

## ПЕРЕДАЧА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

### 12.1. ПОНЯТИЯ О СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Электрическая энергия, вырабатываемая на электростанциях большой мощности, подводится к удаленным потребителям по линиям передачи высокого напряжения 35—750 кВ. Так как распределительная сеть потребителя (городская) имеет напряжение 6(10) кВ, то для понижения напряжения линий передачи служит *главная понижающая подстанция* (рис. 12.1). Она содержит понижающие трансформаторы, которые подключаются к линиям передачи через выключатели и разъединители; на выводах высшего напряжения трансформаторов устанавливаются короткозамыкатели, необходимые при проведении ремонтных работ и профилактических осмотров.

К выводам низшего напряжения трансформаторов 6(10) кВ подключается *распределительный пункт* (РП), содержащий секционированные общие шины, к которым

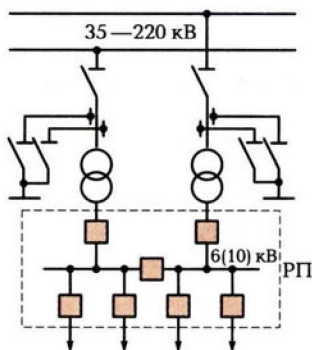


Рис. 12.1

через выключатели присоединяются отдельные потребители. Распределительные пункты устанавливаются и в других частях сети, где не требуется трансформация напряжения.

Так как большинство потребителей электроэнергии рассчитано для работы в сетях с напряжением ниже 1000 В, то в непосредственной близости от них располагают *трансформаторные подстанции* с понижающими трансформаторами и различного рода коммутационной аппаратурой.

Для снабжения электроэнергией крупных промышленных предприятий от магистральных линий передачи прокладывают линию глубокого ввода. В этом случае понижающую подстанцию устанавливают на территории предприятия и через трансформаторы связывают с линиями глубокого ввода (рис. 12.2).

Различают *радиальные* (рис. 12.3, а), *магистральные* (рис. 12.3, б) и *смешанные* распределительные сети. Выбор той или иной распределительной сети зависит от степени важности потребителя, по которой их подразделяют на три категории. Наиболее ответственной является первая категория, наименее ответственной — третья.

Радиальную конструкцию распределительной сети с резервированием питания потребителей от двух источников энергии применяют для потребителей первой категории, а более упрощенные варианты — для менее ответственных потребителей. То же можно сказать о магистральной и смешанной структурах распределительных сетей.

Бесперебойность работы распределительных сетей обеспечивается автоматической релейной защитой. Часто — это очень сложная совокупность реле, автоматически воздействующих на выключатели при повреждениях на отдельных участках сети (коротком замыкании токоведущих частей оборудования, замыкании на землю, ненормальном изменении напряжения, изменении направления передачи энергии и т.п.). Релейная защита сигнализирует о нарушении нормального режима работы и затем совместно с устройствами автоматики выполняет отключение и повтор-

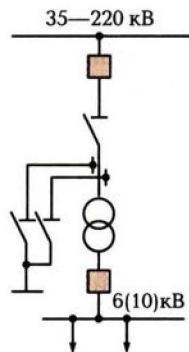


Рис. 12.2

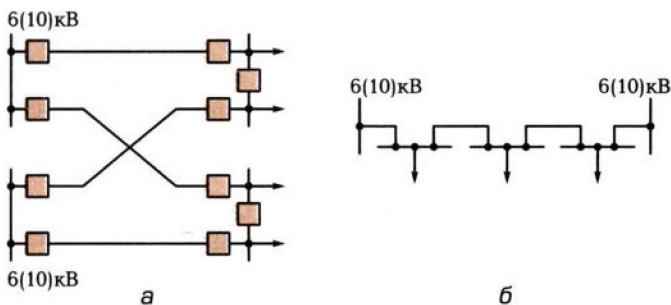


Рис. 12.3

ное включение элементов системы электроснабжения (трансформаторов, питающих линий и т. п.), автоматически включает резервные источники электрической энергии и разгружает систему электроснабжения при недостатке мощности.

Основные требования, предъявляемые к релейной защите, — это селективность (избирательность), быстрота действия, надежность и чувствительность.

*Селективность действия* защиты состоит в том, что поврежденный участок сети отключается от источников электроэнергии ближайшими к установке выключателями, благодаря чему нарушается режим нормального электроснабжения минимального числа приемников электроэнергии.

*Быстрота действия* защиты позволяет уменьшить размеры разрушений поврежденного участка, ослабить влияние понижения напряжения на работу других приемников электроэнергии, улучшить качество электрического освещения и т. д.

*Чувствительность защиты* необходима для своевременной реакции на повреждения сети в самом начале их возникновения.

*Надежность защиты* — это безотказность срабатывания реле при аварии. Для обеспечения высокой надежности применяется резервная защита, отключающая поврежденные участки сети при отказе основной защиты.

Применение выдержки времени является одним из простейших путей получения селективности отключений.

Примером селективной защиты может служить защита радиальной сети с односторонним питанием от подстанции  $G$  макси-

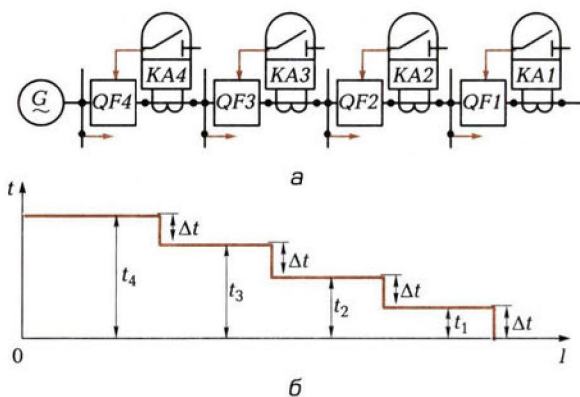


Рис. 12.4

мальными реле тока  $KA1—KA4$  с выдержкой времени  $t_1—t_4$  соответственно и выключателями  $QF1—QF4$  (рис. 12.4, а). При срабатывании реле замыкается цепь оперативного тока, которым приводится в действие электропривод на отключение соответствующего выключателя.

Разность времени срабатывания реле соседних участков сети  $\Delta t$  называется *ступенью выдержки времени*. Ее значение выбирают таким, чтобы реле предыдущего участка успело сработать и дуга в отключенном им выключателе оборвалась прежде, чем настанет время срабатывания реле следующего участка. При этом вся линия, кроме отключенного и более удаленных от подстанции  $G$  участков радиальной сети, продолжает бесперебойно работать. Основным недостатком такой селективной защиты является чрезмерное повышение выдержки времени ( $\Delta t$ ) на участках вблизи источников электроэнергии (рис. 12.4, б). Это противоречит требованию быстродействия защиты. Обычно время отключения повреждения не должно превышать 0,04—0,16 с.

## 12.2. ВЫБОР ПРОВОДОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

При колебаниях нагрузки приемников электрической энергии изменяется падение напряжения на проводах электрической сети:

$$\Delta U = IR_{\lambda} = \frac{I\rho_V l}{S},$$

где  $I$ ,  $R_{\lambda}$ ,  $\rho_V$ ,  $l$  и  $S$  — ток, сопротивление, объемное удельное сопротивление (см. подразд. 2.4), длина и площадь поперечного сечения проводов, соединяющих источник электрической энергии номинальным напряжением  $U_{\text{ист.ном}}$  и приемник электрической энергии напряжением

$$U_{\text{прием}} = U_{\text{ист.ном}} - \Delta U.$$

Падение напряжения, отнесенное к номинальному значению напряжения источника энергии, равно (в %)

$$\varepsilon = \frac{\Delta U}{U_{\text{ист.ном}}} 100 \% = \frac{I}{U_{\text{ист.ном}}} \rho_V \frac{l}{S} 100 \%.$$

При снижении напряжения резко уменьшается световой поток ламп накаливания и увеличиваются токи двигателей. При увеличении напряжения лампы накаливания могут выйти из строя, а двигатели работают в недопустимых условиях. Потому

**Таблица 12.1. Допустимые длительные токовые нагрузки проводов с резиновой и полихлорвиниловой изоляцией и алюминиевыми жилами**

Сечение токопроводящей жилы, мм <sup>2</sup>	Ток нагрузки, А					
	Провода, проложенные открыто	Провода, проложенные в одной изоляционной трубе				
		одножильные, шт.			двухжильные, шт.	трехжильные, шт.
		два	три	четыре	два	один
2,5	24	20	19	19	19	16
4	32	28	28	23	25	21
6	39	36	32	30	31	26
10	60	50	47	39	42	38
16	75	60	60	55	60	55
25	105	85	80	70	75	65
35	130	100	95	85	95	75
50	165	140	130	120	125	105
70	210	175	165	140	150	135
95	255	215	200	175	190	165
120	295	245	220	200	230	190
150	340	275	255	—	—	—
185	390	—	—	—	—	—
240	465	—	—	—	—	—
300	535	—	—	—	—	—
400	645	—	—	—	—	—

отклонение напряжения  $U_{\text{прием}}$  от номинального значения ограничено в сторону уменьшения на 2,5—5 %, в сторону увеличения — на 5 %.

Ток в проводах электрической сети вызывает их нагрев. Значительный нагрев уменьшает срок службы изоляции проводов, а неизолированные провода интенсивно окисляются. При выборе проводов по допустимому нагреву не производят сложных расчетов процессов нагрева, а пользуются таблицами допустимых токов для различных проводов и условий их прокладки (табл. 12.1).

При расчете электрической сети сначала определяют сечение проводов, исходя из допустимого падения напряжения, с округлением до наибольшего значения по справочнику, а затем проверяют выбранные провода по допустимому нагреву.

Короткое замыкание может сопровождаться значительными токами в проводах сети. При этом ток уставки коммутационных аппаратов рассчитывается так, что можно не учитывать отдачу тепла в течение малого промежутка времени от момента возникновения короткого замыкания до отключения поврежденного участка.

### 12.3. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЭЛЕКТРОЗАЩИТЫ

Человек начинает ощущать воздействие тока от 0,6—1,5 мА, а при токе 10—15 мА не может самостоятельно разорвать цепь поражающего его тока. Ток 50—60 мА поражает органы дыхания и сердечно-сосудистую систему.

При напряжениях до 250—300 В постоянный ток безопаснее синусоидального тока частотой 50 Гц. При напряжении 400—600 В опасность постоянного и синусоидального токов практически одинакова, а при напряжении более 600 В постоянный ток опаснее синусоидального (табл. 12.2).

**Таблица 12.2.** Наибольшие допустимые напряжения прикосновения  $U_{пр}$  и токи  $I$ , проходящие через человека, при нормальном (неаварийном) режиме работы электроустановки

Род и частота тока	Наибольшие допустимые значения	
	$U_{пр}$ , В	$I$ , мА
Переменный, 50 Гц	2	0,3
Переменный, 400 Гц	3	0,4
Постоянный	8	1,0

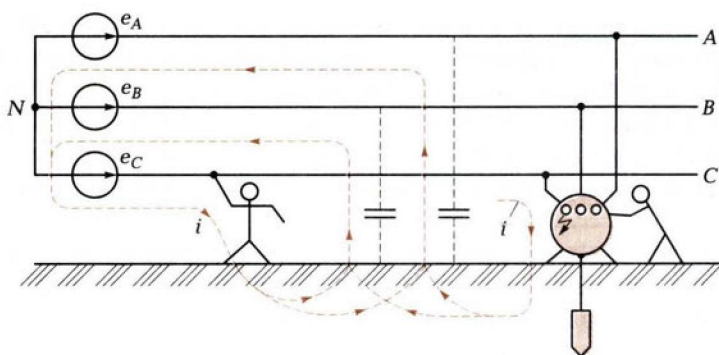


Рис. 12.5

Различают технические средства защиты при эксплуатации электрооборудования с напряжением до 1 000 В и больше 1 000 В. Чаще всего электротравмы возникают при случайных прикосновениях к токоведущим частям, находящимся под напряжением, или к металлическим конструктивным частям электрооборудования (корпус, кожух и т.п.) при повреждении электроизоляции.

Цепи синусоидального тока промышленной частоты подразделяют на трехфазные с изолированной и глухозаземленной нейтралью источника. В обоих случаях возможны трех- (см. рис. 6.8) и четырехпроводные (см. рис. 6.5) сети.

Наименьшую электроопасность имеет трехфазная сеть с изолированной нейтралью. Прикосновение к одной фазе, например к фазе  $C$ , вызывает ток  $i$  в теле человека через емкости фаз  $B$  и  $A$  относительно земли в трехпроводной сети (рис. 12.5), а также нейтрального провода  $N$  в четырехпроводной сети (см. рис. 6.13). Для сетей небольшой протяженности емкостное сопротивление проводов сети относительно земли велико и ток не вызывает поражения человека. При расчетах сопротивление тела человека принимают равным 1 000 Ом. То же происходит, если человек прикасается к изолированным от земли корпусам электрооборудования при повреждении электроизоляции одной из фаз. Для снижения поражающего действия тока в этом случае применяют *защитные заземления* корпусов электрооборудования. Тело человека, прикоснувшегося к корпусу, и защитное заземление включены параллельно, но сопротивление последнего значительно меньше (4—40 Ом).

Недостаток трехфазной сети с изолированной нейтралью является возможность длительного аварийного замыкания на кор-

пус или землю одной из фаз, например при обрыве провода, без отключения поврежденного участка. При замыкании фазы на землю ток в земле создает опасность для человека, на которого действует напряжение между ступнями его ног на длине шага (*шаговое напряжение*).

В протяженных трехфазных сетях с изолированной нейтралью ток короткого замыкания фазы на землю велик и необходимо быстрое отключение аварийного участка. Для этой цели применяют трехфазные сети с глухозаземленной нейтралью источника и *защитное заземление* (рис. 12.6) или *защитное зануление* (рис. 12.7) корпусов электрооборудования. В обоих случаях значительный ток короткого замыкания  $i_k$  приводит к срабатыванию средств защиты и отключению аварийного участка. Защитное зануление, т.е. преднамеренное электрическое соединение с нулевым защитным проводом металлических нетоковедущих частей электрооборудования, предпочтительнее там, где сопротивление защитного заземления относительно велико (табл. 12.3).

В четырехпроводной сети нейтральный провод подключается к глухозаземленной нейтрали трехфазного источника.

Предупреждение короткого замыкания в сетях напряжением до 1 000 В вследствие старения изоляции обеспечивает *защитное отключение* на основе устройства защитного отключения (УЗО) и автоматического выключателя (см. подразд. 10.5). Датчик УЗО измеряет ток утечки через изоляцию, например электрической машины, и формирует сигнал для срабатывания автоматического выключателя, если значение тока утечки превышает значение, определенное уставкой.

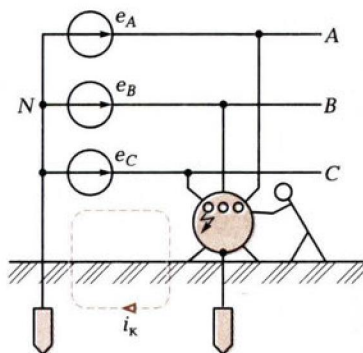


Рис. 12.6

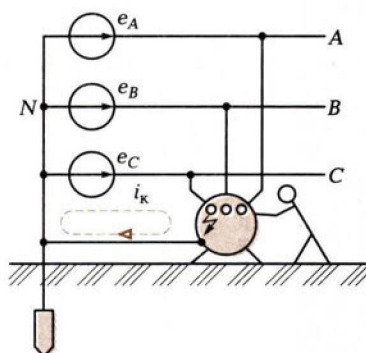


Рис. 12.7



Таблица 12.3. Наибольшие допустимые напряжения прикосновения  $U_{пр}$  и токи  $I$ , проходящие через человека, при аварийном режиме производственных электроустановок напряжением до 1 000 В с глухозаземленной или изолированной нейтралью и выше 1 000 В с изолированной нейтралью

Род и частота тока	Нормируемая величина	Наибольшие допустимые значения при продолжительности воздействия $t$ , с											
		0,01—0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	более 1,0
Переменный 50 Гц	$U_{пр}$ , В	650	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	36
	$I$ , мА	650	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	6
Переменный 400 Гц	$U_{пр}$ , В	650	500	500	330	250	200	170	140	130	110	100	36
	$I$ , мА	650	500	500	330	250	200	170	140	130	110	100	8
Постоянный	$U_{пр}$ , В	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	40
	$I$ , мА	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	15

Для уменьшения вероятности поражения током применяют также индивидуальные средства защиты (резиновые перчатки, диэлектрические галоши, изолирующие коврики и т.п.), ограждения, блокировки, слесарно-монтажные инструменты с изолирующими рукоятками, переносные заземления, световую предупредительную сигнализацию (красный — авария, желтый — внимание, зеленый — безопасно), вывешивают предупреждающие плакаты, указатели напряжения до 1 000 В и больше 1 000 В, знаки безопасности.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Каково назначение распределительных пунктов и трансформаторных подстанций в системе электроснабжения?
2. Какие требования предъявляются к релейной защите систем электроснабжения?
3. Для чего применяется и как выполняется защитное заземление?
4. Для чего применяется и как выполняется защитное зануление?
5. Нарисуйте схему защитного заземления.

### ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

---

1. Расстояние между источником с постоянным номинальным напряжением  $U_{\text{ном}} = 240$  В и приемником равно  $l = 300$  м. Определите площадь поперечного сечения проводов из алюминия (см. табл. 2.1), соединяющих источник и приемник, при токе  $I = 20$  А и допустимом падении напряжения  $\varepsilon = 5\%$ .

*Ответ:* 29,5 мм<sup>2</sup>.

2. Во сколько раз уменьшится мощность потерь в проводах линии передачи электрической энергии синусоидального тока при неизменной номинальной полной мощности передачи  $S_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} I_{\text{ном}}$ , если номинальное напряжение линии увеличить с 35 кВ до 220 кВ?

*Ответ:* в 39,5 раз.