей среды.

Сети разделяются на две группы:

- сети, которые должны быть защищены от перегрузки и токов короткого замыкания;
- сети, защищаемые только от токов короткого замыкания.

Согласно ПУЭ, защите от перегрузки и токов КЗ подлежат:

- сети внутри помещений, выполненные открыто проложенными, незащищенными изолированными проводниками с горючей изоляцией;
- сети внутри помещений, выполненные защищенными проводниками, проложенными в трубах, в несгораемых строительных конструкциях и т.п., в следующих случаях:
 - осветительные сети в жилых и общественных зданиях, а также в пожароопасных производственных помещениях;
 - силовые сети, когда по условиям технологического процесса может возникнуть длительная перегрузка;
 - сети всех видов во взрывоопасных помещениях независимо от условий технологического процесса.

Все остальные сети защищают от токов короткого замыкания.

Таблица 8.7

Минимальные кратности допустимых токовых нагрузок на провода и кабели по отношению к номинальным токам, токам трогания или токам уставки защитных аппаратов

Тип защитного аппарата и значения принимаемого тока защиты $I_{защ}$	Коэффициент защиты $k_{защ}$ для сетей			
	с защитой от перегрузки			Без защиты от перегрузки
	Проводники с резиновой или аналогичной по тепловым характеристикам изоляцией		Кабели с бумажной изоляцией и с изоляцией из вулканизированного полиэтилена	
	Взрыво- и пожароопасные помещения, жилые, торговые и т.п. помещения	Невзрыво- и непожароопасные производственные помещения		
Номинальный ток плавкой вставки предохранителя: $I_{защ} = I_{ном\ вст}$	1,25	1	1	0,33
Ток уставки срабатывания автоматического выключателя, имеющего только максимальный мгновенно действующий расцепитель: $I_{защ} = I_{уст.эм.}\ при\ КЗ$	1,25	1	1	0,22
Номинальный ток расцепителя выключателя с регулируемой обратнoзависимой от тока характеристикой (независимо от наличия или отсутствия отсечки): $I_{защ} = I_{ном\ расц.}$	1	1	1	1
Ток трогания расцепителя автоматического выключателя с регулируемой обратнoзависимой от тока характеристикой (при наличии отсечки): $I_{защ} = I_{уст}\ при\ перегрузке$	1	1	0,8	0,66

Сечения проводов и кабелей для ответвления к двигателю с короткозамкнутым ротором выбирают в соответствии с условием (8.18), в котором длительный расчетный ток линии равен: для невзрывоопасных помещений – номинальному току двигателя, а для взрывоопасных – $1,25 \cdot I_{ном}$ двигателя напряжением до 1000 В.

Выбранное сечение должно быть проверено по условию (8.19) как для сетей, защищаемых только от короткого замыкания.

Во всех случаях должно быть обеспечено надежное отключение защитными аппаратами однофазного короткого замыкания, происшедшего в наиболее отдаленных точках сети. Это условие выполняется, если кратность тока однофазного КЗ в сетях с глухозаземленной нейтралью не менее, указанных в таблице 6.18.

При прокладке нескольких кабелей и более четырех проводов в одной трубе, траншее, лотке, коробе в расчетные формулы (8.18) и (8.19) вводится поправочный коэффициент на условия прокладки $k_{прокл}$:

$$I_{доп} \geq \frac{I_{дл}}{k_{прокл}}, \quad (8.20)$$

$$I_{доп} \geq \frac{I_{защ} \cdot k_{защ}}{k_{прокл}}, \quad (8.21)$$

Численные значения $k_{прокл}$ даны в разделах 3.2 и 3.3.

В условиях двухтрансформаторных подстанций и/или нескольких кабелей в одной линии выбранное сечение проводника по условиям нагрева длительным током проверяется по нагреву током послеаварийного режима $I_{расч.ав}$:

$$I_{доп} \geq \frac{I_{расч.ав}}{k_{прокл} \cdot k_{пер}}, \quad (8.22)$$

где $k_{пер}$ – коэффициент допустимой кратковременной перегрузки кабелей и проводов (раздел 3.4).

Из двух условий – (8.18), (8.19) или (8.20), (8.21) – выбирается сечение проводника, удовлетворяющее обоим. Если допустимая токовая нагрузка, найденная по условию соответствия выбранному аппарату максимальной токовой защиты, не совпадает с данными таблиц допустимых токовых нагрузок (разделы 3.2, 3.3), разрешается применение проводника меньшего сечения. Однако это сечение не должно быть меньше требуемого при определении допустимой нагрузки по условию нагрева длительным расчетным током.

8.2.6. Выбор и проверка шинпроводов

Сечение шинпроводов выбирают по экономической целесообразности и длительно допустимому току:

$$I_{доп} \geq I_{раб.макс}, \quad (8.23)$$

где $I_{раб.макс}$ – максимальный рабочий ток цепи, в которую включен шинпровод (значение $I_{расч}$).

Максимальный рабочий ток цепи возникает:

- для цепей параллельных линий – при отключении одной из них;
- для цепей трансформаторов – при использовании их перегрузочной способности.

Для прямоугольных шин длительно допустимый ток:

$$I_{дон} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot I_{дон.о}, \quad (8.24)$$

где $I_{дон.о}$ – длительно допустимый ток одной полосы при температуре шины 70°C , температуре окружающей среды 25°C и расположении шин вертикально (на ребро), определяемый по таблицам 3.2–3.4; k_1 – поправочный коэффициент при расположении шин горизонтально, $k_1=0,95$; k_2 – поправочный коэффициент длительно допустимого тока для многополосных шин (табл. 8.8); k_3 – поправочный коэффициент для шин при температуре окружающей среды (воздуха), отличающейся от 25°C (табл. 8.9).

Таблица 8.8

Поправочный коэффициент длительно допустимого тока для многополосных шин k_2

Сечение шин, мм	k_2 для шин					
	двухполосных		трехполосных		четыреполосных	
	<i>Cu</i>	<i>Al</i>	<i>Cu</i>	<i>Al</i>	<i>Cu</i>	<i>Al</i>
60×5	1,75	1,75	—	—	—	—
60×6	1,7	1,75	2,3	2,45	2,9	3,1
60×8	1,7	1,7	2,25	2,4	2,8	3
60×10	1,7	1,7	2,25	2,4	2,7	2,95
80×6	1,7	1,75	2,25	2,4	2,8	3
80×8	1,65	1,7	2,2	2,35	2,7	2,9
80×10	1,6	1,65	2,1	2,3	2,6	2,9
100×6	1,65	1,7	2,2	2,35	2,7	2,95
100×8	1,6	1,7	2,1	2,3	2,6	2,9
100×10	1,55	1,6	2,05	2,25	2,5	2,8

Таблица 8.9

Поправочный коэффициент k_3

Температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$	k_3	Температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$	k_3
10	1,15	30	0,94
15	1,1	35	0,88
20	1,05	40	0,82
25	1,0	45	0,75

Чтобы не было превышения допустимой величины потерь напряжения в условиях эксплуатации, шинопроводы рассчитывают по потере напряжения:

$$U_2 = U_1 - I_{расч} \cdot (R \cdot \cos\varphi + X \cdot \sin\varphi), \quad (8.25)$$

где U_1 и U_2 – фазные напряжения в начале и конце шинопровода; R и X – активное и индуктивное сопротивления фазы шинопровода; φ – угол сдвига между током и фазным напряжением.

Для комплектных распределительных шинопроводов в таблице 2.15 приведены потери напряжения на 100 м их длины, а в таблице 5.5 – потери напряжения в %/(А·км).

Проверку шин производят:

- на устойчивость к электродинамическому воздействию токов КЗ и дополнительным механическим усилиям, возникающих в шинах от собственных колебаний (механический резонанс);
- на термическую стойкость к токам короткого замыкания.

Методика проверки подробно изложена в [2, 14].

8.3. Кабельные линии напряжением 6/10 кВ

Сечение кабельных линий напряжением 6/10 кВ выбирают по нагреву расчетным током, проверяют по термической стойкости к токам КЗ, потерям напряжения в нормальном и послеаварийном режимах.

На время ликвидации аварий перегрузки допускаются в течение 5 суток. Для кабелей с полиэтиленовой и поливинилхлоридной изоляцией перегрузки на время ликвидации аварий допустимы соответственно до 10 и 15%, при этом указанная перегрузка допускается на время максимумов нагрузки продолжительностью не более 6 часов в сутки в течение 5 суток, если в остальное время этих суток нагрузка не превышала номинальную.

Кабели, защищенные плавкими токоограничивающими предохранителями, на термическую стойкость к токам КЗ не проверяют. В остальных случаях термически стойкое к токам КЗ сечение определяют по выражениям (6.40). За стандартное термически стойкое сечение принимают ближайшее к расчетному меньшее сечение.

Выбранное сечение проверяют по потере напряжения по выражению:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I_{расч} \cdot l \cdot (r \cos\varphi + x \sin\varphi), \quad (8.26)$$

где $I_{расч}$ – расчетный ток линии, А; r , x – погонные активное и реактивное сопротивления линий, Ом/км; l – длина линии, км; $\cos\varphi$ и $\sin\varphi$ соответствуют коэффициенту мощности ($\text{tg}\varphi$) в конце линии.

Пример. Выбрать сечение кабельных линий на напряжение 10 кВ, питающих потребителей первой категории и имеющих расчетную нагрузку $S_{расч} = 5500$ кВА. Значение тока КЗ на шинах источника питания равно 8,45 кА, приведенное время действия короткого замыкания составляет 1,25 сек. Длина питающей линии $l = 0,5$ км, $\cos\varphi = 0,8$; время максимальных потерь $\tau_{max} = 5000$ часов. Подключение кабельных линий к РУ осуществляется через масляные выключатели.

Решение.

1. Для потребителей первой категории с целью обеспечения требуемой надежности питания принимаем две параллельно проложенные в траншее кабельные линии с расстоянием между ними 100 мм.
2. Определяем расчетные токи в нормальном $I_{расч}$ и аварийном $I_{расч.ав}$ режимах (когда одна из линий отключена):

$$I_{расч} = \frac{S_{расч}}{n\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{5500}{2\sqrt{3} \cdot 10} = 159 \text{ А};$$

$$I_{расч.ав} = \frac{S_{расч}}{n\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{5500}{1\sqrt{3} \cdot 10} = 318 \text{ А};$$

3. Выбираем (раздел 2.3) кабель марки ААБл – с алюминиевыми жилами, изоляцией жил из пропитанной бумаги в алюминиевой оболочке, бронированный стальными лентами, с подушкой из битума.
4. Выбираем сечение жил кабельных линий, учитывая допустимую перегрузку в аварийном режиме и снижение допустимого тока в нормальном режиме при прокладке нескольких кабелей в одной траншее. Пусть время ликвидации аварии равно 6 часов, а коэффициент загрузки линий в нормальном режиме равен 0,6. В соответствии с таблицей 3.14 допустимая перегрузка составляет 1,25. Коэффициент снижения токовой нагрузки $k_{сн}$ из таблицы 3.13 составляет 0,9.

Допустимый ток кабельных линий определяем из соотношения:

$$1,25 \cdot 0,9 I_{дон} \geq I_{расч.ав};$$

$$I_{дон} \geq I_{расч.ав} / (1,25 \cdot 0,9);$$

$$I_{дон} \geq 282 \text{ А}.$$

По таблице 3.8 принимаем сечение жил трехфазного кабеля равным 185 мм^2 ($I_{дон} = 310 \text{ А}$).

5. Определяем по выражению (6.40) термически стойкое к токам КЗ сечение кабеля S_{\min} , принимая по таблице 6.29 значение $C = 95 \text{ A} \cdot \text{с}^{0,5} / \text{мм}^2$:

$$S_{\min} \geq I_{\infty} \frac{\sqrt{t_{np}}}{C} = 8,45 \cdot 10^3 \frac{\sqrt{1,25}}{95} = 99,4 \text{ мм}^2$$

Ближайшее меньшее стандартное сечение по таблице 3.8 составляет 95 мм^2 .

6. На основании пунктов 4 и 5 выбираем сечение 185 мм^2 и определяем потери напряжения:

а) в нормальном режиме:

$$\Delta U_n = \sqrt{3} I_{расч} l (r \cos \varphi + x \sin \varphi) = \sqrt{3} \cdot 159 \cdot 0,5 (0,169 \cdot 0,8 + 0,0596 \cdot 0,6) = 23,5 \text{ В};$$

б) в аварийном режиме:

$$\Delta U_{ав} = \sqrt{3} I_{расч,ав} l (r \cos \varphi + x \sin \varphi) = \sqrt{3} \cdot 318 \cdot 0,5 (0,169 \cdot 0,8 + 0,0596 \cdot 0,6) = 47 \text{ В},$$

где r и x принимаем по таблице 6.13.

Из расчетов видно, что потери напряжения в линии незначительны, следовательно, напряжение у потребителей практически не будет отличаться от номинального.

7. Определяем потери мощности в линии при действительной нагрузке:

$$\Delta P = \Delta P_{ном} k_{загр}^2 = 3(I'_{дон})^2 r l k_{загр}^2 \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 279^2 \cdot 0,169 \cdot 0,5 \cdot 0,57^2 \cdot 10^{-3} = 6,34 \text{ кВт},$$

где $I'_{дон} = k_{сн} I_{дон} = 0,9 \cdot 310 = 279 \text{ А}$;

коэффициент снижения токовой нагрузки $k_{сн}$ принимаем из таблицы 3.13;

$$k_{загр} = \frac{I_{расч}}{I'_{дон}} = \frac{159}{279} = 0,57.$$

8. Потери электроэнергии в линии составляют:

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta P \cdot \tau_{\max} = 6,34 \cdot 5000 = 31700 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

8.4. Выбор высоковольтных аппаратов

Аппараты системы электроснабжения выбирают по условиям длительной номинальной работы, режиму перегрузок и режиму возможных коротких замыканий.

Выбранные по номинальным напряжению и току аппараты проверяются на динамическую и термическую стойкость к токам КЗ, на отключающую способность. Измерительные трансформаторы дополнительно проверяются на соответствие их работы требуемому классу точности. Указанные расчетные значения сравниваются с допустимыми для данного аппарата. Для обеспечения надежной безаварийной работы расчетные значения должны быть не менее допустимых, принятых по каталогу или паспорту аппарата.

Номинальное напряжение аппарата $U_{ном ап}$ должно соответствовать классу его изоляции с некоторым запасом по электрической прочности (порядка 10–15%):

$$U_{ном ап} \geq U_{ном}, \quad (8.27)$$

где $U_{ном}$ – номинальное напряжение установки, в которой используется аппарат.

Правильный выбор аппарата по номинальному току обеспечивает отсутствие опасных перегревов частей аппарата при его длительной работе в нормальном режиме. Это требование выполняется, если максимальный действующий рабочий ток цепи $I_{раб.мах}$ не превышает номинальный ток аппарата:

$$I_{раб.мах} \leq I_{ном ап}. \quad (8.28)$$

При работе аппарата в температурных условиях, отличающихся от принятой расчетной температуры окружающей среды, равной $+35^{\circ}\text{C}$, длительно допустимый ток аппарата I_{θ} рассчитывается по выражению:

$$I_{\theta} = I_{ном ап} \sqrt{\frac{\theta_{доп} - \theta_{о.с.}}{\theta_{доп} - 35}}, \quad (8.29)$$

где $\theta_{доп}$ – наименьшая допустимая температура отдельных частей аппарата; $\theta_{о.с.}$ – температура окружающей среды.

При $\theta_{о.с.} < 35^{\circ}\text{C}$ ток I_{θ} можно повысить относительно $I_{ном ап}$ на 0,5% на каждый градус понижения температуры против $+35^{\circ}\text{C}$, но не более чем на 20%.

Сопротивление токоограничивающих реакторов в зависимости от их назначения выбирается по требуемому снижению тока КЗ за реактором (для ограничения отключающей способности выключателя или для снижения сечения кабеля), по минимальному допустимому напряжению на шинах (для обеспечения самозапуска двигателей).

Выбор и проверка высоковольтного оборудования производится по соотношениям, приведенным в таблице 8.10.

Таблица 8.10

Условия выбора и проверки электрических аппаратов

Вид аппарата	Условия выбора и проверки
Трансформаторы подстанций	<ul style="list-style-type: none"> – по категории потребителей; – по графику нагрузки и подсчитанной средней и максимальной мощности; – по технико-экономическим показателям отдельных намеченных вариантов числа и мощности трансформаторов с учетом капитальных затрат и эксплуатационных расходов
Выключатели	$U_{ном ап} \geq U_{ном уст}; I_{ном ап} \geq I_{ном уст};$ $I_{ном откл} \geq I_{расч.о}; I'_{ном.откл} \geq I_{расч.о}/k_{АПВ};$ $S_{ном откл} \geq S_{расч.о}; S'_{ном.откл} \geq S_{расч.о}/k_{АПВ};$ $i_{ном дин} \geq i_{уд}; I_{ном тер.ст} \geq I_{\infty} \sqrt{t_{пр} / t_{ном тер.ст}}$
Разъединители	$U_{ном ап} \geq U_{ном уст}; I_{ном ап} \geq I_{ном уст};$ $i_{ном дин} \geq i_{уд}; I_{ном тер.ст} \geq I_{\infty} \sqrt{t_{пр} / t_{ном тер.ст}}$
Короткозамыкатели	$U_{ном ап} \geq U_{ном уст};$ $i_{ном дин} \geq i_{уд}; I_{ном тер.ст}^2 \cdot t_{ном тер.ст} \geq I_{\infty}^2 \cdot t_{пр}$
Отделители	$U_{ном ап} \geq U_{ном уст}; I_{ном ап} \geq I_{ном уст};$ $i_{ном дин} \geq i_{уд}; I_{ном тер.ст}^2 \cdot t_{ном тер.ст} \geq I_{\infty}^2 \cdot t_{пр}$
Плавкие предохранители	$U_{ном ап} = U_{ном уст}; I_{ном ап} \geq I_{ном уст};$ $k_{пер} \cdot I_{ном ап} \geq I_{раб.мах}; S_{ном откл} \geq S''; I_{ном откл} \geq I''$, где $k_{пер}$ – коэффициент возможной перегрузки аппарата (или проводника) при данном продолжительном режиме его работы; I'' – начальное действующее периодической составляющей тока КЗ; $S'' = \sqrt{3} \cdot U_{ном уст} \cdot I''$. Соответствие времятоковой характеристики предохранителя расчетным условиям защищаемой цепи. В соответствии с таблицей 8.11
Выключатели нагрузки	$U_{ном ап} = U_{ном уст}; I_{ном ап} \geq I_{ном уст};$ $i_{ном дин} \geq i_{уд}; I_{ном тер.ст} \geq I_{\infty} \sqrt{t_{пр} / t_{ном тер.ст}};$ $k_{пер} \cdot I_{ном пред} \geq I_{раб.мах}; S_{ном откл} \geq S''; I_{ном откл} \geq I''$
Разрядники	$U_{ном ап} \geq U_{ном уст}; U_{проб норм} \leq U_{доп расч};$ $U_{ост норм} \leq U_{доп расч}; i_{откл норм} \geq i_{сопр расч}$
Опорные изоляторы	$U_{ном ап} \geq U_{ном уст};$ $F_{доп} = 0,6 \cdot F_{разр} \geq F_{расч}$ (для одиночных изоляторов); $F_{доп} = 2 \cdot 0,5 \cdot F_{разр} \geq F_{расч}$ (для спаренных изоляторов)
Проходные изоляторы	$U_{ном ап} \geq U_{ном уст}; I_{ном ап} \geq I_{расч уст};$ $k_{пер} \cdot I_{ном.ап} \geq I_{раб.мах}; F_{доп} = 0,6 \cdot F_{разр} \geq F_{расч}$
Реакторы	$U_{ном ап} \geq U_{ном уст}; I_{ном ап} \geq I_{ном уст};$ $k_{пер} \cdot I_{ном ап} \geq I_{раб.мах}; i_{дин} \geq i_{уд};$ $I_{ном тер.ст/5сек} \geq I_{\infty} \sqrt{t_{пр} / 5}; x_p$ выбирается из условия необходимого ограничения токов КЗ и допустимой потери напряжения в реакторе в нормальном режиме

Вид аппарата	Условия выбора и проверки
Провода неизолированные	$S = S_{\text{эк}} = I_{\text{расч}}/J_{\text{эк}}; I_{\text{доп}} \geq I_{\text{расч}};$ $k_{\text{пер}} \cdot I_{\text{доп}} \geq I_{\text{раб.мах}}; \sigma_{\text{доп}} \geq \sigma_{\text{расч}};$ $S_{\text{мин}} \geq I_{\infty} \sqrt{t_{\text{пр}}} / C$
Измерительные трансформаторы тока	$U_{\text{ном ап}} \geq U_{\text{ном уст}}; I_{\text{ном ап}} \geq I_{\text{ном уст}};$ $k_{\text{пер}} \cdot I_{\text{ном ап}} \geq I_{\text{раб.мах}}; k_{\text{дин}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{ном}} \geq i_{\text{уд}};$ или $F_{\text{доп}} \geq F_{\text{расч}}; (k_{\text{тр}} \cdot I_{\text{ном}})^2 \cdot t_{\text{ном тер.ст}} \geq I_{\infty}^2 \cdot t_{\text{пр}};$ $Z_{2\text{ном}} \geq Z_2 \approx r_2$ (в необходимом классе точности)
Измерительные трансформаторы напряжения	$U_{\text{ном ап}} \geq U_{\text{ном уст}};$ $S_{\text{ном}} \geq S_2$ (в необходимом классе точности)

Примечание: источник – Справочник по электроснабжению и электрооборудованию. Том 1. Электроснабжение/ Под общей редакцией А.А.Федорова. – М.: Энергоатомиздат, 1986.– 568 с.; Мельников М.А. Внутризаводское электроснабжение: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 159 с.

Таблица 8.11

Выбор предохранителей для защиты установок трехфазного переменного тока напряжением 6/10 кВ

Номинальный ток, А		Номинальная мощность, кВА, защищаемой установки при напряжении, кВ		Номинальный ток, А		Номинальная мощность, кВА, защищаемой установки при напряжении, кВ	
установки	плавкой вставки предохранителя	6	10	установки	плавкой вставки предохранителя	6	10
0,5	2,0	5	10	20	40	180	320
1,0	3,0	10	20	30	50	320	560
1,9	5,0	20	30	54	75	560	750
3,0	7,5	30	50	70	100	750	1000
5,0	10	50	75	100	150	1000	1500
8,0	15	75	100	145	200	1500	2500
10,0	20	100	180	210	300	2000	—
14,5	30	135	240				