

5. ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА «ВЫБОР И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ АППАРАТОВ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ»

5.1. Цель работы

Ознакомление с основными сведениями об электрических сетях, аппаратах защиты электрических сетей, принципом их действия, нормативными требованиями. Приобретение навыков расчета параметров электрических сетей.

5.2. Общие сведения

Электроустановка (ЭУ) – совокупность машин, аппаратов, линий и вспомогательного оборудования (вместе с сооружениями и помещениями, в которых они установлены), предназначенных для производства, преобразования, трансформации, передачи, распределения электрической энергии и преобразования ее в другой вид энергии [17].

Электрическая сеть (ЭС) – совокупность устройств, служащих для передачи и распределения электроэнергии от источников к потребителям.

Нормальными (номинальными) режимами работы ЭУ считаются режимы, в которых значения напряжений и токов во всех ее элементах не превышают установленных номинальных значений. **Номинальное напряжение** – наибольшее значения напряжения, на которое рассчитана ЭУ (изоляция токоведущих частей) в условиях длительной работы. **Номинальный ток** – наибольший допустимый по условиям нагрева токоведущих частей и изоляции ток, при котором ЭУ может работать неограниченно длительное время.

Электрический ток в процессе его передачи и потребления преобразуется в тепловую энергию. В номинальных режимах тепло, выделяющееся при протекании тока в токоведущих частях ЭУ, рассеивается в окружающую среду и не вызывает перегрева элементов ЭУ выше допустимых температур. Номинальные значения тока, напряжения и других параметров обычно указываются в маркировке ЭУ.

Аварийными режимами работы ЭУ являются режимы, в которых значения напряжений и токов хотя бы в одном элементе превышают номинальные. В этом случае в ЭУ выделяется такое количество тепла, которое не может компенсироваться теплоотдачей в окружающую среду, наступает недопустимый перегрев, в результате которого происходит повреждение ЭУ, возможно возникновение возгораний. Основными аварийными режимами в ЭУ являются режим **токовой перегрузки** и режим **короткого замыкания (КЗ)**.

В режиме КЗ источник электроэнергии замкнут на малое сопротивление, что чаще всего происходит при замыкании проводников (кабелей или проводов электроснабжения, обмоток электрических машин и пр.) между собой либо на корпус в результате повреждения изоляции. Величина тока в этом режиме в десятки раз превышает номинальный ток ЭУ, что вызывает практически моментальный ее перегрев и выход из строя, поэтому токи КЗ необходимо отключать без выдержки времени.

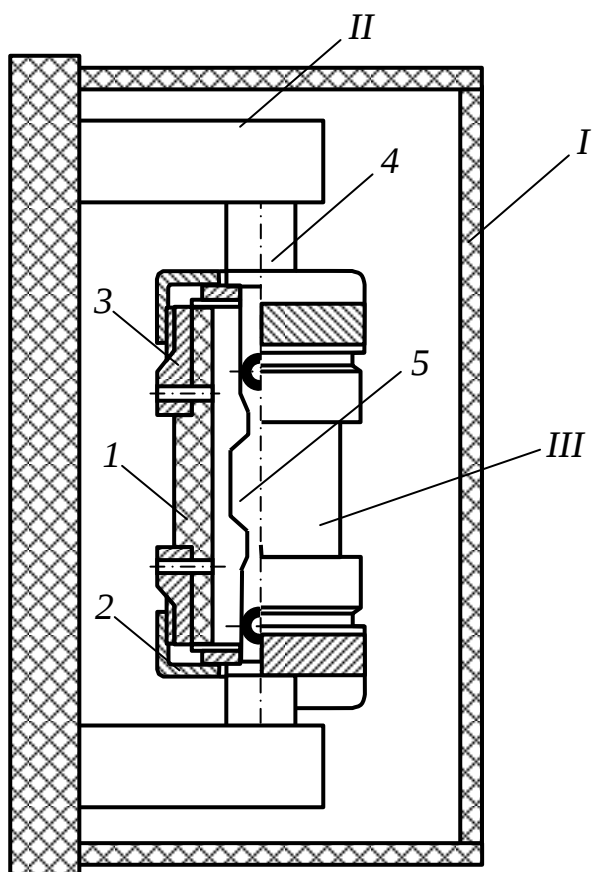


Рис.5.1. Плавкий предохранитель
I – корпус предохранителя; II – контактное устройство; III – плавкая вставка.
1 – корпус плавкой вставки; 2 – латунный колпак; 3 – латунная втулка; 4 – контактные ножи; 5 – плавкий элемент.

Плавкий предохранитель – аппарат защиты, отключающий защищаемую цепь посредством **расплавления** специальных токоведущих частей (плавких вставок) под воздействием тока, превышающего определенное значение, с последующим гашением электрической дуги.

Плавкий предохранитель (см. рис. 5.1) состоит из корпуса I, контактного устройства II и плавкой вставки III. Плавкая вставка состоит из плавкого элемента 5, заключенного в корпус 1, и токоведущих элементов 2, 3 и 4, предназначенных для включения вставки в защищаемую цепь. Основной частью плавкой вставки является плавкий элемент 5, через который проходит рабочий ток ЭУ и который при срабатывании расплавляется. После срабатывания предохранителя плавкая вставка подлежит замене на новую.

Достоинствами плавких предохранителей являются простота конструкции, надежность, способность коммутировать большие токи. Недостатки: плавкая вставка после срабатывания не восстанавливается, невозможность одновременного отключения нескольких фаз, малая чувствительность к перегрузкам.

В режиме перегрузки величина тока ненамного превышает номинальные значения (от 10 – 25% номинального). Это происходит, например, при завышении мощности потребителей, пуске электродвигателей под нагрузкой, завышенной частоте включения-выключения или реверса электродвигателей, других нарушениях правил эксплуатации ЭУ. При перегрузке перегрев ЭУ наступает в течение достаточно длительного времени (в отдельных случаях – до 30 мин), а, например, для электродвигателей кратковременные перегрузки, вызванные пусковыми токами, предусмотрены нормальным режимом работы, поэтому токи перегрузки следует отключать с выдержкой времени, которая определяется требуемыми режимами работы электрооборудования.

Аппаратом защиты (АЗ) электрической сети называется коммутационный электрический аппарат, автоматически отключающий сеть при аварийных режимах. Наиболее часто используются плавкие предохранители и автоматические выключатели.

Параметры плавких предохранителей

Номинальное напряжение $U_{Н.ПР}$ – напряжение, указанное на предохранителе и соответствующее наибольшему номинальному напряжению сетей, в которых разрешается установка данного предохранителя.

Номинальный ток предохранителя $I_{Н.ПР}$ – ток, указанный на предохранителе и равный наибольшему из номинальных токов плавких вставок, предназначенных для данного предохранителя. На этот ток рассчитаны все токоведущие контактные части предохранителя.

Номинальный ток плавкой вставки $I_{Н.ВСТ}$ – ток, на который рассчитана вставка при длительной работе. В предохранитель могут устанавливаться вставки различных номиналов. Номинальный ток предохранителя больше или равен номинальному току плавкой вставки $I_{Н.ПР} \geq I_{Н.ВСТ}$

Пограничный ток плавкой вставки I_{∞} – ток, при котором вставка расплавится через промежуток времени, достаточный для достижения ею установившейся температуры (обычно 1-2 ч). $I_{\infty} > I_{Н.ВСТ}$.

Предельный ток отключения предохранителя $I_{ПР.ПР}$ – наибольшее значение тока, при котором предохранитель сработает без каких-либо повреждений.

Технические характеристики некоторых типов плавких предохранителей приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Технические характеристики плавких предохранителей

Тип	Номинальный ток предохранителя $I_{н.пр}$, А	Номинальный ток плавкой вставки $I_{н.вст}$, А	Предельный ток отключения $I_{пр.пр}$, А, при напряжении, В			
			220	380	500	
ПР-2	15	6, 10 и 15	1200	800	700	
	60	15, 20, 25, 35, 45, 60	5500	4500	3500	
	100	60, 80, 100	11000	11000	10000	
	200	100, 125, 160 и 200	11000	11000	10000	
	350	200, 225, 260, 300, 350	11000	13000	11000	
	600	350, 430, 500, 600	15000	23000	20000	
НПН-15	15	6, 10 и 15	Нет све- дений	10000	Нет све- дений	
НПН-60М	60	20, 25, 35, 45 и 60		10000		
НПН2-60	63	6, 10, 16, 20, 25, 31,5 40 и 63		10000		
ПН-2	100	31,5, 40, 50, 63, 80, 100	Нет све- дений	100000	50000	
	250	80, 100, 125, 160, 200 и 250		100000	40000	
	400	200, 250, 315, 355 и 400		40000	25000	
	630	315, 400, 500 и 630		25000	10000	
Ц-27	25	6, 10, 15, 20 и 25	Нет све- дений	600	Нет све- дений	
Ц-33	60	15, 20, 25, 35, 60		1000		
ПП24	25	2, 4, 6,3, 10, 16, 20, 25		100000		
ПП17	1000	500, 630, 800, 1000		120000		
ПТ23	16	6, 10, 16	10000	Нет све- дений		
ПТ26	31,5	20, 25, 31,5	10000			
ПР23	16	6,3, 10, 15	10000			
ПР26	31,5	20, 25, 31,5	10000			

Автоматический выключатель (автомат) – аппарат защиты, отключающий защищаемую цепь посредством **расцепления** токоведущих частей (контактных групп) под воздействием тока, превышающего определенное значение, с последующим гашением электрической дуги. После срабатывания автомат переводится во включенное состояние вручную.

Срабатывание автомата обеспечивает **расцепитель** – это устройство, которое размыкает контакты, через которые проходит ток защищаемого оборудования, при превышении этим током определенных величин. Чаще всего используются расцепители максимального тока, которые срабатывают при токе, превышающем **ток уставки** (значение тока срабатывания, на которое отрегулирован расцепитель).

В автоматах применяются следующие виды расцепителей.

1. **Электромагнитный расцепитель.** Применяется для защиты от токов КЗ. Срабатывание расцепителя обеспечивает электромагнит, якорь которого при срабатывании давит на расцепитель, обеспечивая размыкание контактов. Расцепитель мгновенного действия (время срабатывания при токах КЗ – сотые доли секунд). В маркировке автомата тип расцепителя обозначен буквой М.

2. **Тепловой расцепитель.** Применяется для защиты от токов перегрузок. Срабатывание расцепителя обеспечивает биметаллическая пластина, которая при нагреве изменяет форму, и этим обеспечивает размыкание контактов. Расцепитель длительного срабатывания (время срабатывания зависит от величины тока перегрузки). В маркировке автомата тип расцепителя обозначен буквой Т.

3. **Комбинированный расцепитель.** Представляет собой комбинацию теплового и электромагнитного расцепителей в одном корпусе. Выполняет защиту и от токов КЗ, и от токов перегрузок. В маркировке обозначен МТ.

4. **Электродинамический расцепитель.** Используется для защиты от КЗ в автоматах с большими номинальными токами. Срабатывание обеспечивается электродинамическими силами, размыкающих силовые контакты.

5. **Полупроводниковый расцепитель.** Выполняет защиту и от токов КЗ и от перегрузок. Срабатывание обеспечивают силовые полупроводниковые элементы (тиристоры). Допускает ступенчатый выбор номинального тока расцепителя, уставок по току и по времени срабатывания для режимов КЗ и перегрузки.

В практической работе рассматриваются автоматы с электромагнитным, тепловым и комбинированным расцепителями.

Автоматический выключатель АП-50-3МТ (Рис.5.2) с комбинированным расцепителем состоит из разъемного корпуса (поз.4 и 5), в котором установлены электромагнитный 2 и тепловой 3 расцепители, которые при срабатывании размыкают подвижный 8 и неподвижный 6 контакты. Контакты установлены внутри дугогасительной камеры, образованной между двумя стальными пластинами 9 с прорезями 7, в которой гасится электрическая дуга, возникающая при размыкании контактов под нагрузкой.

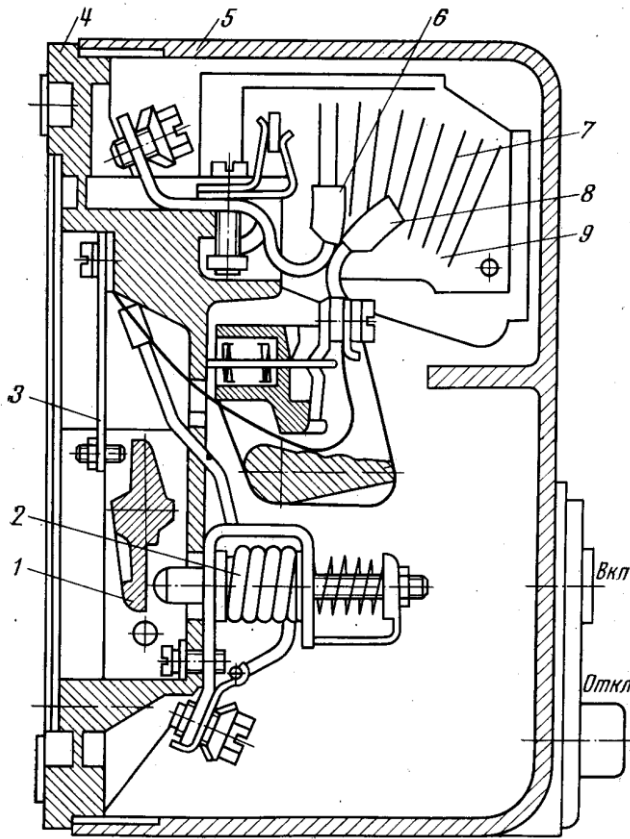


Рис.5.2. Автоматический выключатель
1 – механизм свободного расцепления; 2, 3 – электромагнитный и тепловой расцепители; 4, 5 – корпус; 6, 8 – неподвижный и подвижный контакты; 7, 9 – дуогасительная камера.

Тепловой расцепитель 3 срабатывает при токовой перегрузке не более $1,35I_H$ за время в пределах 30 мин, что позволяет отключать защищаемое оборудование при длительных токовых перегрузках и при этом избежать ложных срабатываний при кратковременных бросках тока (например, пусковых токах электродвигателей). При токах, превышающих $7I_H$ (токах КЗ), срабатывает электромагнитный расцепитель, время отключения которого не более 0,01 с. Механизм свободного расцепления 1 позволяет вручную включить автомат после срабатывания и вручную отключать его при необходимости.

Достоинствами автоматов являются высокое быстродействие, регулирование параметров срабатывания в широком диапазоне, одновременное отключение нескольких фаз, быстрое восстановление (включение) Недостатки: сложность конструкции, меньшая надежность, более высокая стоимость.

Параметры автоматических выключателей

Номинальное напряжение $U_{H.A}$ – напряжение, соответствующее наибольшему номинальному напряжению, на которое рассчитан автомат.

Номинальный ток $I_{H.A}$ – наибольший ток, на который рассчитаны токоведущие и контактные части автомата, равный наибольшему из номинальных токов расцепителя.

Номинальный ток расцепителя ($I_{H.ЭЛ.М.}$, $I_{H.ТЕПЛ.}$ или $I_{H.КОМБ.}$) – наибольший ток, на который рассчитан электромагнитный (эл.м.), тепловой (тепл.) или комбинированный (комб.) расцепитель автомата для длительной работы без срабатывания. В автомат могут устанавливаться расцепители различных номиналов.

Номинальный ток уставки расцепителя – текущая величина номинального тока, на который отрегулирован расцепитель для длительной работы без срабатывания. Обычно для автоматов с регулировкой тока уставки

$$I_{H.УСТ.} = 0,6-1 \cdot I_{H.ТЕПЛ., А} \quad (5.1)$$

$I_{H.ЭЛ.М.}$

Ток срабатывания (уставки) расцепителя $I_{CP.ЭЛ.М.}$, $I_{CP.ТЕПЛ.}$ – наименьший ток, при котором срабатывает расцепитель автомата:

- для автоматов с электромагнитным или комбинированным расцепителем

$$I_{CP.ЭЛ.М.} = \left(0,45 - 1,5 \right) I_{H.ЭЛ.М.}, \text{ А} \quad (5.2)$$

- для автоматов с тепловым расцепителем без регулировки тока уставки

$$I_{CP.ТЕПЛ.} = \left(0,25 - 1,45 \right) I_{H.ТЕПЛ.}, \text{ А} \quad (5.3)$$

- для автоматов с тепловым расцепителем с регулировкой тока уставки

$$I_{CP.ТЕПЛ.} = \left(0,25 - 1,33 \right) I_{H.УСТ.}, \text{ А} \quad (5.4)$$

Предельный ток отключения при данном напряжении $I_{пр.А}$ – наибольшее значение тока, при котором автомат работает без каких-либо повреждений.

Технические характеристики некоторых типов автоматов приведены в табл. 5.2 и 5.3.

Таблица 5.2

Технические характеристики автоматов серии А3100

Выключатель		Число полюсов	$I_{н.а}$	Токи расцепителя, А			$I_{пр.а}$, А, при напряжении, В		
Тип	Модификация			$I_{н.тепл}$	$I_{н.эл.м}$	$I_{ср.эл.м}$	220	350	500
A3161	Отсутствует	1	50	15	-	-	2500	2000	-
				20	-	-	3000	2500	-
A3162		2		25	-	-	3500	3000	-
				30	-	-	4000	3500	-
A3163		3		40	-	-	4500	4000	-
	50		-	-	5000	4500	-		
A3114	A3113/1	2	200	15	15	150	4000	3200	2500
				20	20	200	5000	4000	3200
	A4114/1	3		25	25	250	6500	5000	4000
				30	30	300	9000	7000	6000
				40	40	400	10000	8500	7000
				50	50	500	12000	10000	8000
				60	60	600	13000	11000	9000
				80	80	800	14000	11500	9500
				100	100	1000	15000	12000	10000
A3120	A3123	2	100	15	15	430	7000	5500	4000
				20	20	430	7500	6000	5000
				25	25	600	11000	9000	7000
				30	30	600	12000	10000	8000
	A3124	3		40	40	800	15000	13000	10000
				50	50	800	22000	19000	14000
				60	60	800	23000	20000	15000
				80	80	800	26000	22000	16000
				100	100	800	30000	23000	18000
A3130	A3133	2	200	120	120	840	20000	19000	14000
				150	150	1050	30000	23000	18000
	A3334	3		200	200	1400	35000	30000	25000
A3140	A3143	2	600	250	250	1750	35000	32000	32000
				300	300	2100	40000	35000	35000
	A3144	3		400	400	2800	40000	35000	35000
				500	500	3500	50000	50000	40000
				600	600	4200	50000	50000	40000

Таблица 5.3

Характеристики автоматов АЕ1000 (однополюсных) и АЕ2000 (трехполюсных)

Серия	Тип	Расцепитель	$I_{н.а}, А$	$I_{н.тепл.}, I_{н.эл.м.}, А$	$I_{ср.тепл.}, А$	$I_{ср.эл.м.}, А$	$I_{пр.а}, А$
АЕ1000	АЕ1031-11	Комб.	25	6; 10; 16; 25	$1,5 I_{н.расц}$	$(12-18) I_{н.расц}$	2000
	АЕ1031-12	Тепловой	25	То же	$1,5 I_{н.расц}$	-	1000
	АЕ1031-13	Эл.магн.	25	То же	-	$(12-18) I_{н.расц}$	1000
АЕ2000	АЕ2033	Эл.магн.	25	0,6; 0,8; 1; 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,2; 4; 5; 6; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25	$1,25 I_{н.расц}$	$3I_{н.расц}$ или $12I_{н.расц}$	3000
	АЕ2036	Комб.	25	То же	$1,25 I_{н.расц}$	$3I_{н.расц}$ или $12I_{н.расц}$	3000
	АЕ2053	Эл.магн.	100	16; 20; 25; 32; 40; 50; 63; 80; 100	-	$3I_{н.расц}$ или $12I_{н.расц}$	6000
	АЕ2056	Комб.	100	То же	$1,25 I_{н.расц}$	$3I_{н.расц}$ или $12I_{н.расц}$	6000

С целью унификации номинальных параметров АЗ принята стандартная шкала номинальных токов аппаратов защиты, А.

Таблица 5.4

Стандартная шкала номинальных токов аппаратов защиты, А.

0,3...0,6; 0,8; 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,15; 4; 5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 320; 400; 500; 630; 700; 850; 1000.
--

5.3. Требования к защите электрических сетей и аппаратам защиты

5.3.1. Электрические сети должны иметь **защиту от токов КЗ**, обеспечивающую по возможности наименьшее время отключения и требования селективности.

5.3.2. От **перегрузки** должны быть защищены сети внутри помещений:

- выполненные открыто проложенными проводниками с горючей наружной изоляцией;
- осветительные сети в жилых и общественных зданиях, в торговых помещениях, служебно-бытовых помещениях промышленных предприятий, а также в пожароопасных зонах;
- силовые сети на промышленных предприятиях, в жилых и общественных зданиях – только в случаях, когда по условиям техпроцесса или режиму работы сети может возникать длительная перегрузка проводников;
- сети всех видов во взрывоопасных зонах.

5.3.3. Сечение проводников должно удовлетворять условию: **допустимый длительный ток** проводника $I_{доп}$ должен соответствовать рабочему току нагрузки I_p :

$$I_{доп} \geq I_p, А \quad (5.5)$$

5.3.4. В качестве аппаратов защиты должны применяться **автоматические выключатели** или **предохранители**.

5.3.5. Номинальные токи АЗ, служащих для защиты отдельных участков сети, следует выбирать по возможности **наименьшими** по отношению к расчетным рабочим токам этих участков I_P :

$$I_{\substack{H.BCT \\ H.ЭЛ.М \\ H.ТЕПЛ}} \geq I_P, \text{ А} \quad (5.6)$$

5.3.6. В сетях, защищаемых **от перегрузок**, номинальные токи АЗ, служащих для защиты отдельных участков сети, не должны превышать длительно допустимые токовые нагрузки на проводники участков $I_{ДОП}$. В этом случае должно быть обеспечено условие:

$$I_{\substack{H.BCT \\ H.ЭЛ.М \\ H.ТЕПЛ}} \leq I_{ДОП}, \text{ А} \quad (5.7)$$

5.3.7. АЗ не должны отключать электроустановки **при кратковременных перегрузках** (пусковые токи, «пики» токов технологических нагрузок, токи при самозапуске и т.п.). Для этого должно выполняться следующее условие:

$$I_{\substack{H.BCT \\ CP.ЭЛ.М \\ CP.ТЕПЛ}} \geq I_{МАКС} / \alpha \quad (5.8)$$

где $I_{МАКС}$ – наибольшая величина кратковременного тока в сети, А;

α – коэффициент режима перегрузки АЗ. Для плавких предохранителей $\alpha = 2,5$, для автоматов $\alpha = 0,8$.

5.3.8. АЗ должны обеспечивать отключение поврежденного участка **при КЗ в конце защищаемой линии**: однофазных – в сетях с глухозаземленной нейтралью; двухфазных – в сетях с изолированной нейтралью. Ток КЗ в конце защищаемого участка является **минимально возможным током аварийного режима сети**. АЗ должен обеспечивать отключение этого тока при любых условиях. Надежное отключение обеспечивается, если отношение наименьшего расчетного тока КЗ в конце линии $I_{КЗ.К}$ к номинальному току плавкой вставки предохранителя $I_{H.BCT}$, номинальному току теплового расцепителя автомата $I_{H.ТЕПЛ}$ или току срабатывания электромагнитного расцепителя автомата $I_{CP.ЭЛ.М}$ будет не менее следующих значений:

$$I_{КЗ.К} / I_{H.BCT} \geq 3 \text{ } \textcircled{4}; \quad (5.9)$$

$$I_{КЗ.К} / I_{CP.ЭЛ.М} \geq 1,25 \div 1,4; \quad (5.10)$$

$$I_{КЗ.К} / I_{H.ТЕПЛ} \geq 3 \text{ } \textcircled{6}, \quad (5.11)$$

В скобках приведены значения для взрывоопасных зон

5.3.9. АЗ по своей отключающей способности должны соответствовать максимальному значению тока **КЗ в начале защищаемого участка** электрической сети. Ток КЗ в начале защищаемого участка $I_{КЗ.Н}$ является **максимально возможным током аварийного режима сети**. АЗ должен гарантировать от-

ключение этого тока без разрушения аппарата. Надежность обеспечивается при выполнении условия:

$$I_{\frac{I_{PP.PP}}{I_{PP.A}}} \geq I_{K3.H}, A \quad (5.12)$$

5.3.10. АЗ должны обеспечивать **селективность действия**. Это означает, что на появление аварийных режимов реагирует только ближайший к месту повреждения АЗ и не отключается последующий АЗ. Для этого необходимо, чтобы номинальные токи последовательно включенных АЗ, по возможности, отличались друг от друга не менее, чем на две ступени шкалы номинальных токов (см. табл.5.4). Для не особо ответственных случаев допускается иметь разницу в одну ступень.

5.3.11. Предохранитель является однофазным аппаратом, при перегрузках может перегореть плавкая вставка только в одной из фаз трехфазной сети. В этом случае трехфазный электродвигатель будет работать на оставшихся двух фазах, что является недопустимым пожароопасным режимом. Поэтому для защиты силовых сетей с трехфазными электродвигателями рекомендуются автоматические выключатели. Автоматы рекомендуется применять также в тех случаях, когда необходимо быстрое восстановление питания. Автоматы имеют более устойчивые и постоянные защитные характеристики, обеспечивают надежное отключение и селективную защиту от сверхтоков, позволяют сравнительно точно установить определенный ток срабатывания.

Плавкие предохранители более дешевы, конструктивно просты и срабатывают при сверхтоках безотказно. Кроме того, они лучше ограничивают большие токи КЗ и обладают большей разрывной способностью, чем автоматы. Предохранители могут применяться для защиты сетей, где по условиям работы предусматривается различная нагрузка по фазам.

5.4. Расчетная часть

5.4.1. Задание по работе

Выбрать аппараты защиты для силовой и осветительной сети. Проверить расчетом соответствие выбранных аппаратов нормативным требованиям.

К расчету принята сеть с глухозаземленной нейтралью (см. рис. 5.3).

Электропитание подается от понижающей подстанции ТП 6/0,4 кВ на силовой щит ЩС по участку I (магистраль «ТП–ЩС»). От ЩС питание подается на электродвигатель силового оборудования (участок II). Участки I и II составляют силовую сеть. Для обеспечения искусственного освещения помещений к ЩС отдельной линией (участок III) подключен осветительный щиток ЩО, от которого выполняется электропитание светильников (участок IV). Участки I, III и IV составляют осветительную сеть. Напряжение сети – 380/220 В: линейное – для силовой, фазное – для осветительной сети.

Исходные данные для выполнения работы согласно номеру варианта, который задает преподаватель, принимают по табл.5.5 – 5.8.

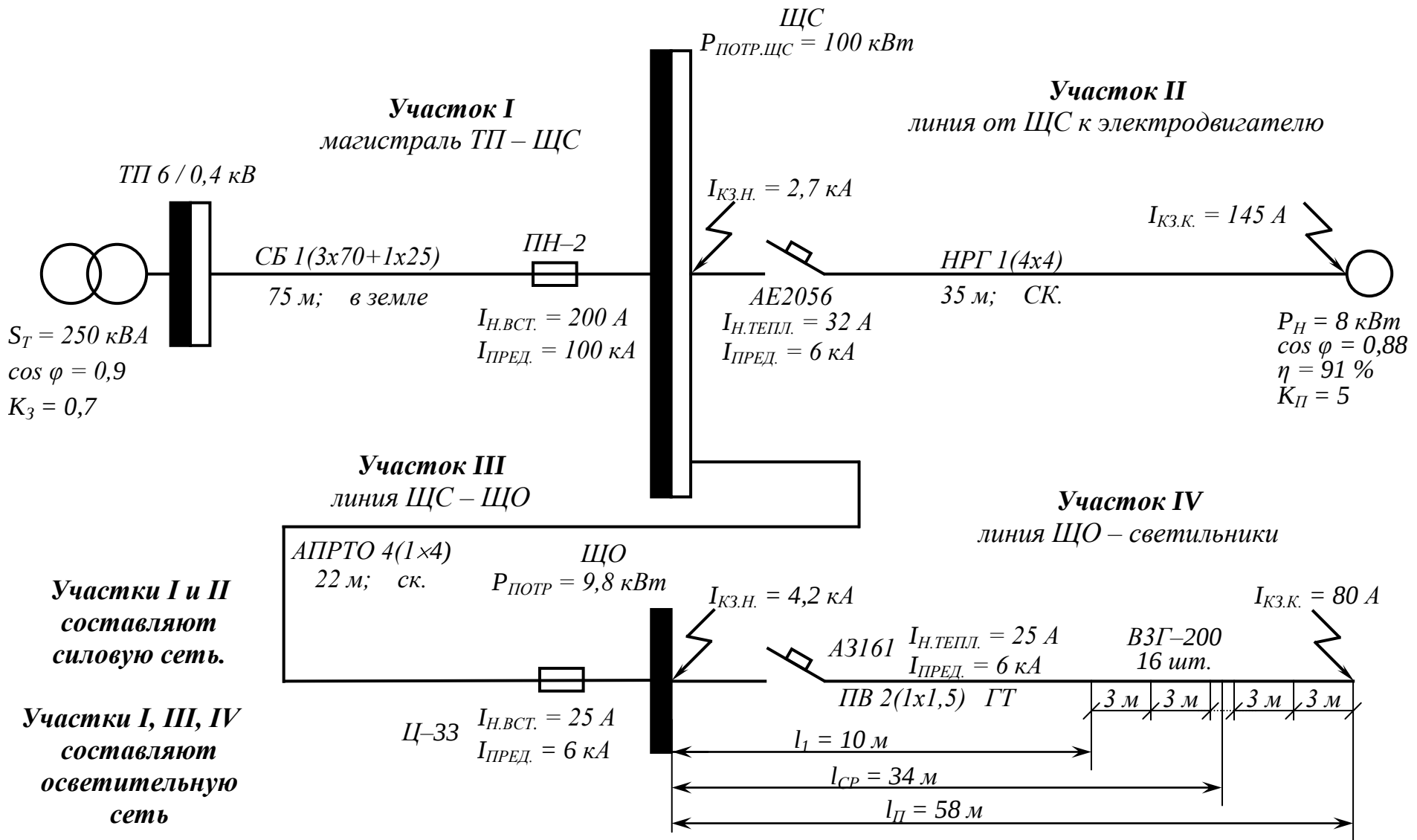


Рис.5.3. Пример выполнения электрической схемы силовой и осветительной сетей

Таблица 5.5

Данные питающего трансформатора и вводных магистралей (участок I).

Вариант	Мощность трансформатора S_T , кВА	Марка кабеля	Кол-во и сечение жил, мм ²	Длина, м	Способ прокладки	Потр. мощность на ЩС $P_{потр.щс}$, кВт
1	250	СБ	1(3х70+1х25)	75	В земле	100
2	160	АСБ	1(3х50+1х25)	100	В земле	75
3	630	ВРБ	1(3х35+1х16)	50	В земле	90
4	1000	СРБ	1(3х70+1х25)	150	В земле	120
5	1600	АБ	1(3х120+1х50)	200	В земле	150
6	400	ААБ	1(3х95+1х35)	80	В земле	110
7	630	АБГ	1(3х35+1х16)	85	В земле	85
8	1000	СБГ	1(3х50+1х25)	50	В земле	80
9	400	АСБГ	1(3х120+1х70)	70	В земле	140
10	1600	НРБ	1(3х50+1х25)	110	В земле	100

Таблица 5.6

Расчетные данные силовой сети (участок II)

Вариант	Марка кабеля	Кол-во и сечение жил, мм ²	Длина, м	Способ прокладки	Двигатель			
					Мощность, P_n	$\cos \varphi$	КПД η	К-т пуска K_n
1	ПРТО	1(4х1.5)	20	ГТ	5,5	0,84	0,86	6
2	НРБГ	1(3х4+1х2.5)	18	Скобы	8	0,84	0,87	5
3	ПВ	4(1х2.5)	30	ГТ	13	0,88	0,86	7,5
4	НРГ	1(4х4)	35	Скобы	15	0,87	0,90	6,5
5	АПР	1(3х6+1х4)	50	ГТ	22	0,86	0,91	6,5
6	ПВ	3(1х10)	30	ГТ	17	0,91	0,87	7,4
7	ВРГ	1(3х16+1х10)	40	Скобы	25	0,85	0,87	6,5
8	ВВГ	1(4х10)	70	Скобы	30	0,89	0,91	6,4
9	АВВБ	1(4х16)	60	Скобы	40	0,9	0,87	6
10	ВВБГ	1(3х16+1х10)	55	Скобы	25	0,91	0,88	9,5

Таблица 5.7

Расчетные данные магистрали от ЩС до ЩО (Участок III)

Вариант	Марка кабеля	Кол-во и сечение жил, мм ²	Длина, м	Способ прокладки	Потр. мощность на ЩО $P_{потр.щс}$, кВт
1	ПРТО	1(4х2.5)	22	Скобы	9,8
2	ПВ	4(1х4)	12	ГТ	14,8
3	АНРГ	1(4х2.5)	12	Скобы	5,9
4	НРГ	1(4х1.5)	14	Скобы	7,0
5	ВВГ	1(4х1.5)	24	Скобы	4,5
6	ПВ	4(1х1.5)	28	ГТ	7,5
7	АВВГ	1(4х6)	18	Скобы	12,6
8	АПВ	4(1х2.5)	16	ГТ	9,0
9	ВРБГ	1(3х6+1х2.5)	24	Скобы	12,0
10	НРГ	1(3х10+1х4)	36	Скобы	17,0

Таблица 5.8

Расчетные данные осветительной сети (участок IV)

Вариант	Марка кабеля	Кол-во и сечение жил, мм ²	Способ прокладки	l_1 , м	a , м	Светильник	
						Мощность $P_{св}$, Вт	Кол-во
1	ПРТО	4(1х1.5)	ГТ	16	4	200	20
2	ПВ	2(1х2)	ГТ	14	3	300	15
3	АНРГ	1(2х2.5)	Скобы	18	4	250	10
4	ПРТО	2(1х2.5)	ГТ	16	3	300	9
5	НРГ	1(4х1.5)	Скобы	14	6	250	8
6	АВВБ	1(2х4)	Скобы	16	4	200	10
7	ПВ	4(1х1.5)	ГТ	20	3	300	12
8	ПРТО	2(1х2.5)	ГТ	18	6	300	10
9	ПВ	4(1х2)	ГТ	20	4	200	15
10	АПРТО	4(1х3)	ГТ	12	4	250	20

ГТ – прокладка в трубах. l_1 – расстояние от ЩС до первого светильника, м; a – расстояние между светильниками, м

5.4.2. Порядок выполнения расчетов

1. Определить рабочие токи I_P всех рассматриваемых участков сети.

Участок I:

$$I_{P1} = \frac{P_{ПОТР.ЩС} \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot U_L}, \text{ А}, \quad (5.13)$$

где $P_{ПОТР.ЩС}$ – потребляемая мощность на ЩС, кВА; (табл.5.5);

U_L – линейное напряжение сети, В.

Участок II:

$$I_{P2} = \frac{P_H \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot U_L \cdot \cos \varphi \cdot \eta}, \text{ А}, \quad (5.14)$$

где P_H , $\cos \varphi$, η – мощность, кВт, коэффициент мощности и КПД электродвигателя (табл.5.6).

Участок III:

$$I_{P3} = \frac{P_{ПОТР.ЩО} \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot U_L}, \text{ А}, \quad (5.15)$$

где $P_{ПОТР.ЩО}$ – потребляемая мощность на ЩО, кВА (табл.5.7).

Участок IV:

$$I_{P4} = \frac{P_{СВ} \cdot n_{СВ}}{U_{\phi}}, \text{ А}, \quad (5.16)$$

где $P_{СВЕТ}$ – мощность одного светильника, Вт (табл.5.8);

$n_{СВЕТ}$ – количество светильников, шт. (табл.5.8);

U_{ϕ} – фазное напряжение сети, В.

Таблица 5.9

Провода с медными (ПВ, ПР, ПРТО) / алюминиевыми (АПВ, АПР, АПРТО) жилами

Сечение токопроводящей жилы, мм ²	Допустимый длительный ток, А, для проводов, проложенных					
	открыто	в одной трубе				
		двух одножильных	трех одножильных	четырёх одножильных	одного двухжильного	одного трехжильного
1,5	23 / –	19 / –	17 / –	16 / –	18 / –	15 / –
2	26 / 21	24 / 19	22 / 18	20 / 15	23 / 17	19 / 14
2,5	30 / 24	27 / 20	25 / 19	25 / 19	25 / 19	21 / 16
3	34 / 27	32 / 24	28 / 22	26 / 21	28 / 22	24 / 18
4	41 / 32	38 / 28	35 / 28	30 / 23	32 / 25	27 / 21
5	46 / 36	42 / 32	39 / 30	34 / 27	37 / 28	31 / 24
6	50 / 39	46 / 36	42 / 32	40 / 30	40 / 31	34 / 26
8	62 / 46	54 / 43	51 / 40	46 / 37	48 / 38	43 / 32
10	80 / 60	70 / 50	60 / 47	50 / 39	55 / 42	50 / 38

Таблица 5.10

Кабели ВВ(Б,Г), ВР(Б,Г), НР(Б,Г), СР(Б,Г) с медными / алюминиевыми жилами

Сечение токопроводящей жилы, мм ²	Допустимый длительный ток, А, для кабелей			
	Двухжильных		Трехжильных	
	в воздухе	в земле	в воздухе	в земле
1,5	19 / -	33 / -	19 / -	27 / -
2,5	27 / 21	44 / 34	25 / 19	38 / 29
4	38 / 29	55 / 42	35 / 27	49 / 38
6	50 / 38	70 / 5	42 / 32	60 / 46
10	70 / 55	105 / 80	55 / 42	90 / 70
16	90 / 70	135 / 105	75 / 60	115 / 90
25	115 / 90	175 / 135	95 / 75	150 / 115
35	140 / 105	210 / 160	120 / 90	180 / 140
50	175 / 135	265 / 205	145 / 110	225 / 175

Таблица 5.11

Кабели С(Б,Г), А(Б,Г) с медными / алюминиевыми АС(Б,Г), АА(Б,Г) жилами

Сечение, мм ²	Ток, А, для кабелей			
	трехжильных до 3 кВ		четырёхжильных до 1 кВ	
	в земле	в воздухе	в земле	в воздухе
25	160 / 125	105 / 80	150 / 115	100 / 75
35	190 / 145	125 / 95	175 / 135	120 / 95
50	235 / 180	155 / 120	215 / 165	145 / 110
70	285 / 220	200 / 155	265 / 200	185 / 140
95	340 / 260	245 / 190	310 / 240	215 / 165
120	390 / 300	285 / 220	350 / 270	260 / 200
150	435 / 335	330 / 255	395 / 305	300 / 230
185	490 / 380	375 / 290	450 / 345	340 / 260

2. Пользуясь рекомендациями п.5.3.3, и табл.5.9 – 5.11, для всех участков определить допустимые длительные токи проводников $I_{доп}$ и проверить соблюдение условия (5.5). Рабочие токи участков I_p определены в п.1 данного раздела. В случае невыполнения условия (5.5) следует выбрать из табл.5.9 – 5.11 проводник той же марки с большим сечением жил и повторно проверить условие (5.5).

3. В зависимости от назначения участков сети (силовая, осветительная), пользуясь рекомендациями пп.5.3.4, 5.3.11 и табл. 5.1, 5.2, 5.3 выбрать тип и марку АЗ для каждого участка.

4. Пользуясь рекомендациями п.5.3.5, из табл. 5.1, 5.2, 5.3 для каждого участка выбрать АЗ с ближайшим большим номинальным током ($I_{н.вст}$, $I_{н.эл.м}$ или $I_{н.тепл}$) к рабочему току I_p этого участка, обеспечивая при этом выполнение условия (5.6).

5. Для участков, для которых предусмотрена защита от перегрузок, (по исходным данным это участки II, III и IV), пользуясь результатами предыдущих пунктов расчета и указаниями п. 5.3.6, выполнить проверку условия (5.7). В случае невыполнения условия (5.7), следует из табл. 5.1, 5.2, 5.3 выбрать АЗ того же типа с ближайшем **меньшим** номинальным током, либо АЗ другого типа и номинала. При этом одновременно контролировать соблюдение условия (5.5). При невозможности соблюдения обеих условий одновременно следует выбрать из табл.5.9 – 5.11 проводник той же марки с большим сечением жил и повторно проверить условие (5.7).

6. Проверить силовую сеть на отсутствие ложных отключений при кратковременных токовых перегрузках по п.5.3.7 и условию (5.8). Проверка выполняется только для АЗ участка II. Наибольшая величина кратковременного тока в сети $I_{макс}$ определяется по формуле:

$$I_{макс} = I_{p2} \cdot K_{II}, \text{ А} \quad (5.17)$$

где K_{II} – коэффициент пуска электродвигателя (отношение пускового тока к номинальному току), см. табл.5.6.

В случае невыполнения условия (5.8), следует табл. 5.1, 5.2, 5.3 выбрать АЗ того же типа с ближайшим **большим** номинальным током, а если это невозможно – другого типа и номинала и повторно проверить условие (5.8).

7. Проверить надежность отключения поврежденного участка при КЗ в конце защищаемой линии по условиям: (5.9) – для плавких предохранителей, (5.10) – для автоматов с электромагнитным расцепителем, (5.11) – для автоматов с тепловым расцепителем. Для автоматов с комбинированным расцепителем должно выполняться хотя бы одно из условий – (5.10) или (5.11). Необходимые параметры АЗ принимаются из табл. 5.1, 5.2, 5.3.

Ток КЗ в конце линии $I_{кз.к}$ определяется приближенным расчетом. Расчет выполняется: в сетях с глухозаземленной нейтралью – для случая однофазного короткого замыкания; в сетях с изолированной нейтралью – для случая двух-

фазного короткого замыкания. Предполагается, что короткое замыкание произошло на зажимах электроприемника.

В исходных данных принята сеть с глухозаземленной нейтралью, для которой

$$I_{K3.K} = U_{\phi} / Z_{\phi-0}, \text{ A} \quad (5.18)$$

где U_{ϕ} – номинальное фазное напряжение сети, В;

$Z_{\phi-0}$ – полное сопротивление цепи тока КЗ для петли «фаза–нуль», Ом.

Сопротивление петли «фаза–нуль»:

$$Z_{\phi-0} = \sqrt{\sum R_{\phi i} + \sum R_{O i} + \sum R_{Д i}}^2 + \sum X_{\phi i} + \sum X_{O i}}^2 + Z_T, \text{ Ом}, \quad (5.19)$$

где $R_{\phi i} = \rho_{\phi i} \cdot l_{\phi i} / S_{\phi i}$ – активное сопротивление фазного провода i -го участка петли «фаза–нуль», Ом;

$R_{O i} = \rho_{O i} \cdot l_{O i} / S_{O i}$ – активное сопротивление нулевого провода, Ом;

$X_{\phi i} = a_{\phi i} \cdot l_{\phi i}$ – реактивное сопротивление фазного провода, Ом;

$X_{O i} = a_{O i} \cdot l_{O i}$ – реактивное сопротивление нулевого провода, Ом;

$R_{Д i}$ – добавочные сопротивления переходных контактов, Ом.

Для распределительных щитов на подстанциях $R_{Д i} = 0,015$ Ом; для первичных РУ напряжением 380 В, питаемых от подстанций $R_{Д i} = 0,02$ Ом; для вторичных РП и на зажимах аппаратов, питаемых от первичных РУ $R_{Д i} = 0,025$ Ом; для аппаратуры, установленной непосредственно у электроприемников, питающейся от вторичных РП $R_{Д i} = 0,03$ Ом.

Z_T – полное расчетное сопротивление питающего трансформатора току КЗ на корпус (землю), Ом (см. табл.5.12).

Таблица 5.12

Полное расчетное сопротивление Z_T питающих трансформаторов току КЗ

Мощность трансформатора, кВА	Z_T , Ом	Мощность трансформатора, кВА	Z_T , Ом
25	3,110	160	0,478
40	1,949	250	0,305
63	1,136	400	0,191
100	0,764	630	0,121

Примечание: Для трансформаторов мощностью свыше 630 кВА $Z_T = 0$.

ρ – удельное сопротивление материала кабеля/провода, Ом*мм²/м. медь – 0,019 Ом* мм²/м; алюминий – 0,032 Ом* мм²/м;

l – длина участка, м;

S_{ϕ}, S_0 – сечение фазной, нулевой жилы кабеля/провода, мм²;

a – удельное индуктивное сопротивление кабеля/провода, Ом/м.

Для кабелей $a = 0,07 \cdot 10^{-3}$ Ом/м; для изолированных проводов, проложенных в трубе $a = 0,09 \cdot 10^{-3}$ Ом/м.

Расчеты выполняются для силовой и осветительной сетей.

Для силовой сети, включающей участки I и II:

$$\sum R_{\phi}^{CC} = R_{\phi}^I + R_{\phi}^{II}, \text{ Ом} \quad (5.20)$$

Аналогично определяются $\sum R_0^{CC}$, $\sum R_D^{CC}$, $\sum X_{\phi}^{CC}$, $\sum X_0^{CC}$. Условия (5.9) – (5.11) проверяются для АЗ участка II.

Для осветительной сети, включающей участки I, III и IV:

$$\sum R_{\phi}^{OC} = R_{\phi}^I + R_{\phi}^{III} + R_{\phi}^{IV}, \text{ Ом} \quad (5.21)$$

Аналогично определяются $\sum R_0^{OC}$, $\sum R_D^{OC}$, $\sum X_{\phi}^{OC}$, $\sum X_0^{OC}$. Условия (5.9) – (5.11) проверяются для АЗ участка IV.

Если соотношения (5.9) – (5.11) не выполняются, то рекомендуется установить на линии промежуточный АЗ с меньшим током срабатывания или принять меры к снижению сопротивления участков петли «фаза–нуль»: заменить материал кабелей / проводов участков, увеличить сечение нулевого или фазного проводов, заменить способ прокладки и пр. В качестве крайней меры допускается переключение питающей линии на трансформатор большей мощности.

8. Проверить отключающую способность АЗ по максимальному значению тока КЗ в начале защищаемого участка $I_{КЗ.Н}$ по условию (5.12). Необходимые параметры АЗ принимаются из табл. 5.1, 5.2, 5.3.

Ток КЗ в начале защищаемого участка $I_{КЗ.Н}$ определяется по формуле:

$$I_{КЗ.Н} = U_{Л} / Z_{\phi}, \text{ Ом} \quad (5.22)$$

где $U_{Л}$ – номинальное линейное напряжение сети, В;

Z_{ϕ} – полное сопротивление цепи тока КЗ для петли «фаза–фаза», Ом;

$$Z_{\phi} = \sqrt{\left(\sum R_{\phi i} + \sum R_{Di} + R_T \right)^2 + \left(\sum X_{\phi i} + X_T \right)^2}, \text{ Ом}, \quad (5.23)$$

где $R_T = c / S_T$ – сопротивление фазы трансформатора питания активное, Ом;

$X_T = d \times R_T$ – то же, индуктивное, Ом.

S_T – мощность трансформатора, кВА;

c – коэффициент активного сопротивления. Для трансформаторов мощностью до 60 кВА включительно равен 4; 60 – 180 кВА – 3,5; 180 – 1000 кВА – 2,5; более 1000 кВА – 2,2.

d – коэффициент индуктивного сопротивления. Для трансформаторов мощностью до 180 кВА включительно равен 2; 180 – 1000 кВА – 3; более 1000 кВА – 4.

Остальные параметры в формуле (5.23) определены ранее (см. (5.19)).

Если условие (5.12) не выполняется, то рекомендуется заменить АЗ на аналогичный с большим предельным током (табл. 1–7 прил. 1 к [18]).

9. Проверить селективность действия АЗ. Для принятой в исходных данных сети достаточно, чтобы номиналы последовательно включенных АЗ в силовой и осветительной сетях отличались друг от друга не менее чем на одну ступень шкалы номинальных токов. Должны выполняться условия:

– для силовой сети

$$I_{\text{Н.ВСТ}}^I > I_{\text{Н.ВСТ}}^{\text{II}}, \text{ А} \quad (5.24)$$

Н.ЭЛ.М
 Н.ТЕПЛ

Н.ЭЛ.М
 Н.ТЕПЛ

— для осветительной сети

$$I_{\text{Н.ВСТ}}^I > I_{\text{Н.ВСТ}}^{\text{III}} > I_{\text{Н.ВСТ}}^{\text{IV}}, \text{ А} \quad (5.25)$$

Н.ЭЛ.М
 Н.ТЕПЛ

Н.ЭЛ.М
 Н.ТЕПЛ

Н.ЭЛ.М
 Н.ТЕПЛ

При несоблюдении селективности следует заменить АЗ на предыдущем последовательно включенном участке и вновь проверить условие.

5.5. Контрольные вопросы

5. Опишите аварийные режимы работы электроустановок.
6. Что называется аппаратом защиты? Виды аппаратов защиты.
7. Устройство и принцип работы плавких предохранителей.
8. Параметры плавких предохранителей.
9. Устройство и принцип работы автоматического выключателя.
10. Виды расцепителей.
11. Параметры автоматических выключателей.
12. Какие сети следует защищать от токов перегрузки?
13. Условия защиты сети от перегрузок и ложных отключений при кратковременных токовых перегрузках?
14. Что называется током КЗ в конце защищаемого участка? Принцип расчета.
15. Что называется током КЗ в начале защищаемого участка? Принцип расчета.
16. Что такое селективность действия аппаратов защиты и как ее обеспечить?