

## 6. ВЫБОР СХЕМЫ И КОНСТРУКТИВНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ ВНУТРИЦЕХОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1 кВ

Основной тенденцией в проектировании электроснабжения является сокращение протяженности сетей низшего напряжения путем максимального приближения высшего напряжения (трансформаторной подстанции) к потребителям электроэнергии.

Сети напряжением до 1 кВ подразделяются на питающие, прокладываемые от трансформаторной подстанции или вводного устройства до силовых пунктов, и распределительные, к которым присоединяются электроприемники. В комплекс внутрицехового электроснабжения входят питающие и распределительные линии, РП напряжением до 1 кВ, аппаратура коммутации и защиты сетей и ответвлений к отдельным электроприемникам. Питающие и распределительные сети могут быть выполнены по радиальным, магистральным и смешанным схемам (О-1 с.172, О-3 с.263, О-6 с.59).

Радиальные схемы наиболее часто используются для питания отдельных относительно мощных электроприемников (двигатели компрессорных и насосных установок, печи и т.д.), а также в случаях, когда мелкие по мощности электроприемники распределяются по цеху неравномерно и сосредоточены группами на отдельных участках (ремонтные мастерские, отдельные участки с непоточным производством и т.п.). Радиальные схемы предпочтительны для взрывоопасных, пожароопасных и пыльных помещений. К достоинствам радиальных схем относятся: высокая надежность питания (выход из строя одной линии не сказывается на работе потребителей, питающихся от других линий), а также возможность автоматизации переключений и защиты.

При выполнении радиальных схем приходится сооружать распределительные щиты (пункты) с большим количеством защитных автоматов и большой щит низкого напряжения в ТП. Применение в радиальных сетях проводки, выполненной кабелем или проводом в трубах (приложение П2), ограничивает возможность перемещения оборудования при перестройке или реконструкции производства.

Магистральные схемы применяются для питания электроприемников, обслуживающих один агрегат и связанных единым технологическим процессом, когда прекращение питания любого из этих электроприемников вызовет необходимость прекращения работы всего технологического агрегата. Магистральные схемы находят широкое применение для питания большого числа мелких электроприемников, распределенных относительно равномерно по площади цеха (металлорежущие станки в цехах механической обработки металлов и другие потребители).

Магистральные схемы позволяют отказаться от применения громоздкого и дорогого распределительного устройства или щита на ТП. В этом случае возможно применение схемы блока трансформатор-магистраль, где в качестве питающей линии используются шинопроводы. Схемы, выполненные шинопроводами ШМА, не подвергаются переделке при перестановках оборудования и добавлении новых электроприемников в цехе в связи с изменениями технологии производства. С помощью нормально разомкнутых перемычек между магистралями разных ТП в местах их сближения можно обеспечить надежное питание потребителей 2-й и даже 1-й категории. Питающие магистрали подключаются к шинам шкафов КТП, специально сконструированным для магистральных схем. К питающим магистралям или при отсутствии их непосредственно к шинам КТП присоединяют распределительные магистрали, выполненные шинопроводами типа ШРА, к которым через автоматический выключатель или предохранитель подключаются электроприемники.

При проектировании следует прежде всего рассматривать применение схем блоков трансформатор-магистраль, по возможности без распределительных устройств напряжением до 1 кВ и без распределительных щитов. Только при наличии веских оснований можно допустить отказ от магистральных схем и применять радиальные схемы питания потребителей.

На практике наибольшее распространение находят смешанные схемы, сочетающие в себе элементы радиальных и магистральных схем. Смешанные схемы характерны для крупных



цехов металлургических заводов, для литейных, кузнечных и механосборочных цехов машиностроительных заводов.

Проектирование цеховых сетей во всех случаях должно выполняться на основе хорошего знания технологии проектируемого цеха, условий окружающей среды и степени ответственности отдельных электроприемников (О-6 с.59-61; Д-1 с.272-281).

Питание электродвигателей передвижных цеховых подъемно-транспортных механизмов (кранов, кран-балок, тельферов) производится с помощью неизолированных проводников - троллеев. В зависимости от расчетной нагрузки троллейные линии питаются от щита ТП или от распределительного пункта, либо от магистрального или распределительного шинпровода. В начале или в конце ответвления к троллейной линии устанавливается рубильник или блок рубильник-предохранитель.

Для удобства эксплуатации при наличии двух и более кранов производится секционирование троллейных линий. Подвод питания лучше осуществлять к средней части секции троллея. Допустимо подводить питание к любой точке троллея, если это не противоречит условиям потери напряжения и рационально с точки зрения конструкции сети (О-2 с.205, 179; Д-6 с.189). Более подробная информация о троллейных линиях приводится в приложении П9.

Конструктивно радиальные сети выполняются: а) изолированными проводами, проложенными открыто на изолирующих опорах по фермам перекрытий либо по колоннам цеха на высоте не менее 3,5 м; б) изолированными проводами в металлических трубах (приложение П2), проложенными по стенам цеха или в полу; в) кабелем, проложенным открыто по стенам цеха или каналах в полу. Распределительные пункты (шкафы) устанавливаются в местах, удобных для обслуживания, возможно ближе к центру нагрузок присоединяемых приемников. Конструктивно РП могут быть размещены на полу, у стен, колонн, на стенах, в нишах. Типы выпускаемых РП и шкафов приведены в справочниках и каталогах (О-2 с.283), а также в приложении П3.

Магистральные сети могут быть выполнены магистральными шинпроводами типа ШМА, проложенными на высоте не ниже 3,5 м, а также комплектными шинпроводами типа ШРА на высоте не ниже 2,5 м от уровня пола. Шинпроводы крепятся к стенам, колоннам, фермам или прокладываются на стойках (О-2 с.147). Более подробная информация о шинпроводах приводится в приложении П1.

Присоединение приемников к шинпроводу производится с помощью ответвлений, выполненных кабелями или проводами, проложенными в трубах. В головной части ответвления на шинпроводе устанавливаются ответвительные коробки с предохранителями или автоматическими выключателями. Распределительные шинпроводы подключаются к магистральным с помощью вводных коробок. При схемах блок трансформатор-магистраль магистральный токовод может подключаться к трансформатору наглухо.

## 7. ВЫБОР СЕЧЕНИЙ ПРОВОДОВ, КАБЕЛЕЙ, ШИН ПО ДОПУСТИМОМУ ДЛИТЕЛЬНОМУ ТОКУ И ПОТЕРЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Сечения проводов, кабелей и шин цеховых сетей напряжением до 1 кВ выбираются сравнением расчетного тока линии с допустимым длительным током принятых марок проводов и кабелей с учетом условий их прокладки и температуры окружающей среды. Должно выполняться условие:

$$I_p \leq K_n \cdot I_{дон},$$

где  $I_{дон}$  - допустимый длительный ток на провода, кабели и шины данного сечения (приложение П6), А;  $K_n$  - поправочный коэффициент на условия прокладки (приложение П6, ПУЭ с.19).

Сечение проводов и кабелей выбирают по экономической плотности тока в сетях до 1 кВ только в случае, если число использования максимума нагрузки превышает 4000-5000 часов. Не выбирают по экономической плотности тока все ответвления к отдельным ЭП, осветительные сети, а также сборные шины распредустройства подстанций.



Выбранные сечения проводов, кабелей и шин проверяют по допустимой потере напряжения во всех случаях. Делается это с целью обеспечения нормального напряжения на зажимах ЭП в пределах допустимых отклонений. Кабели напряжением до 1 кВ следует проверять на термическую устойчивость только в тех случаях, когда они присоединены к цеховому трансформатору мощностью более 1000 кВ·А или при защите их автоматами, имеющими выдержку времени более 1 с.

Выбор сечений проводников в сетях напряжением до 1 кВ, прокладываемых в помещениях, тесно связан с выбором плавких вставок и уставок расцепителей автоматических выключателей. При защите линий предохранителями или автоматами сечения выбираемых проводов и кабелей обязательно должны быть согласованы с номинальными токами плавкой вставки или токами уставки автомата, защищающими данный провод или кабель (см. ПУЭ 1.7.79., 3.1.9., 3.1.13.). Методика такого согласования изложена в разделе выбора защит учебного пособия.

Расчет сетей на потерю напряжения должен обеспечить необходимый уровень напряжения на зажимах ЭП и, как следствие, необходимый момент вращения электродвигателя или требуемую освещенность от источника света.

Существуют установленные ГОСТ 13109-97 нормально допустимые  $\pm 5\%$  от  $U_N$  отклонения напряжения и предельно допустимые  $\pm 10\%$  от  $U_N$  отклонения напряжения. Эти нормы действуют на зажимах электроприемников. На отклонения напряжения у потребителей влияют потери напряжения в питающей и распределительной сети.

Нормами величина потерь напряжения в сети до 1 кВ не установлена. Однако, зная напряжение на шинах трансформаторной подстанции и подсчитав потерю напряжения в сети можно определить отклонение напряжения на зажимах ЭП и сравнить с допустимыми значениями отклонений напряжения.

Напряжение на зажимах наиболее удаленного от трансформатора электродвигателя:

$$U_{\text{об}} = U_x - \Delta U_T - \Delta U_c,$$

где  $U_x$  - напряжение холостого хода на зажимах вторичной обмотки трансформатора и равно 105% от номинального;  $\Delta U_T$  - потеря напряжения в трансформаторе, %;  $\Delta U_c$  - потеря напряжения в сети НН, %.

Потеря напряжения (%) в трансформаторе определяется по формуле:

$$\Delta U_T = \beta \cdot (U_a \cdot \cos \varphi + U_p \cdot \sin \varphi) = \beta \cdot \cos \varphi \cdot (U_a + U_p \cdot \operatorname{tg} \varphi),$$

где  $\beta = S_p/S_n$  - коэффициент загрузки трансформатора с номинальной мощностью  $S_n$  (кВ·А) и расчетной нагрузкой  $S_p$  (кВ·А);  $U_a$ ,  $U_p$  - активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания, определяемые по формулам:

$$U_a = \frac{\Delta P_k}{S_n} \cdot 100\%, \quad U_p = \sqrt{U_k^2 - U_a^2};$$

где  $U_k$  - напряжение к.з., %;  $\Delta P_k$  - потери мощности в режиме к.з., кВт;  $\cos \varphi$  - коэффициент мощности на зажимах вторичной обмотки трансформатора. Значения  $\Delta P_k$  и  $U_k$  находятся в каталогах на трансформаторы.

Потеря напряжения (%) в сети определяется по формулам:

а) для линии переменного трехфазного тока: 
$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot I_p \cdot L}{U_n} (r_o \cdot \cos \varphi + x_o \cdot \sin \varphi) \cdot 100\% ;$$

б) для линии переменного однофазного тока: 
$$\Delta U = \frac{2 \cdot I_p \cdot L}{U_n} (r_o \cdot \cos \varphi + x_o \cdot \sin \varphi) \cdot 100\% ;$$

в) для линии постоянного и однофазного переменного тока с активной нагрузкой:

$$\Delta U = \frac{2 \cdot I_p \cdot L}{U_n} \cdot r_o \cdot 100\% ,$$

где  $I_p$  - расчетный ток в линии на данном участке, А;  $r_o$  и  $x_o$  - активное и индуктивное сопротивление 1 км линии, Ом/км;  $L$  - расстояние от точки питания до точки приложения равнодействующей нагрузки, км;  $U_n$  и  $U_N$  - линейное и номинальное напряжение сети, В;  $\cos \varphi$  - коэффициент мощности нагрузки.



Таблица 7.1. Области применения проводов 1 - по несгораемым и трудносгораемым поверхностям, 2 - по сгораемым поверхностям

1	2	3	Характеристика помещения и среды						10	11
			сухое	влажное	сырое, обо сырое	жаркое	пыльное	химич. активная среда		
ОТКРЫТЫ	непосредственно	1	АПВ АПШВ АПРН АПРФ	АПВ АПШВ АПРН АПРИ	АПВ АПШВ	АПРФ АПРН	АПВ АПШВ АПРИ АПРФ	АПРФ АПРН	10	11
		2	АПРФ АПРН АПВ АПРИ	АПРН	АПРН	АПРФ	АПРН	-	-	-
	с подкладкой под провода негорючего материала	2	АПВ, АПШВ АПРИ	АПВ, АПШВ АПРИ	АПВ, АПШВ	-	АПВ АПШВ АПРИ	-	-	-
		1	АПРИ, АПВ	АПВ	АПВ	-	-	-	-	-
		2	АПРИ, АПВ	АПВ	АПВ	АПВ	-	-	-	-
	на лотках и в коробах с открываемыми крышками	1	АПРИ, АПВ	АПВ	АПВ	АПВ	АПРИ, АПВ	-	-	-
		1	АПВ, АПРН	АПВ, АПРН	АПВ, АПРН	-	-	АПВ АПРН АПРФ	-	-
		2	АПВ, АПРН	АПВ, АПРН	АПВ, АПРН	-	-	-	-	АПВ АПРН
	в ПВХ-трубах	1	АПВ, АПШВ, АПРН	АПВ, АПШВ, АПРН	АПВ, АПШВ, АПРН	-	-	АПВ АПРН	-	АПРТО АПРН
		1	АПРТО*, АПВ, АПШВ, АПРН	АПРТО*, АПВ, АПШВ, АПРН	АПВ, АПШВ, АПРН	АПРТО* АПВ АПРН	-	АПРТО* АПВ АПРН	АПРТО* АПВ АПРН	АПРТО* АПРН
2		АПРТО*, АПВ, АПШВ, АПРН	АПРТО*, АПВ, АПШВ, АПРН	АПВ, АПШВ, АПРН	АПРТО АПВ АПРН	-	-	-	-	
в стальных трубах	1	АПВ, АПШВ, АРТ, АПРН, АПВ	АПВ, АПШВ, АРТ, АПРН, АПВ	АПВ, АПШВ, АРТ, АПРН, АПВ	-	-	АПРН	-	АПВ АПРН	
	2	АПВ, АПШВ, АРТ, АПРН, АПВ	АПВ, АПШВ, АРТ, АПРН, АПВ	АПВ, АПШВ, АРТ, АПРН, АПВ	-	-	-	-	АПВ АПРН	
в ПВХ-трубах	1	АПВ, АПШВ, АПРН	АПВ, АПШВ, АПРН	АПВ, АПШВ, АПРН	-	-	АПВ АПРН	-	АПРТО* АПВ	
	2	АПВ, АПШВ, АПРН	АПВ, АПШВ, АПРН	АПВ, АПШВ, АПРН	-	-	АПВ АПРН	-	АПРТО* АПВ	



С	В полистилен-трубах (замоноличено в бороздах) в сплошном слое нето-роч.материалов	1	АПВ, АПШВ, АПРН	-	-	АПВ АПРН	-	АПВ АПРН	АПТО АПВ
		1	АПТО*, АПВ, АПШВ, АПРН	АПТО* АПВ АПРН	-	-	АПТО* АПВ АПРН	-	АПТО* АПВ
Р	в стальных трубах	1	АПТО*, АПВ, АПШВ, АПРН	АПТО* АПВ АПРН	-	-	АПТО* АПВ АПРН	-	АПТО* АПВ
		2	АПТО*, АПВ, АПШВ, АПРН	АПТО* АПВ АПРН	-	-	АПТО* АПВ АПРН	-	АПТО* АПВ
Т	по стенам, перегородкам и перекрытиям - в сухой или мокрой	1	АПШВ	-	-	АПШВ	-	-	-
		2	АПШВ	-	-	АПШВ	-	-	-
О	штукатурке, в бороздах ж/б крупнопа- нельных плит	1	АПШВ	-	-	АПШВ	-	-	-
		2	АПШВ	-	-	АПШВ	-	-	-
Прочие виды прокладки: по станкам и механизмам		-	ПРП, ПРПП	-	-	-	-	-	-
● - провод снят с производства, но в эксплуатации имеет место.									

Таблица 7.2. Области применения кабелей в помещениях и сооружениях

Место прокладки и условия среды	С бумажной пропитанной изоляцией в металлической оболочке		Кабели механическим воздействием		С пластмассовой изоляцией и оболочкой	
	не подвергаются	подвергаются	не подвергаются	подвергаются	не подвергаются	подвергаются
В производственных помещениях, каналах:	сухих	ААГ, ААПШВ	ААБГ	ААВГ, АПВВГ	ААВГ, АПВВГ	АВВГ, АВРГ
	сырых	ААПШВ, АСПШВ	ААБГ	АПВГ, АПСВГ	АВВГ, АВРГ	АВВШВ, АПВВГ
	сырых (при средней и высокой коррозионной активности)	ААГ, ААПШВ	ААБГ, ААБШВ	АВВГ, АВРГ, АНРГ	АВВГ, АВВБГ	АВВБШВ, АВРГ
	пожароопасных зонах	СВГ, СВШВ ААБГ, АСВГ ААГ, АСГ, АСПВ	-	ВВГ АВВГ	ВВВ, ВВШВ АВВВ, АВВБШВ, АВВВГ	ВВВ, ВВШВ АВВВ, АВВБГ АПВВГ, АВАШВ
в ВОП зонах классов: В-1, В-1а В-1г, В-П В-1б, В-Пa на технологичес.эстакадах	СГ, АСГ	ААБГ, АСБГ ААБГ, АСБГ ААБГ, АСБГ ААБГ, АСБГ	-	АВВГ, АПВВГ, АПВВГ, АПВВГ	-	-

Примечания. Применение кабелей с медными жилами или в свинцовой оболочке должно быть в каждом конкретном случае технически обосновано. Внутри зданий кабельные линии могут прокладываться непосредственно по конструкциям, в каналах, трубах, проложенных в полах и перекрытиях. Для четырехпроводных электросетей до 1 кВ следует применять кабели с пластмассовой изоляцией и пластмассовой оболочкой с четвертой (нулевой) жилой, сечение которой равно сечению основных жил кабеля. Для ПИМА 4-1250 и ПИМА 4-1600 применяют переходные секции на кабель марки АВВ сечением 1000 и 1500 мм<sup>2</sup> (приложение П1).



Таблица 7.3. Основные технические данные проводов

Тип провода	Наименование провода	Число жил	Сечение жил, мм <sup>2</sup>
<i>с ПВХ-изоляцией</i>			
АПВ	с алюминиевой жилой	1	2,5-120
АППВ	с алюминиевыми жилами, плоский, с разделительным основанием	2, 3	2,5-6
<i>с резиновой изоляцией</i>			
АПРН	с алюминиевой жилой в негорючей резиновой оболочке	1	2,5-120
АПРИ	с алюминиевой жилой, с резиновой изоляцией, обладающей защитными свойствами	1	2,5-120
<i>с резиновой изоляцией в металлической оплетке или оболочке</i>			
ЭРП	с медной жилой, в оплетке из стальных оцинкованных проволок	1-3	1-95
		4, 6-8	4-10
ПРРП	то же в резиновой оболочке	4-8, 10	1-2,5
АПРФ	с алюминиевой жилой в фальцованной оболочке из сплава АМЦ	1-3	2,5-4
<i>со стальным несущим тросом</i>			
АВТ	с алюминиевыми жилами, с ПВХ-изоляцией	2, 3	2,5-4
		4	2,5-16
АВТУ	то же с усиленным несущим тросом	2, 3; 4	2,5-4; 2,5-16
АРТ	с алюминиевыми жилами, с резиновой изоляцией, с несущим тросом	2; 3	2,5-4; 4-6
		4	4-35

Таблица 7.4. Основные технические данные кабелей

Тип кабеля	Наименование кабеля	Число жил	Сечение жил, мм <sup>2</sup>	
			0,66 кВ	1 кВ
АВВГ АВВБ	С ПВХ-изоляцией и оболочкой, без наружных покровов	1-3	1,5-50	1,5-240
		5	-	2,5-35
АВАШв	С ПВХ-изоляцией и с алюминиевой оболочкой с наружным покровом из ПВХ-шланга	3-4	-	4-185
АПсВГ АПсВБ	С изоляцией из самозатухающего полиэтилена без наружных покровов	1-3	1,5-50	1,5-240
		4	2,5-50	2,5-185
АПвВГ АПвВБ	С изоляцией из вулканизированного полиэтилена без наружных покровов (Г - голый, Б - бронированный)	1-3	1,5-50	1,5-240
		4	2,5-50	2,5-185
ААГУ ААШвУ	С бумажной пропитанной изоляцией, алюминиевой обмоткой, усиленный	1	-	10-800
		3	-	6-240

Таблица 7.5. Данные распределительных шинопроводов до 1 кВ, f = 50 Гц

Показатели	ШРА 4-100	ШРА 4-250	ШРА 4-400	ШРА 4-630
Номинальный ток, А	100	250	400	630
Электродинамическая стойкость, кА	7	15	25	35
$\Delta U$ на 100 м при равномерно распределенной нагрузке и $\cos \varphi = 0,8$ , В	-	6,5	8,0	8,5
Сечение шин, мм	3,55x11,2	35x5	50x5	80x5
Степень защиты	IP 44	IP 44	IP 44	IP 44

Примечание. Технические данные для магистральных шинопроводов ШМА4 на 1250, 1600, 2500 и 3200 А см. в приложении П1 или О-2 с.150. Более подробная информация по распределительным шинопроводам приведена в приложении П1.

Если потери напряжения, определенные по приведенным формулам, приводят к отклонениям напряжения на зажимах ЭП больше допустимых, то выбирают проводники большего сечения и проводят проверочный расчет для нового сечения.

Для практических расчетов величины  $r_0$  и  $x_0$  для проводов и кабелей определяются по приложению П6, табл. П6.10 или (Д-4 т.1 с.120; О-2 с.175; Д-2 с.345).

Для проводов и кабелей величина активного сопротивления в зависимости от их сечения значительно изменяется. Для проводов, проложенных в стальных трубах и кабелей, вели-



чина реактивного сопротивления почти не зависит от сечения и в среднем равна 0,07 Ом/км. Для проводов, проложенных открыто, величина реактивного сопротивления равна в среднем примерно 0,25 Ом/км.

Реактивное сопротивление для проводов и кабелей сечением менее 25 мм<sup>2</sup> практически можно не учитывать; для сечений от 25 мм<sup>2</sup> до 70 мм<sup>2</sup> учитывать в зависимости от конкретных условий и отношения  $r$  и  $x$ ; при сечениях, больших 70 мм<sup>2</sup>, учитывать реактивное сопротивление проводов и кабелей необходимо всегда.

#### ПРИМЕР расчета сечений проводников питающих сетей.

Сечение кабелей цеховых сетей напряжением до 1кВ выбирается сравнением расчётного тока линии с допустимым длительным током принятых марок проводов и кабелей с учётом условий их прокладки и температуры окружающей среды.

Должно выполняться условие:

$$I_p \leq K_n \cdot I_{доп},$$

где  $I_p$  – расчётный ток линии, А;  $I_{доп}$  – допустимый длительный ток на кабели данного сечения, А,

$$I_{доп} = I_{доп}^{табл} \cdot 0,92,$$

где  $I_{доп}^{табл}$  – допустимый табличный ток для трёхжильных кабелей, А; 0,92 – коэффициент, учитывающий ток для четырёхжильных кабелей, о.е.;  $K_n$  – поправочный коэффициент на условия прокладки, о.е.;

$$K_n = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3,$$

где  $K_1$  – поправочный коэффициент, зависящий от температуры окружающей среды, о.е.;  $K_2$  – поправочный коэффициент на число работающих кабелей, о.е.;  $K_3$  – поправочный коэффициент на способ прокладки, равный 1, о.е.

Выбранные сечения проводов и кабелей проверяются по допустимой потере напряжения. Делается это целью обеспечения нормального напряжения на зажимах ЭП в пределах допустимых отклонений.

Потеря напряжения в сети определяется по формуле, %

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot I_p \cdot L}{U_n} \cdot (r_0 \cdot \cos \varphi + x_0 \cdot \sin \varphi) \cdot 100,$$

где  $I_p$  – расчётный ток линии на данном участке, А;  $L$  – расстояние от точки питания до точки приложения равно действующей нагрузки, км;  $r_0$ ,  $x_0$  – активное и индуктивное сопротивление 1 км линии, Ом/км;  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности данного участка, о.е.;  $U_n$  – линейное напряжение, равное 380 В.

Пример расчета приводится для линии КТП – СП1.

$$I_p = 25,65 \text{ А.}$$

Для прокладки принимаются кабель с алюминиевыми жилами сечением 6 мм<sup>2</sup>. Для данного кабеля:

$$I_{доп} = 32 \cdot 0,92 = 29,44; \quad 25,65 < 29,44.$$

Условие выполняется.

Принимается АВВГ 4х6, имеющий следующие параметры:  $r_0 = 5,21$  Ом/км,  $x_0 = 0,1$  Ом/км.

Потеря напряжения на данном участке, %

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot 25,65 \cdot 40 \cdot 10^{-3}}{380} \cdot (5,21 \cdot 0,85 + 0,1 \cdot 0,53) \cdot 100 = 2,1.$$

Расчёт для остальных линий производится аналогично, результаты расчёта сводятся в таблицу.

Таблица примера. Выбор сечений кабелей питающей сети

Наименование линии	$\frac{\cos \varphi}{\sin \varphi}$	$I_p$ , А	$I_{доп}$ , А	Марка кабеля	$r_0$ , Ом/км	$x_0$ , Ом/км	$L$ , м	$\Delta U$ , %

#### ПРИМЕР расчета сечений проводов распределительной сетей.

Распределительная сеть выполнена проводами марки АПВ в трубах. Расчётный ток электроприёмника

А,

$$I_p = \frac{P_{ном} \sqrt{\eta}}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi_n},$$

где  $P_{ном}$  – номинальная активная мощность станка, кВт;  $\cos \varphi_n$  – номинальный коэффициент мощности станка, о.е.

Выбор сечений ведётся по тем же условиям, что и в предыдущем примере. Значение  $I_{доп}^{табл}$  принимается для четырех одножильных проводов, проложенных в одной трубе. Потеря напряжения в распределительной сети определяется аналогично предыдущему примеру.



Пример выбора сечения проводов для линии СП1 – 39-74, питающей ЭП №39 и ЭП №74, соединенные последовательно.

$$I_p = \frac{1,7 + 2,5}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,5 \cdot 1} = 20,4$$

Принимается провод АПВ сечением 4 мм<sup>2</sup>.

Для выбранного провода:

$$20,24 < 23.$$

Условие выполняется. Результаты выбора сечений проводов сводятся в таблицу.

Таблица примера. Выбор сечений проводов распределительной сети

Наименование линии	$P_{ном}$ , кВт	$Q_{ном}$ , квар	$\frac{\cos \varphi}{\sin \varphi}$	$I_p$ , А	$I_{доп}$ , А	Марка провода	$r_{00}$ , Ом/км	$x_{00}$ , Ом/км	L, м	$\Delta U$ , %

Наиболее удаленный электроприемник поз.42, который питается от СП9. Напряжение на зажимах наиболее удаленного от КТП электроприемника, %

$$U_{об} = U_x - \Delta U_T - \Delta U_c$$

где  $U_x$  – напряжение холостого хода на зажимах вторичной обмотки трансформатора КТП, равное 105%;  $\Delta U_T$  – потеря напряжения в трансформаторе КТП, %

$$\Delta U_T = K_s \cdot (U_a \cdot \cos \varphi + U_p \cdot \sin \varphi),$$

где  $U_a$  – активная составляющая напряжения к.з., %

$$U_a = \frac{\Delta P_k}{S_n} \cdot 100,$$

где  $\Delta P_k$  – потери короткого замыкания

$$U_a = \frac{7,6}{1000} \cdot 100 = 0,76;$$

$U_p$  – реактивная составляющая напряжения к.з., %

$$U_p = \sqrt{U_A^2 - U_a^2},$$

где  $U_A$  – напряжение к.з., %;

$$U_p = \sqrt{5,5^2 - 0,76^2} = 5,44;$$

$$\Delta U_T = 0,76 \cdot (0,76 \cdot 0,7 + 5,44 \cdot 0,71) = 3,34;$$

$\Delta U_c$  – потеря напряжения в сети (в питающей и в распределительной), %;

$$U_{об} = 105 - 3,34 - 0,59 - 1,1 - 3,29 - 0,63 = 96,05.$$

Напряжение на зажимах наиболее удаленного станка находится в допустимых пределах.

#### ПРИМЕР выбора кабеля для конденсаторной установки.

Выбор кабельной линии КТП – КУ производится по номинальному току КУ, А

$$I_{доп} \geq I_{ном КУ},$$

где  $I_{доп}$  – допустимый ток кабеля, А;  $I_{ном КУ}$  – номинальный ток конденсаторной установки, А;

$$I_{ном КУ} = \frac{Q_{КУ}}{\sqrt{3} \cdot U_H},$$

$$I_{ном КУ} = \frac{300}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 455,8$$

Выбираются 2 параллельно работающих кабеля марки АВВГ (2 АВВГ 3x185) с суммарным допустимым током  $I_{доп} = 2 \cdot 270 = 540$  А.

Кабель проверяется по зарядному току КУ, А

$$I_{доп}^{n/aa} \geq I_{3 КУ},$$

где  $I_{доп}^{n/aa}$  – послеаварийный ток кабеля с учетом допустимой перегрузки кабеля, А;  $I_{3 КУ}$  – зарядный ток конденсаторной установки, А;

$$I_{3 КУ} = 1,3 \cdot I_{ном КУ}, \quad I_{3 КУ} = 1,3 \cdot 455,8 = 592,5,$$

$$1,25 \cdot 540 = 675 > 592,5.$$

Условие выполняется.



## 8. РАСЧЕТ ТОКОВ К.З. В СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1 кВ

Расчет токов к.з. необходим для проверки выбранного электрооборудования, коммутационных аппаратов, выбора уставок релейной защиты. Ниже дана методика расчетов максимальных и минимальных значений тока к.з. при симметричных и несимметричных к.з. согласно ГОСТ 28249-93. Для выбора и проверки электрооборудования по условиям к.з. необходимо рассчитать:

- 1) начальное значение периодической составляющей тока к.з.;
- 2) апериодическую составляющую тока к.з.;
- 3) ударный ток к.з.

При расчетах токов к.з. необходимо учитывать:

1) индуктивные сопротивления всех элементов короткозамкнутой цепи: основные трансформаторы, проводники, трансформаторы тока, реакторы, токовые катушки автоматических выключателей;

- 2) активные сопротивления элементов к.з. цепи;
- 3) активные сопротивления различных контактов и контактных соединений;
- 4) значения параметров синхронных и асинхронных электродвигателей;

При расчетах токов к.з. рекомендуется учитывать:

- 1) сопротивление электрической дуги в месте к.з. (приложение П13). При учете сопротивления дуги получают минимальное значение тока к.з.;
- 2) изменение активного сопротивления проводников короткозамкнутой цепи вследствие их нагрева при к.з. (приложение П15);
- 3) влияние комплексной нагрузки (электродвигатели, преобразователи, термические установки, лампы накаливания) на ток к.з., если номинальный ток электродвигателей нагрузки превышает 1,0% начального значения периодической составляющей тока к.з., рассчитанной без учета нагрузки.

При расчетах токов к.з. допускается:

1) максимально упрощать и эквивалентировать всю внешнюю сеть по отношению к месту к.з. и индивидуально учитывать только автономные источники электроэнергии и электродвигатели, непосредственно примыкающие к месту к.з.;

- 2) не учитывать ток намагничивания трансформаторов;
- 3) не учитывать насыщение магнитных систем электрических машин;

4) принимать коэффициенты трансформации трансформаторов равными отношению средних номинальных напряжений тех ступеней напряжения сетей, которые связывают трансформаторы. При этом следует использовать следующую шкалу средних номинальных напряжений: 37; 24; 20; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15; 0,69; 0,525; 0,4; 0,23 кВ;

5) не учитывать влияния асинхронных электродвигателей, если их суммарный номинальный ток не превышает 1,0% начального значения периодической составляющей тока в месте к.з., рассчитанного без учета электродвигателей.

Расчет токов к.з. в трехфазных сетях переменного тока напряжением до 1 кВ выполняется в именованных единицах (мОм), в отличие от расчетов в электроустановках выше 1 кВ.

Рекомендуется начинать расчет с составления расчетной схемы с нанесением на нее точек к.з. на шинах НН ТП, на начале одной из отходящих радиальных линий или на магистральном шинопроводе сразу за коммутационным аппаратом, а также на ближайшем РП, к которому возможна подпитка точки к.з. от ЭД. На расчетной схеме указывается среднее напряжение ВН (6,3; 10,5; 37 кВ) питающей линии к трансформатору и действующее значение периодической составляющей тока  $I_{КВН}$  (кА) при трехфазном к.з. у выводов ВН трансформатора (при отсутствии данных  $I_{КВН}$  может быть заменен на ток  $I_{н.откл.}$  - номинальный ток отключения выключателя, установленного на ступени ВН трансформатора в начале питающей линии), а также указываются следующие параметры оборудования: силового трансформатора ( $S_{HT}$ , напряжение ВН и НН,  $R_K$ ,  $u_K$ , схема соединения обмоток трансформатора), трансформаторов тока ТТ (первичный ток или коэффициент трансформации, класс точности), автоматических выключателей



(тип,  $I_H$  выключателя), кабелей и шин (марка, сечение, количество жил, длина), для АД и СД (тип,  $P_H$ ,  $U_H$ ,  $I_H$ ,  $\cos \varphi_H$ ,  $I_{II}/I_H$ ,  $M_{II}/M_H$ ,  $M_M/M_H$  и  $s_H$  - скольжение, % для АД).

Затем составляется схема замещения, на которой указываются активные и реактивные сопротивления в МОм, приведенные к ступени напряжения сети точки к.з.

### Расчет сопротивлений различных элементов схемы замещения.

Расчет сопротивлений различных элементов схемы замещения. ведется в следующем порядке.

$x_c$  - эквивалентное индуктивное сопротивление энергосистемы, приведенное к ступени НН, рассчитывается по формуле:

$$x_c = \frac{U_{СТНН}^2 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3} \cdot I_{КВН} \cdot U_{СТВН}} = \frac{U_{СТНН}^2 \cdot 10^{-3}}{S_K}$$

где  $U_{СТНН}$  - напряжение ступени НН (0,4 кВ) трансформатора, кВ;  $U_{СТВН}$  - напряжение ступени ВН (6,3; 10,5; 37), к которой подключен трансформатор, кВ;  $I_{КВН} = I_{ПОВН}$  - действующее значение периодической составляющей тока при трехфазном к.з. у выводов ВН трансформатора, кА;  $S_K$  - мощность к.з. у выводов ВН трансформатора, МВ·А.

$r_T$ ,  $x_T$  - активные и индуктивные сопротивления прямой последовательности силового трансформатора с приведением к ступени НН рассчитывают по формулам:

$$r_T = \frac{P_K \cdot U_{СТНН}^2 \cdot 10^6}{S_{HT}^2}; \quad x_T = \sqrt{u_K^2 - \left(\frac{100 \cdot P_K}{S_{HT}}\right)^2} \cdot \frac{U_{СТНН}^2 \cdot 10^4}{S_{HT}}$$

где  $S_{HT}$  - номинальная мощность трансформатора, кВ·А;  $P_K$  - потери к.з. в трансформаторе, кВт;  $U_{СТНН}$  - напряжение ступени НН (0,4 кВ) трансформатора, кВ;  $u_K$  - напряжение к.з. трансформатора, %.

Рекомендуется применять трансформаторы со схемой соединения обмоток  $\Delta/Y_0$ , у которых активные и индуктивные сопротивления нулевой последовательности равны соответственно активным и индуктивным сопротивлениям прямой последовательности, т.е.  $r_{0T} = r_T$ ;  $x_{0T} = x_T$ .

$r_{та}$ ,  $x_{та}$  - активное и индуктивное сопротивления ТТ приведены в табл. 8.2. Можно принимать  $r_{ота} = r_{та}$ ;  $x_{ота} = x_{та}$ . Сопротивлениями ТТ с первичными токами более 500 А пренебрегают.

Таблица 8.1. Активные и индуктивные сопротивления, МОм трансформаторов масляных и с негорючим диэлектриком для КТП 6-10/0,4 кВ

$S_{HT}$ , кВ·А	$u_K$ , %	$P_K$ , кВт	$x_{1T} = x_{2T}$	$x_{0T}$	$r_{1T} = r_{2T}$	$r_{0T}$	$z_{0T}^{(1)}/3$
соединение обмоток $Y/Y_0$							
100	4,5	1,97	64,7	581,8	31,5	253,9	260
160	4,5	2,65	41,7	367	16,6	150,8	162
250	4,5	3,7	27,2	234,9	9,4	96,5	104
400	для	5,5	17,1	148,7	5,5	55,6	65
630	КТП	7,6	13,6	96,2	3,1	30,3	43
1000		5,5	10,8	8,5	60,6	2,0	19,1
1600		6,0	16,5	4,9	37,8	1,3	11,9
2500		6,0	24,0	-	-	-	-
соединение обмоток $\Delta/Y_0$							
100	4,5	1,97	66	66	36,3	36,3	75,3
160	4,5	2,65	43	43	19,3	19,3	47
250	4,5	3,7	27	27	10,7	10,7	30
400	для	5,5	17	17	5,9	5,9	18,7
630	КТП	7,6	13,5	13,5	3,4	3,4	14,0
1000		5,5	10,8	8,6	8,6	2,0	9
1600		6,0	16,5	5,4	5,4	1,1	5,7
2500		6,0	24,0	-	-	-	-

Примечание. Для сухих трансформаторов типа ТС3160-2500 кВ·А значения  $u_K$  и  $P_K$  см. (О-3 с.222).



Таблица 8.2. Сопротивления первичных обмоток многовитковых ТТ

Коэффициент трансформации ТТ	Сопротивления ТТ, мОм, класса точности			
	1		3	
	$x_{та}$	$r_{та}$	$x_{та}$	$r_{та}$
20/5	67	42	17	19
30/5	30	20	8	8,2
40/5	17	11	4,2	4,8
50/5	11	7	2,8	3
75/5	4,8	3	1,2	1,3
100/5	2,7	1,7	0,7	0,75
150/5	1,2	0,75	0,3	0,33
200/5	0,67	0,42	0,17	0,19
300/5	0,3	0,2	0,08	0,088
400/5	0,17	0,11	0,04	0,05
500/5	0,07	0,05	0,02	0,02

Таблица 8.3. Сопротивления катушек и контактов выключателей

Номинальный ток выключателя, А	Сопротивление катушки и контакта, мОм	
	$r_{кв}$	$x_{кв}$
50	7	4,5
70	3,5	2
100	2,15	1,2
140	1,3	0,7
200	1,1	0,5
400	0,65	0,17
600	0,41	0,13
1000	0,25	0,1
1600	0,14	0,08
2500	0,13	0,07
4000	0,1	0,05

Таблица 8.4. Сопротивления контактных соединений кабелей

Сечение алюмин. жил кабеля, мм <sup>2</sup>	16	25	35	50	70	95	120	150	240
Сопротивление, мОм	0,085	0,064	0,056	0,043	0,029	0,027	0,024	0,021	0,012

Таблица 8.5. Сопротивления контактных соединений шинопроводов

Номинальный ток, А	250	400	630	1600	2500	4000
Серия шинопроводов	ШРА-73	ШРА-73	ШРА-73	ШМА-73	ШМА-68Н	ШМА-68Н
Сопротивление мОм	0,009	0,006	0,004	0,003	0,002	0,001

Таблица 8.6. Активные сопротивления разъемных контактов коммутационных аппаратов напряжение до 1 кВ

Номинальный ток аппарата, А	50	70	100	150	200	400	600	1000	3000
Автоматическ. выключателя, мОм	1,3	1,0	0,75	0,65	0,6	0,4	0,25	0,12	-
Рубильника, мОм	-	-	0,5	-	0,4	0,2	0,15	0,08	-
Разъединителя, мОм	-	-	-	-	-	0,2	0,15	0,08	-

$r_{кв}$ ,  $x_{кв}$  - активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности катушек (расцепителей) автоматических выключателей приведены в табл.8.3. Можно считать, что  $r_{окв} = r_{кв}$ ,  $x_{окв} = x_{кв}$ .

$r_k$  - активные сопротивления контактов и контактных соединений приведены в табл. 8.4 – 8.6.

$r_{1кб}$ ,  $x_{1кб}$  - активные и индуктивные сопротивления кабелей прямой последовательности. Активные и индуктивные сопротивления кабелей прямой (обратной) и нулевой последовательностей даны в табл. 8.7 – 8.9.



Таблица 8.7. Параметры кабеля с алюминиевыми жилами в алюминиевой оболочке / в непроводящей оболочке

Сечение жил, мм <sup>2</sup>	Сопротивление трехжильного кабеля, мОм/м			
	$r_{1к} = r_{2к}$	$x_{1к} = x_{2к}$	$R_{ок}$	$X_{ок}$
3x4	9,61	0,092	10,95/11,7	0,579/2,31
3x6	6,41	0,087	7,69/8,51	0,523/2,274
3x10	3,84	0,082	5,04/5,94	0,461/2,24
3x16	2,4	0,078	3,52/4,5	0,406/2,2
3x25	1,54	0,062	2,63/3,64	0,359/2,17
3x35	1,1	0,061	2,07/3,3	0,298/2,14
3x50	0,769	0,06	1,61/2,869	0,257/2,08
3x70	0,549	0,059	1,31/2,649	0,211/2,07
3x95	0,406	0,057	1,06/2,505	0,174/2,05
3x120	0,32	0,057	0,92/2,42	0,157/2,03
3x150	0,256	0,056	0,78/2,36	0,135/2,0
3x185	0,208	0,056	0,66/-	0,122/-
3x240	0,16	0,055	0,553/-	0,107/-

Таблица 8.8. Параметры кабеля с алюминиевыми жилами в алюминиевой оболочке в непроводящей оболочке

Сечение жил, мм <sup>2</sup>	Сопротивление четырехжильного кабеля, мОм/м			
	$r_{1к} = r_{2к}$	$x_{1к} = x_{2к}$	$r_0$	$x_0$
3x4 + 1x2,5	9,61	0,098	10,87/11,74	0,57/2,11
3x6 + 1x4	6,41	0,094	7,6/8,71	0,463/1,968
3x10 + 1x6	3,84	0,088	4,94/5,9	0,401/1,811
3x16 + 1x10	2,4	0,084	3,39/4,39	0,336/1,558
3x25 + 1x16	1,54	0,072	2,41/3,42	0,256/1,286
3x35 + 1x16	1,1	0,068	1,93/2,97	0,232/1,241
3x50 + 1x25	0,769	0,066	1,44/2,449	0,179/0,949
3x70 + 1x35	0,549	0,065	1,11/2,039	0,145/0,741
3x95 + 1x50	0,405	0,064	0,887/1,605	0,124/0,559
3x120 + 1x50	-/0,32	-/0,064	-/1,54	-/0,545
3x150 + 1x70	-/0,256	-/0,063	-/1,276	-/0,43

Примечание: параметры кабелей с алюминиевыми жилами со свинцовой оболочкой и медными жилами см. ГОСТ 28249-93 приложение 2.

Таблица 8.9. Параметры комплектных шинопроводов

Тип шинопровода	Номинальное напряжение кВ	Номинальный ток, А	Сопрот. фазы, мОм/м		Сопрот. нулевого провода, мОм/м	
			$r$	$x$	$r_{нп}$	$x_{нп}$
ШРА 73	0,38/0,22	250	0,21	0,21	0,12	0,21
ШРА 73	0,66/0,38	400	0,15	0,17	0,162	0,164
ШРА 73	0,66/0,38	630	0,1	0,13	0,162	0,164
ШМА 4	0,66/0,38	1250	0,034	0,016	0,054	0,053
ШМА 4	0,66/0,38	1600	0,03	0,014	0,037	0,042
ШМА 4	0,66/0,38	2500	0,017	0,008	0,07	0,046

Примечание: расчет сопротивлений  $r$  и  $x$  токопроводов в зависимости от размеров и взаимного расположения шин, а также  $t^{\circ}C$  см. ГОСТ 28249-93 приложение 1.

Таблица 8.10. Активные сопротивления дуги

Расчетные условия к.з.	$r_{д}$ мОм при к.з. за трансформаторами мощностью					
	250	400	630	1000	1600	2500
к.з. вблизи выводов НН трансформатора						
в разделе КЛ 0,4 кВ	15	10	7	5	4	3
в ШМА4 0,4 кВ	-	-	-	6	4	3

$r_{ш}$ ,  $x_{ш}$  - активные и индуктивные сопротивления шинопроводов даны в табл. 8.9. Активное и индуктивное сопротивление нулевой последовательности шинопроводов вычисляется по формулам  $r_{ош} = r + 3 \cdot r_{нп}$ ;  $x_{ош} = x + 3 \cdot x_{нп}$ .



$r_d$  - активные сопротивления дуги даны в табл. 8.10 или могут быть определены также по кривым приложения П13. При учете сопротивления дуги получают минимальное значение тока к.з., если сопротивление дуги при расчете тока к.з. не учитывать, то получают максимальное значение тока к.з.

$r_{AD}$  и  $x_{AD}''$  - соответственно суммарное активное сопротивление АД в начальный момент к.з. и сверхпереходное индуктивное сопротивление АД в мОм

$$r_{AD} = r_1 + 0,96 \cdot r_2,$$

где  $r_1$  - активное сопротивление статора, мОм;  $r_2$  - активное сопротивление ротора, мОм, приведенное к статору.

$$r_1 = s_n \cdot \frac{U_n^2 \cdot \cos \varphi_n}{P_n} \cdot 10^6,$$

где  $U_n$  - номинальное линейное напряжение статора, кВ;  $P_n$  - номинальная мощность АД, кВт;  $s$  - номинальное скольжение, о.е.

$$r_2 = \frac{0,36 \cdot \kappa_{пм} (P_n \cdot 1,02)}{\kappa_n^2 \cdot I_n^2 (1 - s_n)} \cdot 10^6,$$

где  $\kappa_{пм} = M_{п}/M_n$  - кратность пускового момента АД по отношению к его номинальному моменту;  $\kappa_n = I_n/I_n$  - кратность пускового тока АД по отношению к его номинальному току;  $I_n$  - номинальный ток АД, А.

$$x_{AD}'' = \sqrt{z_{AD}^2 - r_{AD}^2} = \sqrt{\left(\frac{U_{нф} \cdot 10^6}{\kappa_n \cdot I_n}\right)^2 - r_{AD}^2},$$

где  $U_{нф} = U_n/\sqrt{3}$  - номинальное фазное напряжение АД, кВ.

$x_d''$  и  $r_{CD}$  - соответственно индуктивное сверхпереходное сопротивление по продольной оси ротора и сопротивление обмотки статора СД, мОм, причем  $x_2 = x_d''$ .

$$x_d'' = 0,15 \cdot z_{CDn}; \quad r_{CD} = 0,15 \cdot x_d''; \quad z_{CD} = \frac{U_n^2 \cdot 10^6}{P_n},$$

где  $U_n$  - номинальное линейное напряжение СД, кВ;  $P_n$  - номинальная мощность СД, кВт.

### Расчет начального действующего значения периодической составляющей тока трехфазного к.з. $I_{по}$ (кА).

Начальное действующее значение периодической составляющей тока трехфазного к.з. при питании от энергосистемы через понижающий трансформатор определяют по формуле

$$I_{по} = \frac{U_{стнн}}{\sqrt{3} \sqrt{r_{1\Sigma}^2 + x_{1\Sigma}^2}},$$

где  $U_{стнн}$  - напряжение ступени (400 В) сети, в которой произошло к.з.;  $r_{1\Sigma}$ ,  $x_{1\Sigma}$  - соответственно суммарные активные и индуктивные сопротивления прямой последовательности цепи к.з., мОм. Эти сопротивления равны:

$$r_{1\Sigma} = r_T + r_{та} + r_{кв} + r_{кб} + r_{ш} + r_d,$$

$$x_{1\Sigma} = x_c + x_T + x_{та} + x_{кв} + x_{ш} + x_{кб}$$

Если питание ЭУ выполнено от энергосистемы через понижающий трансформатор вблизи места к.з. имеются синхронные и асинхронные электродвигатели, то  $I_{по\Sigma}$  определяется как сумма токов от энергосистемы и от ЭД.

Необходимость учета влияния ЭД на суммарный ток в точке к.з. оценивается условием, что если номинальный электродвигательной нагрузки превышает 1% начального значения периодической составляющей тока к.з. от энергосистемы, то такие ЭД следует учитывать и вести расчет по нижеприведенной методике.

Начальное действующее значение периодической составляющей тока к.з. от СД  $I_{поСД}$  (кА) рассчитывают по формуле



$$I_{\text{по СД}} = \frac{E_{\phi, \text{СД}}''}{\sqrt{(x_d'' + x_{1\Sigma})^2 + (r_{\text{СД}} + r_{1\Sigma})^2}},$$

где  $E_{\phi, \text{СД}}''$  - сверхпереходная ЭДС СД (фазное значение), В;  $x_d''$  и  $r_{\text{СД}}$  - соответственно сверхпереходное индуктивное и активное сопротивления СД, мОм;  $x_{1\Sigma}$  и  $r_{1\Sigma}$  - соответственно суммарные индуктивное и активное сопротивления прямой последовательности цепи, включенной между СД и точкой к.з., мОм.

Для СД, которые до к.з. работали с перевозбуждением, ЭДС  $E_{\phi, \text{СД}}''$  (В) рассчитывают по формуле

$$E_{\phi, \text{СД}}'' = \sqrt{(U_{\phi_0} + I_o \cdot x_d'' \cdot \sin \varphi_0)^2 + (I_o \cdot x_d'' \cdot \cos \varphi_0)^2},$$

где  $U_{\phi_0}$  - фазное напряжение на выводах СД в момент, предшествующий к.з., В;  $I_o$  - ток статора в момент, предшествующий к.з., А;  $\varphi_0$  - угол сдвига фаз напряжения и тока в начальный момент к.з., град.эл.;  $x_d''$  - сверхпереходное сопротивление по продольной оси СД, мОм.

Для СД, работающих до к.з. с недозавозбуждением, ЭДС  $E_{\phi, \text{СД}}''$  (В) рассчитывают по формуле

$$E_{\phi, \text{СД}}'' = \sqrt{(U_{\phi_0} - I_o \cdot x_d'' \cdot \sin \varphi_0)^2 + (I_o \cdot x_d'' \cdot \cos \varphi_0)^2}.$$

Начальное действующее значение периодической составляющей тока к.з. от АД  $I_{\text{по АД}}$  (кА) определяется по формуле

$$I_{\text{по АД}} = \frac{E_{\phi, \text{АД}}''}{\sqrt{(x_{\text{АД}}'' + x_{1\Sigma})^2 + (r_{\text{АД}} + r_{1\Sigma})^2}},$$

где  $x_{\text{АД}}''$  и  $r_{\text{АД}}$  - соответственно сверхпереходное индуктивное и активное сопротивления АД, мОм;  $E_{\phi, \text{АД}}''$  - сверхпереходная ЭДС АД, которую можно рассчитать по формуле

$$E_{\phi, \text{АД}}'' = \sqrt{(U_{\phi_0} \cdot \cos \varphi_0 - I_o \cdot r_{\text{АД}})^2 + (U_{\phi_0} \cdot \sin \varphi_0 - I_o \cdot x_{\text{АД}}'')^2}.$$

В ЭУ с автономными ИП начальное действующее значение периодической составляющей тока к.з.  $I_{\text{по}}$  (кА) определяют по формуле

$$I_{\text{по}} = \frac{E_{\phi}''}{\sqrt{r_{1\Sigma}^2 + x_{1\Sigma}^2}},$$

где  $E_{\phi}''$  - эквивалентная сверхпереходная ЭДС (фазное значение), В, рассчитываемая так же, как и для синхронных ЭД.

При необходимости учета комплексной нагрузки соответствующее действующее значение периодической составляющей тока к.з. следует рассчитывать, как указано в приложении П12.

### Расчет аperiodической составляющей тока к.з.

Расчет аperiodической составляющей тока к.з. в начальный момент к.з. ведется по формуле

$$i_{a0} = \sqrt{2} \cdot I_{n0}$$

В произвольный момент времени  $i_{at}$  в радиальных сетях рассчитывают по формуле

$$i_{at} = i_{a0} \cdot e^{-t/T_a},$$

где  $t$  - время, с;  $T_a$  - постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока к.з., с, равная

$$T_a = x_{\Sigma} / \omega \cdot r_{\Sigma},$$



где  $x_{\Sigma}$  и  $r_{\Sigma}$  - результирующие индуктивные и активные сопротивления цепи к.з., мОм;  $\omega_c = 2\pi f$  - синхронная угловая частота напряжения сети, рад/с.

### Расчет ударного тока к.з.

Расчет ударного тока к.з. в ЭУ при питании от энергосистемы выполняется по формуле

$$i_{y\delta} = \sqrt{2} \cdot I_{no} \cdot k_{y\delta},$$

где  $k_{y\delta}$  - ударный коэффициент, который может быть определен по кривым рисунка 12.

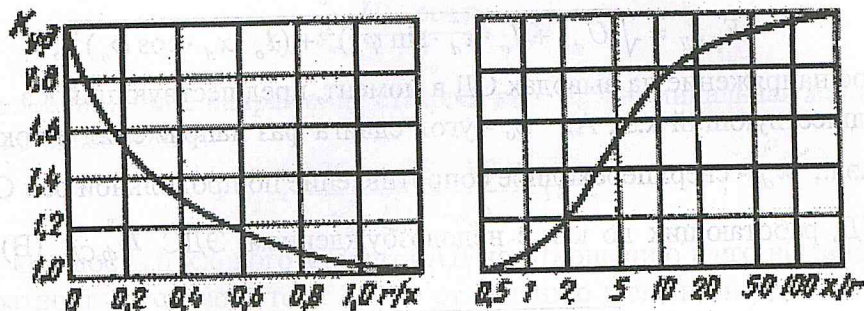


Рисунок 12. Кривые для  $k_{y\delta}$  в зависимости от отношений  $r/x$  и  $x/r$

Ударный ток от асинхронного электродвигателя ( $i_{уд.АД}$ ) в килоамперах рассчитывают с учетом затухания амплитуды периодической составляющей тока к.з. по формуле

$$i_{уд.АД} = \sqrt{2} I_{п0АД} \left( e^{-\frac{0,01}{T_p}} + e^{-\frac{0,01}{T_a}} \right),$$

где  $T_p$  - расчетная постоянная времени затухания периодической составляющей тока статора;  $T_a$  - постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока статора, с.

При этом  $T_p$  и  $T_a$  допускается рассчитывать по формулам

$$T_p = \frac{x_{АД}'' + x_{1кб}}{\omega_c r_2}; \quad T_a = \frac{x_{АД}'' + x_{1кб}}{\omega_c (r_1 + r_{1кб})},$$

где  $\omega_c$  - синхронная угловая частота, рад/с;  $r_1$  и  $r_2$  - соответственно активное сопротивление статора и активное сопротивление ротора, приведенное к статору.

Если точка к.з. делит расчетную схему на радиальные, не зависящие друг от друга ветви, ударный ток к.з. ( $i_{уд}$ ) определяют как сумму ударных токов отдельных ветвей по формуле

$$i_{уд} = \sum_{i=1}^m \sqrt{2} I_{п0i} \left( 1 + e^{-t_{удi}/T_{ai}} \right),$$

где  $m$  - число независимых ветвей схемы;  $I_{п0i}$  - начальное действующее значение периодической составляющей тока к.з. в  $i$ -й ветви, кА;  $t_{удi}$  - время появления ударного тока в  $i$ -й ветви, с;  $T_{ai}$  - постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока к.з. в  $i$ -й ветви, с.

### Расчет токов несимметричных к.з.

Расчет токов несимметричных к.з. начинают предварительно с составления схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательности. В схему замещения прямой последовательности должны быть введены все элементы расчета схемы, причем СД и АД должны



быть введены сверхпереходными ЭДС и сверхпереходными сопротивлениями. Схема замещения обратной последовательности также должна включать все элементы расчетной схемы. При этом ЭДС обратной последовательности для СД и АД принимаются равными нулю, а сопротивления обратной последовательности СД принимаются по данным каталога, АД - равным сверхпереходному сопротивлению. Сопротивление обратной последовательности трансформаторов, кабельных линий следует принимать равным сопротивлению прямой последовательности.

Расчет токов однофазного к.з. при питании от энергосистемы через питающий трансформатор выполняется по формуле

$$I_{\text{ПО}}^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{СТ НН}}}{\sqrt{(2r_{1\Sigma} + r_{0\Sigma})^2 + (2x_{1\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}},$$

где  $r_{1\Sigma}$  и  $x_{1\Sigma}$  - определяются как для трехфазной цепи, мОм;  $r_{0\Sigma}$  и  $x_{0\Sigma}$  - суммарные активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности цепи относительного тока к.з., мОм.

$$r_{0\Sigma} = r_{\text{от}} + r_{\text{та}} + r_{\text{кв}} + r_{\text{к}} + r_{\text{ош}} + r_{\text{окб}} + r_{\text{д}}$$

$$x_{0\Sigma} = x_{\text{от}} + x_{\text{та}} + x_{\text{кв}} + x_{\text{ош}} + x_{\text{окб}}$$

Начальное значение периодической составляющей  $I_{\text{ПО}}^{(1)}$  (кА) с учетом синхронных и асинхронных ЭД рассчитывают по формуле

$$I_{\text{ПО}}^{(1)} = \frac{3 \cdot E''}{\sqrt{(2r_{1\Sigma} + r_{0\Sigma})^2 + (2x_{1\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}},$$

где  $E''_{\phi}$  - эквивалентная сверхпереходная ЭДС (фазное значение), В.

Расчет токов двухфазного к.з. при питании от энергосистемы через понижающий трансформатор. Начальное значение периодической составляющей тока к.з.  $I_{\text{ПО}}$  (кА) определяют по формуле

$$I_{\text{ПО}}^{(2)} = \frac{U_{\text{СТ НН}}}{2\sqrt{r_{1\Sigma}^2 + x_{1\Sigma}^2}},$$

где  $r_{1\Sigma} = r_{\text{т}} + r_{\text{та}} + r_{\text{кв}} + r_{\text{к}} + r_{\text{ш}} + r_{\text{кб}} + r_{\text{д}}/2$ ;

$$x_{1\Sigma} = x_{\text{с}} + x_{\text{т}} + x_{\text{та}} + x_{\text{кв}} + x_{\text{ш}} + x_{\text{кб}}$$

Начальное значение периодической составляющей тока двухфазного к.з. с учетом асинхронных электродвигателей  $I_{\text{ПО}}^{(2)}$  в килоамперах рассчитывают по формуле

$$I_{\text{ПО АД}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3} E''_{\phi \Sigma}}{2\sqrt{r_{1\Sigma}^2 + x_{1\Sigma}^2}},$$

где  $E''_{\phi \Sigma}$  - эквивалентная ЭДС асинхронных электродвигателей и источника электроэнергии, В;  $r_{1\Sigma}$  и  $x_{1\Sigma}$  - суммарные активное и индуктивное сопротивления относительно точки к.з. (с учетом параметров асинхронных электродвигателей), мОм.

#### ПРИМЕР расчета токов к.з.

Для схемы, приведенной на рис. 13 определить токи при трехфазном, двухфазном и однофазном к.з. в т. К-1. Для трехфазного к.з. определить максимальное и минимальные значения тока к.з.

Исходные данные.

Система С/С<sub>к</sub> = 200 МВ·А,  $U_{\text{ср. ВН}} = 6$  кВ.

Тр-р Т: ТС=1000/6,  $S_{\text{н}} = 1000$  кВ·А;  $U_{\text{ВН}} = 6,3$  кВ,  $U_{\text{НН}} = 0,4$  кВ;  $\sqrt{P_{\text{к}}} = 11,2$  кВт;  $u_{\text{к}} = 5,5\%$ .

Автоматический выключатель «Электрон» QF:  $r_{\text{кв}} = 0,14$  мОм;  $x_{\text{кв}} = 0,08$  мОм.

Шинопровод ШМА4-1600 Ш:  $r_{\text{ш}} = 0,03$  мОм/м;  $x_{\text{ш}} = 0,014$  мОм/м;  $r_{\text{нп}} = 0,037$  мОм/м;  $x_{\text{нп}} = 0,042$  мОм/м;

$\sqrt{l} = 10$  м.

Болтовые контактные соединения:  $\sqrt{r_{\text{к}}} = 0,003$  мОм;  $\sqrt{n} = 4$ .



Расчет параметров схемы замещения.

Параметры схемы замещения прямой последовательности.

Сопротивление системы  $x_c$ , рассчитанное по формуле

$$x_c = \frac{U_{CT.HH}^2 \cdot 10^{-3}}{S_K} = \frac{(400)^2 \cdot 10^{-3}}{200} = 0,8 \text{ мОм}.$$

Активное и индуктивное сопротивления трансформатора  $r_T$  и  $x_T$  рассчитаны по формулам

$$r_T = \frac{P_K \cdot U_{HH}^2 \cdot 10^6}{S_H^2} = \frac{11,2 \cdot 0,4^2}{1000^2} \cdot 10^6 = 1,79 \text{ мОм}$$

$$x_T = \sqrt{U_K^2 - \left(\frac{100 \cdot P_K}{S_H}\right)^2} \cdot \frac{U_{HH \text{ ном}}^2 \cdot 10^4}{S_{TH}} = \\ = \sqrt{5,5^2 - \left(\frac{100 \cdot 11,2}{1000}\right)^2} \cdot \frac{0,4^2}{1000} \cdot 10^4 = 8,62 \text{ мОм}.$$

Активное и индуктивное сопротивления шинпровода:

$$R_{ш} = 0,03 \cdot 10 = 0,3 \text{ мОм}; \quad x_{ш} = 0,014 \cdot 10 = 0,14 \text{ мОм}.$$

Активное сопротивление болтовых контактных соединений:

$$R_K = 0,003 \cdot 4 = 0,012 \text{ мОм}.$$

Активное сопротивление дуги определяют, как указано в приложении П13:  $r_d = 5,6 \text{ мОм}$ .

Параметры схемы замещения нулевой

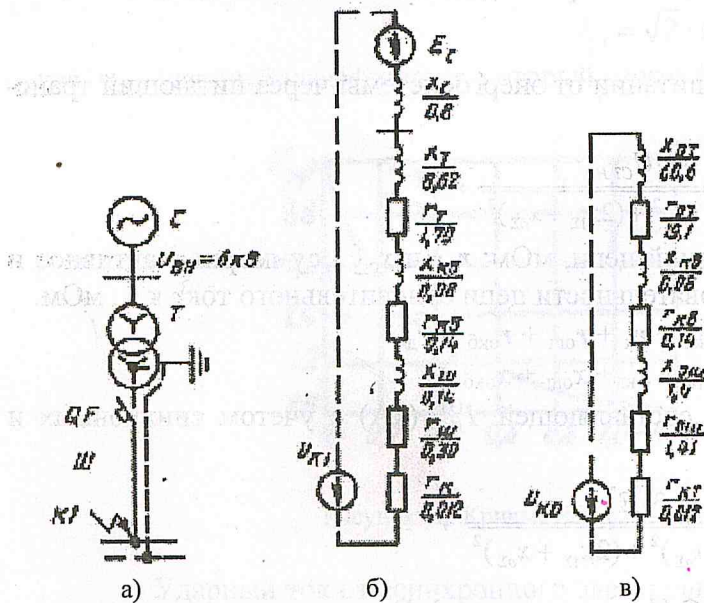


Рисунок 13. а) расчетная схема; б), в) схемы замещения

последовательности.

$$r_{от} = 19,1 \text{ мОм}; \quad x_{от} = 60,6 \text{ мОм}; \\ r_{нп} = 0,037 \cdot 10 = 0,37 \text{ мОм}; \quad x_{нп} = 0,042 \cdot 10 = 0,4 \text{ мОм}.$$

Расчет токов трехфазного к.з.

$$r_{1\Sigma} = r_T + r_{ш} + r_{кв} + r_K = 1,79 + 0,3 + 0,14 + 0,012 = 2,24 \text{ мОм};$$

$$x_{1\Sigma} = x_c + x_T + x_{ш} + x_{кв} = 0,8 + 8,62 + 0,14 + 0,08 = 9,64 \text{ мОм};$$

$$r'_{1\Sigma} = r_{1\Sigma} + r_d = 2,24 + 5,6 = 7,84 \text{ мОм};$$

$$I_{по \max} = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{2,24^2 + 9,64^2}} = 23,33 \text{ кА};$$

$$I_{по \min} = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{7,84^2 + 9,64^2}} = 18,6 \text{ кА};$$

$$i_{уд \max} = \sqrt{2} \cdot I_{по \max} \cdot K_{уд} = \sqrt{2} \cdot 23,33 \cdot 1,45 = 47,84 \text{ кА};$$

$$i_{уд \min} = \sqrt{2} \cdot I_{по \min} \cdot K_{уд} = \sqrt{2} \cdot 18,6 \cdot 1,08 = 28,32 \text{ кА},$$

где  $K_{уд}$  определяют по кривой рис. 12.

$$i_{ао \max} = \sqrt{2} \cdot I_{по \max} = \sqrt{2} \cdot 23,33 = 32,9 \text{ кА};$$

$$i_{ао \min} = \sqrt{2} \cdot I_{по \min} = \sqrt{2} \cdot 18,6 = 26,23 \text{ кА}.$$

Расчет токов однофазного к.з.

$$r_{о\Sigma} = r_{от} + r_{ош} + r_{кв} + r_K = 19,1 + 0,3 + 3 \cdot 0,37 + 0,14 + 0,012 = 20,66 \text{ мОм}$$

где  $r_{ош} = r_{ш} + 3 \cdot r_{нп}$

$$x_{о\Sigma} = x_{от} + x_{ош} + x_{кв} = 60,6 + 0,14 + 3 \cdot 0,42 + 0,08 = 62,08 \text{ мОм};$$

$$r'_{о\Sigma} = r_{о\Sigma} + r_d = 20,66 + 8,6 = 29,26 \text{ мОм};$$

$$I_{по}^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400}{\sqrt{(2 \cdot 2,24 + 20,66)^2 + (2 \cdot 9,64 + 62,08)^2}} = 8,13 \text{ кА}.$$

Ток однофазного к.з. с учетом активного сопротивления дуги



$$I_{по}^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400}{\sqrt{(2 \cdot 7,84 + 29,26)^2 + (2 \cdot 9,64 + 62,08)^2}} = 7,46 \text{ кА}$$

Расчет токов двухфазного к.з.

$$I_{по}^{(2)} = \frac{400}{2 \cdot \sqrt{2,24^2 + 9,64^2}} = 20,21 \text{ кА}$$

Ток двухфазного к.з. с учетом активного сопротивления дуги:

$$I_{по}^{(2)} = \frac{400}{2 \cdot \sqrt{(2,24 + r_d/2)^2 + 9,64^2}} = 18,39 \text{ кА}$$

Результаты расчета токов к.з. сведены в таблицу.

Таблица примера. Результаты расчета токов к.з. к примеру

Точка к.з.	Вид к.з.	Максимальное значение тока к.з., кА			Минимальное значение тока к.з., кА		
		$I_{по}$	$i_{ао}$	$i_{вб}$	$I_{по}$	$i_{ао}$	$i_{вб}$
K1	K <sup>(3)</sup>	23,33	32,9	47,84	18,6	26,23	28,32
K1	K <sup>(1)</sup>	8,13	-	-	7,46	-	-
K1	K <sup>(2)</sup>	20,21	-	-	18,39	-	-

Пример расчета токов к.з. с учетом влияния подпитки от электродвигателей и комплексной нагрузки приводится в приложении П16.