

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МУРМАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Строительства,  
энергетики и транспорта

**Методические рекомендации к расчетно-графическим работам**  
по дисциплине  
**«Системы электроснабжения городов и промышленных предприятий»**  
для всех форм обучения направления  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
(профиль Электроснабжение)

Мурманск  
2021

## Введение

При проектировании внутрицехового электроснабжения необходимо учитывать некоторые характеристики силовых электроприемников (ЭП): режим работы, коэффициент мощности, количество фаз, род тока. В связи с этим ниже приводятся характеристики отдельных групп силовых ЭП.

Для всех ЭП важным показателем является их номинальная мощность. Для электродвигателей номинальные мощности выражаются в киловаттах: для однодвигательных ЭП –  $p_n$ , кВт; для многодвигательных – суммарная номинальная мощность –  $P_n$ , кВт. Номинальной (установленной) мощностью плавильных электропечей и сварочных установок является мощность питающих их трансформаторов, выраженная в киловольт-амперах (кВА). Это же относится и к трансформаторам преобразовательных и выпрямительных агрегатов.

Основной группой промышленных потребителей электроэнергии являются электродвигатели. В установках, не требующих регулирования скорости в процессе работы, применяются электродвигатели переменного тока: асинхронные с короткозамкнутым или с фазным ротором, синхронные. При напряжении до 1 кВ и мощности до 100 кВт экономически целесообразнее применять асинхронные двигатели, а свыше 100 кВт – синхронные; при напряжении 10 кВ и мощности до 630 кВт – асинхронные двигатели, 450 кВт и выше – синхронные. Асинхронные двигатели с фазным ротором применяются в мощных электроприводах с тяжелыми условиями пуска.

К общепромышленным установкам относятся вентиляторы, насосы, компрессоры, воздуходувки и т. д. В них применяются асинхронные и синхронные двигатели трехфазного переменного тока частотой 50 Гц напряжением от 380 В до 10 кВ. Диапазон их мощностей различен – от долей киловатта (электродвигатели задвижек, затворов, насосов подачи смазки и т. п.) до десятков мегаватт (воздуходувки доменных печей, кислородные турбокомпрессоры). Основным агрегатам (насосы, вентиляторы) присущ

продолжительный режим работы. Электродвигатели задвижек, затворов и т. п. работают в кратковременном режиме. Их коэффициент мощности находится в пределах 0,8–0,85. Синхронные двигатели работают в режиме перевозбуждения.

Данная группа электроприемников относится, как правило, к I категории по надежности электроснабжения. Некоторые вентиляционные и компрессорные установки относятся ко второй категории.

Наиболее многочисленной группой приемников электроэнергии являются металлорежущие станки. Напряжение сети, питающей двигателя станков, 380 или 660 В, частота 50 Гц. На станках, где требуется высокая частота вращения и регулирование скорости, применяют двигатели постоянного тока; в остальных случаях – асинхронные с короткозамкнутым ротором. По надежности электроснабжения станки основных цехов предприятий относят ко II категории, а вспомогательных цехов – к III категории по надежности электроснабжения.

К электротехнологическим установкам относятся электронагревательные и электролизные установки, установки электрохимической, электроискровой и ультразвуковой обработки металлов, электросварочное оборудование. Наиболее распространенной группой электронагревательных установок являются электрические печи сопротивления, которые подразделяются на печи косвенного нагрева и прямого нагрева.

Печи сопротивления получают питание от трехфазных сетей переменного тока частотой 50 Гц, в основном напряжением 380/220 В или на более высокое напряжение через понижающие трансформаторы. Выпускаются печи в одно- и трехфазном исполнении, мощностью до нескольких тысяч киловатт. Характер нагрузки их ровный, однако, однофазные печи для трехфазных сетей представляют несимметричную нагрузку. Коэффициент мощности для печей прямого действия 0,7–0,9, для

печей косвенного действия – 1,0. Печи сопротивления относятся ко II категории по надежности электроснабжения.

Индукционные плавильные печи выпускаются со стальным сердечником и без него, мощностью до 4500 кВА. Питание индукционных печей и установок закалки и нагрева осуществляется от трехфазных сетей переменного тока частотой 50 Гц напряжением 380/220 В и выше в зависимости от мощности.

Индукционные плавильные печи без сердечника и установки закалки и нагрева токами высокой частоты получают питание переменным током частотой до 40 МГц от преобразовательных установок, которые, в свою очередь, питаются от сетей переменного тока промышленной частоты.

Печи со стальными сердечниками выпускаются в одно-, двух- и трехфазном исполнении. Коэффициент мощности их колеблется в пределах 0,2–0,8 (у индукционных установок повышенной частоты – от 0,06 до 0,25).

Все перечисленные печи и установки индукционного нагрева относятся к приемникам II категории по надежности электроснабжения.

Дуговые электрические печи по способу нагрева разделяются на печи прямого, косвенного и смешанного нагрева. Дуговые печи получают питание от сетей переменного тока промышленной частоты напряжением до 110 кВ через специальные понижающие печные трансформаторы. Мощности современных дуговых электропечей достигают 100–125 МВА.

В период расплавления шихты возникают частые эксплуатационные короткие замыкания в процессе плавки и бестоковые паузы при выпуске стали и новой загрузке печи, в результате чего в питающих сетях наблюдаются толчковые нагрузки. Нагрузка от однофазных печей несимметричная. Коэффициент мощности 0,85–0,95. В отношении надежности электроснабжения дуговые печи относятся к приемникам первой категории.

Вакуумные электрические печи для выплавки высококачественных сталей и специальных сплавов относятся к приемникам особой группы

первой категории, так как перерыв в питании вакуумных насосов приводит к дорогостоящему браку.

Электротехнологические установки, работающие на постоянном или переменном токе частотой, отличной от 50 Гц, питаются от преобразовательных установок, характеристики которых определяются режимом электротехнологической установки. Например, мощности электролизных установок для получения алюминия зависят от их производительности и достигают 150–180 МВА. Питание преобразовательных установок электролиза осуществляется трехфазным переменным током частотой 50 Гц напряжением до 110 кВ (в зависимости от мощности). Нагрузка их равномерная, симметричная. Коэффициент мощности составляет 0,8–0,9. Электролизные установки относятся к приемникам I категории по надежности электроснабжения.

Электросварочное оборудование питается напряжением 380 или 220 В переменного тока промышленной частоты.

Для дуговой сварки на переменном токе применяют сварочные трансформаторы однофазного и трехфазного исполнения. Источником постоянного тока при сварке служат вращающиеся и статические преобразователи.

Для автоматической дуговой сварки под слоем флюса или в защитном газе используют как трансформаторы, так и преобразователи трехфазного исполнения на напряжение 380 В.

Сварочные агрегаты для контактной сварки имеют однофазное исполнение.

Электросварочное оборудование работает в повторно-кратковременном режиме работы. Однофазные сварочные приемники (трансформаторы и другие установки) дают неравномерную нагрузку по фазам трехфазной питающей сети. Коэффициент их мощности колеблется в пределах 0,3–0,7. Сварочные установки по степени надежности относятся ко II категории.

Электропривод подъемно-транспортных устройств имеет повторно-кратковременный режим работы и относится ко II категории по надежности электроснабжения. На кран-балках и тельферах установлены двигатели с короткозамкнутым ротором, а на мостовых кранах – двигатели с фазным ротором.

### 1. Расчет электрических нагрузок

До расчета электрической нагрузки следует привести характеристики ЭП цеха согласно табл. 10.

Таблица 10 Характеристики электроприемников цеха

Обозначение ЭП на плане цеха	Наименование электроприемников	Номинальная мощность, $P_n$ , кВт, $S_n$ , кВА	$\cos\varphi$	кпд, $\eta$ , %	Номинальный ток, $I_n$ , А	Коэффициент использования, $K_n$
1	2	3	4	5	6	7

Номинальные токи электроприемников берутся из паспортных данных или определяются по формулам:

1) для трехфазных электродвигателей

$$I_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi \eta}, \text{ А; (28)}$$

2) для многодвигательного электропривода трехфазного исполнения

$$I_n = \frac{\sum P_n \cdot 10^3}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi \eta}, \text{ А, (29)}$$

где  $\sum P_n$  – суммарная номинальная мощность ЭП многодвигательного привода, кВт;  $\cos\varphi$  и  $\eta$  – коэффициент мощности и кпд наиболее мощного ЭП данного привода;

3) для трехфазной электрической печи, сварочного трансформатора

$$I_n = \frac{S_n \cdot 10^3}{\sqrt{3} U_n}, \text{ А; (30)}$$

4) для однофазных электродвигателей на фазное напряжение ( $U_\phi$ )

$$I_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{U_\phi \cos \varphi \eta}, \text{ А; (31)}$$

5) для однофазных электродвигателей, подключаемых на линейное напряжение и являющихся нагрузкой двух фаз

$$I_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot 10^3}{2U_{\text{ф}} \cos \varphi \eta} = \frac{\sqrt{3}P_{\text{н}} \cdot 10^3}{2U_{\text{н}} \cos \varphi \eta}, \text{ А}; \quad (32)$$

6) для однофазных электрических печей, сварочных трансформаторов на фазное напряжение

$$I_{\text{н}} = \frac{S_{\text{н}} \cdot 10^3}{U_{\text{ф}}}, \text{ А}; \quad (33)$$

7) для однофазных электрических печей, сварочных трансформаторов на линейное напряжение

$$I_{\text{н}} = \frac{\sqrt{3}S_{\text{н}} \cdot 10^3}{2U_{\text{н}}}, \text{ А}; \quad (34)$$

8) для остальных трехфазных ЭП

$$I_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot 10^3}{\sqrt{3}U_{\text{н}} \cos \varphi}, \text{ А}; \quad (35)$$

9) для остальных однофазных ЭП на фазное напряжение

$$I_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot 10^3}{U_{\text{ф}} \cos \varphi}, \text{ А}; \quad (36)$$

10) для остальных однофазных ЭП на линейное напряжение

$$I_{\text{н}} = \frac{\sqrt{3}P_{\text{н}} \cdot 10^3}{2U_{\text{н}} \cos \varphi}, \text{ А}. \quad (37)$$

Во всех формулах:  $P_{\text{н}}$ ,  $S_{\text{н}}$  – номинальная мощность ЭП ( $P_{\text{н}}$  – в кВт,  $S_{\text{н}}$  – в кВА).

Расчет электрических нагрузок цеха и любого другого узла системы электроснабжения (силового распределительного пункта, распределительного или магистрального шинпровода, секции шин) необходимо произвести по методу коэффициента расчетной активной мощности ( $K_p$ ). Расчетная активная мощность ( $P_p$ ) – это мощность, соответствующая такой неизменной токовой нагрузке ( $I_p$ ), которая эквивалентна фактической изменяющейся во времени нагрузке по

наибольшему возможному тепловому воздействию на элемент системы электроснабжения.

При расчете электрических нагрузок цеха или другого узла питания все ЭП распределяются на характерные группы с одинаковыми  $K_{и}$  и  $\cos\varphi$ . При этом резервные ЭП в расчете не учитываются и номинальные мощности ЭП с повторно-кратковременным режимом работы не приводятся к длительному режиму ( $PВ = 100 \%$ ).

Для многодвигательных приводов учитываются все одновременно работающие электродвигатели данного привода. Если среди этих электродвигателей имеются одновременно включаемые (с идентичным режимом работы), то они учитываются в расчете как один ЭП с номинальной мощностью, равной сумме номинальных мощностей одновременно работающих двигателей.

Для каждой характерной группы ЭП определяются средние активная ( $P_c$ ) и реактивная ( $Q_c$ ) мощности по формулам:

$$P_c = K_{и} P_{н}, \text{ кВт}, (38)$$

$$Q_c = K_{и} P_{н} \text{tg}\varphi, \text{ кВАр}. (39)$$

Коэффициент расчетной активной мощности зависит от значения группового коэффициента использования ( $K_{и\text{гр.}}$ ), эффективного числа ЭП ( $n_{э}$ ) и постоянной времени нагрева ( $T_0$ ).

Групповой коэффициент использования узла питания определяется по формуле:

$$K_{и\text{гр.}} = \frac{\sum K_{и} P_{н}}{\sum P_{н}}. (40)$$

Эффективное число ЭП рассчитывается по формуле:

$$n_{э} = \left( \frac{\sum_{i=1}^n P_{нi}}{\sum_{i=1}^n P_{нi}^2} \right)^2, (41)$$

где  $n_{э}$  – число однородных по режиму работы ЭП одинаковой мощности, которое дает то же значение расчетного максимума ( $P_p$ ), что и группа из реального числа ЭП ( $n$ ), различных по мощности и режиму работы;

$\sum_{i=1}^n p_{Hi}$  – суммарная установленная мощность ЭП узла питания, кВт;  $p_{Hi}$  –

номинальная (установленная) мощность  $i$ -го ЭП, кВт.

При большом числе ЭП цеха допускается определять эффективное число электроприемников по упрощенной формуле:

$$n_3 = 2 \left( \sum_{i=1}^n p_{Hi} \right) / p_{H \max}, \quad (42)$$

где  $p_{H \max}$  – номинальная мощность наиболее мощного ЭП цеха.

Найденное по формулам (41) или (42)  $n_3$  округляется до ближайшего меньшего целого числа.

Постоянные времени нагрева принимаются следующие:

–  $T_0 = 10$  мин. – для сетей напряжением до 1 кВ, питающих распределительные пункты и шинопроводы, щиты. Значения  $K_p$  для этих сетей в зависимости от  $K_{igr}$  и  $n_3$  принимаются по табл. 11;

–  $T_0 = 2,5$  ч. – для магистральных шинопроводов и цеховых трансформаторов; значения  $K_p$  принимаются по табл. 12.

Таблица 11 Значения коэффициентов расчетной нагрузки  $K_p$  для питающих сетей напряжением до 1000 В

$n_3$	Коэффициент использования $K_{igr}$								
	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
1	8,00	5,33	4,00	2,67	2,00	1,60	1,33	1,14	1,0
2	6,22	4,33	3,39	2,45	1,98	1,60	1,33	1,14	1,0
3	4,05	2,89	2,31	1,74	1,45	1,34	1,22	1,14	1,0
4	3,24	2,35	1,91	1,47	1,25	1,21	1,12	1,06	1,0
5	2,84	2,09	1,72	1,35	1,16	1,16	1,08	1,03	1,0
6	2,64	1,96	1,62	1,28	1,11	1,13	1,06	1,01	1,0
7	2,49	1,86	1,54	1,23	1,12	1,10	1,04	1,0	1,0
8	2,37	1,78	1,48	1,19	1,10	1,08	1,02	1,0	1,0
9	2,27	1,71	1,43	1,16	1,09	1,07	1,01	1,0	1,0
10	2,18	1,65	1,39	1,13	1,07	1,05	1,0	1,0	1,0
11	2,11	1,61	1,35	1,1	1,06	1,04	1,0	1,0	1,0
12	2,04	1,56	1,32	1,08	1,05	1,03	1,0	1,0	1,0

13	1,99	1,52	1,29	1,06	1,04	1,01	1,0	1,0	1,0
14	1,94	1,49	1,27	1,05	1,02	1,0	1,0	1,0	1,0
15	1,89	1,46	1,25	1,03	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
16	1,85	1,43	1,23	1,02	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
17	1,81	1,41	1,21	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
18	1,78	1,39	1,19	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
19	1,75	1,36	1,17	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
20	1,72	1,35	1,16	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
21	1,69	1,33	1,15	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
22	1,67	1,31	1,13	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
23	1,64	1,30	1,12	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
24	1,62	1,28	1,11	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
25	1,6	1,27	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
30	1,51	1,21	1,05	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
35	1,44	1,16	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
40	1,4	1,13	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
45	1,35	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
50	1,3	1,07	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
60	1,25	1,03	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
70	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
80	1,16	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
90	1,13	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
100	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Таблица 12 Значения коэффициентов расчетной нагрузки  $K_p$  на шинах НН цеховых трансформаторов и для магистральных шинопроводов напряжением до 1 кВ

п <sub>э</sub>	Коэффициент использования $K_{н гр.}$								
	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7 и более	
1	8,00	5,33	4,00	2,67	2,00	1,60	1,33	1,14	
2	5,01	3,44	2,69	1,9	1,52	1,24	1,11	1,0	
3	2,94	2,17	1,8	1,42	1,23	1,14	1,08	1,0	
4	2,28	1,73	1,46	1,19	1,06	1,04	1,0	0,97	
5	1,31	1,12	1,02	1,0	0,98	0,96	0,94	0,93	
6–8	1,2	1,0	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	
9–10	1,1	0,97	0,91	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	
10–25	0,8	0,8	0,8	0,85	0,85	0,85	0,9	0,9	
25 – 50	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,8	0,85	0,85	
Более 50	0,65	0,65	0,65	0,7	0,7	0,75	0,8	0,8	

Расчетная активная мощность узла питания определяется по формуле:

$$P_p = K_p \sum K_n P_n, \text{ кВт. (43)}$$

Расчетная реактивная мощность для питающих сетей напряжением до 1 кВ в зависимости от  $n_3$  определяется по формулам:

$$\text{при } n_3 \leq 10 \quad Q_p = 1,1 \sum K_n P_n \operatorname{tg} \varphi, \text{ кВАр; (44)}$$

$$\text{при } n_3 > 10 \quad Q_p = \sum K_n P_n \operatorname{tg} \varphi, \text{ кВАр. (45)}$$

Расчетная реактивная мощность для магистральных шинопроводов и на шинах цеховых трансформаторных подстанций независимо от  $n_3$  определяется по формуле:

$$Q_p = K_p \sum K_n P_n \operatorname{tg} \varphi, \text{ кВАр. (46)}$$

Полная расчетная мощность узла питания

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}, \text{ кВА. (47)}$$

На шинах низкого напряжения цеховой КТП при совместном питании силовой и осветительной нагрузки полная расчетная мощность определяется по формуле:

$$S_p = \sqrt{(P_p + P_{\text{роу}})^2 + (Q_p + Q_{\text{роу}})^2}, \text{ кВА. (48)}$$

Расчетный ток узла питания

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3}U_n}, \text{ А. (49)}$$

При определении расчетных нагрузок цеха и отдельных узлов питания следует пользоваться табл. 13.

При определении расчетной нагрузки цеха или другого узла питания необходимо учесть наличие однофазных электроприемников.

При наличии одного однофазного ЭП и включении его на фазное напряжение он учитывается как эквивалентный трехфазный ЭП номинальной мощностью:

$$p_n = 3p_{\text{н.о}}; \quad q_n = 3q_{\text{н.о}}, \text{ (50)}$$

где  $p_{н.о}$ ,  $q_{н.о}$  – активная и реактивная мощности однофазного ЭП.

При включении однофазного ЭП на линейное напряжение он учитывается как эквивалентный ЭП номинальной мощностью

$$p_{н} = \sqrt{3}p_{н.о}; \quad q_{н} = \sqrt{3}q_{н.о}. \quad (51)$$

При наличии группы однофазных ЭП они должны быть распределены по фазам. Далее определяется нагрузка каждой фазы от однофазных ЭП суммированием установленной мощности однофазных ЭП, подключенных на фазное напряжение, и мощности однофазных ЭП, подключенных на линейное напряжение, с использованием коэффициентов приведения нагрузок к одной фазе по формулам:

$$\begin{aligned} P_{нA(o)} &= \sum P_{нA} + \sum P_{нAB} P_{(AB)A} + \sum P_{нAC} P_{(AC)A}, \text{ кВт}; \\ P_{нB(o)} &= \sum P_{нB} + \sum P_{нAB} P_{(AB)B} + \sum P_{нBC} P_{(BC)B}, \text{ кВт}; \\ P_{нC(o)} &= \sum P_{нC} + \sum P_{нAC} P_{(AC)C} + \sum P_{нBC} P_{(BC)C}, \text{ кВт}, \end{aligned} \quad (52)$$

где  $\sum P_{нA}$ ,  $\sum P_{нB}$ ,  $\sum P_{нC}$  – суммарная мощность однофазных ЭП на фазное напряжение, запитанных соответственно от фаз  $A$ ,  $B$  и  $C$ ;  $p_{нAB}$ ,  $p_{нAC}$ ,  $p_{нBC}$  – номинальные мощности однофазных ЭП на линейное напряжение, подключенных соответственно к фазам  $A$  и  $B$ ,  $A$  и  $C$ ,  $B$  и  $C$ ;  $p_{(AB)A}$ ,  $p_{(AB)B}$ ,  $p_{(AC)A}$ ,  $p_{(AC)C}$ ,  $p_{(BC)B}$ ,  $p_{(BC)C}$  – коэффициенты приведения по активной мощности (в скобках указаны фазы, от которых запитан однофазный ЭП, за скобкой – фаза, для которой определяется нагрузка).

Значения коэффициентов приведения однофазных нагрузок по активной мощности представлены в табл. 14.

Таблица 13 Расчет электрических нагрузок (форма Ф636-92)

Исходные данные				Расчетные величины			Эффективное		Коэффициент расчетной нагрузки $K_p$	Расчетная мощность			Расчетный	
по заданию технологов		по справочным данным		$K_n P_n$	$K_n P_n \text{tg}\varphi$	$np_n^2$	число ЭП** $n_s = (\sum P_n)^2 / \sum np_n^2$	активная, кВт $P_p = K_p \sum K_n P_n$		реактивная, кВАр** $Q_p = 1,1 \sum K_n P_n \text{tg}\varphi$ при $n_s \leq 10$ , $Q_p = \sum K_n P_n \text{tg}\varphi$ при $n_s > 10$	полная, кВА $S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}$	ток, А $I_p = S_p / (\sqrt{3} U_n)$		
Наименование ЭП	Количество ЭП, шт.* n	Номинальная (установленная) мощность, кВт*		коэффициент использования $K_n$	коэффициент реактивной мощности $\frac{\cos\varphi}{\text{tg}\varphi}$									
		одного ЭП $P_n$	общая $P_n = np_n$											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

\* Резервные ЭП, а также ЭП, работающие кратковременно, в расчете не учитываются.

\*\* При расчете электрических нагрузок для магистральных шинопроводов, на шинах цеховых трансформаторных подстанций, в целом по цеху, корпусу, предприятию: допускается определять  $n_s$  по выражению

$$n_s = 2 \sum P_n / p_{н.макс} ,$$

расчетная реактивная мощность принимается равной

$$Q_p = K_p K_n P_n \text{tg}\varphi = P_p \text{tg}\varphi .$$

Таблица 14 Коэффициенты приведения однофазной нагрузки, включенной на линейное напряжение, к нагрузке, отнесенной к одной фазе

Коэффициенты приведения	Коэффициент мощности нагрузки, $\cos\varphi$								
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,65	0,7	0,8	0,9	1,0
$P_{(AB)A}, P_{(BC)B}, P_{(AC)C}$	1,4	1,17	1,0	0,89	0,84	0,8	0,72	0,64	0,5
$P_{(AB)B}, P_{(BC)C}, P_{(AC)A}$	-0,4	-0,17	0	0,11	0,16	0,2	0,28	0,36	0,5

Затем определяется общая мощность трехфазных и однофазных ЭП каждой фазы:

$$P_{HA} = P_{HA(o)} + \frac{\sum P_{H3}}{3}, \text{ кВт};$$

$$P_{HB} = P_{HB(o)} + \frac{\sum P_{H3}}{3}, \text{ кВт}; \quad (53)$$

$$P_{HC} = P_{HC(o)} + \frac{\sum P_{H3}}{3}, \text{ кВт},$$

где  $\sum P_{H3}$  – суммарная установленная мощность трехфазных ЭП узла питания, кВт.

Рассчитывается неравномерность загрузки фаз ( $\Delta P_{HP}$ ):

$$\Delta P_{HP} = \frac{P_{H \max} - P_{H \min}}{P_{H \min}} \cdot 100, \% , \quad (54)$$

где  $P_{H \max}$ ,  $P_{H \min}$  – соответственно номинальные мощности максимально и минимально нагруженной фазы.

При неравномерности нагрузки фаз не более 15 % однофазные ЭП учитываются при расчете нагрузок как эквивалентная группа трехфазных ЭП с той же суммарной номинальной мощностью.

В случае превышения указанной неравномерности номинальная мощность эквивалентной группы трехфазных ЭП принимается равной тройному значению мощности наиболее нагруженной фазы:

$$P_{H(o)} = 3P_{H \max(o)}, \text{ кВт}. \quad (55)$$

## 2. Выбор числа и мощности цеховых трансформаторов

Как правило, цеховые трансформаторные подстанции (ТП) встроены в здание цеха или пристроены к нему. Пристроенной называется подстанция, непосредственно примыкающая к основному зданию, встроенной – подстанция, вписанная в общий контур здания, внутрицеховая – расположенная внутри производственного здания (в открытом или отдельном закрытом помещении).

Отдельно стоящие закрытые цеховые подстанции устанавливают, когда невозможно разместить ТП внутри цехов или у наружных их стен по требованиям технологии или пожаро- и взрывоопасности производства. Отдельно стоящие ТП целесообразно применять при питании от одной подстанции нескольких рядом расположенных цехов с небольшой электрической нагрузкой.

По возможности ТП устанавливают в центре электрических нагрузок, максимально приближая к цеховым электроприемникам, что позволяет сократить протяженность сетей 0,4 кВ и уменьшить в них потери мощности и энергии.

Возможно применение цеховых ТП с размещением распределительного устройства (щита) низкого напряжения в цехе, а трансформаторов – снаружи около питаемых от него производственных зданий.

Варианты размещения цеховых КТП представлены на рис. 10.

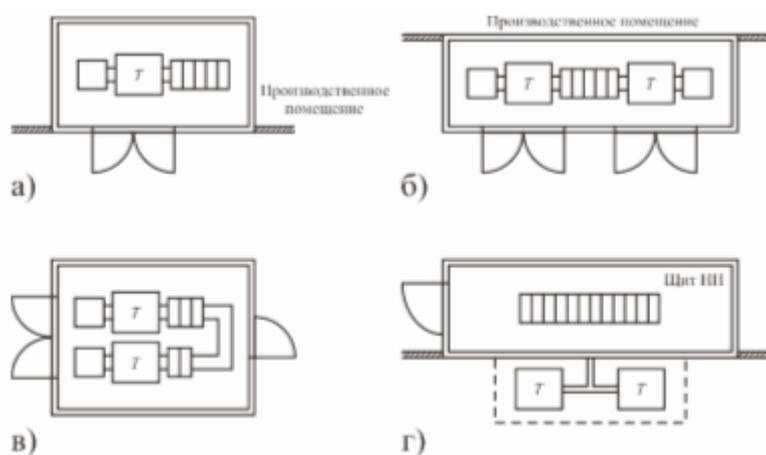


Рис. 10. Варианты размещения цеховых КТП и их компоновки: а – однитрансформаторная КТП встроенного типа; б –

двухтрансформаторная КТП пристроенного типа однорядного исполнения; в – двухтрансформаторная КТП отдельно стоящая двухрядного исполнения; г – КТП с наружной установкой трансформаторов .

На выбор числа трансформаторов влияет категория потребителей по надежности электроснабжения, график нагрузки цеха и удельная мощность нагрузки. Однотрансформаторные подстанции при наличии складского резерва можно использовать для питания электроприемников III и даже II категории. Однотрансформаторные КТП можно применить и для питания электроприемников I категории, если их мощность не превышает 15–20 % мощности трансформатора и возможно резервирование подстанций на вторичном напряжении перемычками с АВР.

Двухтрансформаторные цеховые подстанции применяют при преобладании электроприемников I и II категории и в энергоемких цехах при большой удельной мощности нагрузки  $0,5 \div 4$  кВА/м<sup>2</sup>. Двухтрансформаторные КТП используют для питания электроприемников любой категории по надежности электроснабжения в следующих случаях:

- 1) суточный или годовой график нагрузки цеха очень неравномерен (например, односменная работа цеха, когда выгодно в ненагруженные часы отключать один трансформатор);
- 2) возможен дальнейший быстрый рост нагрузки;
- 3) удельная мощность нагрузки не менее  $0,4$  кВА/м<sup>2</sup>.

Более двух трансформаторов используют для питания цеховых ЭП при необходимости отдельного питания силовой и осветительной нагрузки цеха; если имеются мощные ЭП, требующие блочного питания, или нагрузка цеха превышает нагрузочную способность двухтрансформаторной КТП с трансформаторами мощностью 2500 кВА (приблизительно  $> 3500$  кВА).

Следует учесть, что если нагрузка цеха не более 400 кВА, то экономически нецелесообразно устанавливать собственную КТП в этом цехе.

Необходимо объединить нагрузки рядом расположенных цехов и выбрать ТП по суммарной мощности, расположив ее в центре электрических нагрузок.

Мощность трансформатора в однострансформаторной КТП выбирается по условию:

$$S_{нт} \geq S_p, \text{ кВА}, (56)$$

где  $S_{нт}$  – номинальная мощность трансформатора, кВА;  $S_p$  – расчетная нагрузка цеха, кВА.

Для двухтрансформаторных подстанций

$$S_{нт} = \frac{S_p}{2K_3}, \text{ кВА}, (57)$$

где  $K_3$  – коэффициент загрузки трансформатора, принимаемый при преобладании потребителей I категории (до 80 %) в пределах  $0,6 \div 0,7$ ; при преобладании потребителей II категории –  $0,7 \div 0,8$ ; для III категории –  $0,95 \div 1$ .

В последние годы ведется поиск наиболее эффективных методов выбора цеховых трансформаторов. Один из подходов к решению этой задачи основан на применении комплексного метода расчета электрических нагрузок (прогноз увеличения нагрузки во времени и в зависимости от технологических показателей цеха). В этом случае выбор мощности цеховых трансформаторов можно произвести по удельной плотности нагрузки ( $S_{руд}$ ):

$S_{руд}, \text{ кВА/м}^2 \dots\dots\dots$ менее 0,2;	0,2 ÷ 0,5;	более 0,5
$S_{нт}, \text{ кВА} \dots\dots\dots$ до 1000;	1000 ÷ 1600;	1600 ÷ 2500

При выборе двухтрансформаторной КТП необходимо определить нагрузку секций шин, распределив ЭП цеха между цеховыми трансформаторами. Цеховые ЭП могут питаться либо от шин КТП непосредственно, либо через силовые распределительные пункты в зависимости от их единичной мощности. Линейные панели РУНН КТП

комплекуются автоматическими выключателями (АВ) с номинальным током  $I_{на} \geq 250 \text{ А}$ , снабженные тепловыми расцепителями с номинальным током  $I_{нтр} \geq 100 \text{ А}$ . Силовые распределительные пункты (РП) комплектуются АВ с  $I_{на} \leq 250 \text{ А}$  с  $I_{нтр} \leq 250 \text{ А}$ . В связи с этим мощные ЭП с номинальным током  $I_{н} > 250 \text{ А}$  можно питать только от шин КТП непосредственно, ЭП с  $I_{н} \leq 80 \text{ А}$  – только через распределительные пункты, ЭП с  $80 < I_{н} \leq 250 \text{ А}$  можно питать либо от шин КТП непосредственно, либо через РП. ЭП малой и средней мощности объединяют в группы по территориальному признаку и питают либо от распределительных шинопроводов (ШРА) при магистральных схемах цеховых сетей, либо от РП при радиальных схемах. Нагрузки ШРА и РП определяют по методу коэффициента расчетной активной мощности и результаты сводят в таблицу, аналогичную табл. 13. Расчет электрических нагрузок секций шин также приводят в табличной форме.

Далее следует определить потери напряжения во вторичных обмотках цеховых трансформаторов по формуле:

$$\Delta U_{\text{T}} = \beta (U_{\text{ка}} \cos \varphi_{\text{ср}} + U_{\text{кр}} \sin \varphi_{\text{ср}}), \%, \quad (58)$$

где  $\beta$  – коэффициент загрузки трансформатора;  $U_{\text{ка}}$ ,  $U_{\text{кр}}$  – соответственно активная и индуктивная составляющие напряжения короткого замыкания трансформатора, %;  $\cos \varphi_{\text{ср}}$  – средневзвешенный коэффициент мощности нагрузки трансформатора.

$$\beta = \frac{S_{\text{рТ}}}{S_{\text{нТ}}}, \quad (59)$$

где  $S_{\text{рТ}}$  – расчетная нагрузка трансформатора.

$$U_{\text{ка}} = \frac{P_{\text{к}}}{S_{\text{нТ}}} \cdot 100, \%, \quad (60)$$

где  $P_{\text{к}}$  – мощность потерь короткого замыкания, кВт.

$$U_{\text{кр}} = \sqrt{U_{\text{к}}^2 - U_{\text{ка}}^2}, \%, \quad (61)$$

где  $U_{\text{к}}$  – напряжение короткого замыкания трансформатора, %.

### 3 Выбор схемы и компоновки цеховой КТП

Цеховые трансформаторные подстанции, как правило, не имеют распределительного устройства высокого напряжения (РУВН) и состоят из шкафов ввода высокого напряжения, трансформаторов и распределительного устройства низкого напряжения (РУНН).

В состав подстанции может входить РУВН, если в цехе имеются высоковольтные электроприемники (двигатели, электротехнологические установки), либо если цеховые трансформаторы запитаны по магистральной схеме. Цеховая трансформаторная подстанция может не иметь РУНН, если цеховые электрические сети выполняются по схеме "блок трансформатор – магистраль" (БТМ). В этом случае функцию распределительного устройства низкого напряжения выполняет магистральный шинопровод (ШМА), проложенный в цехе.

РУНН состоит из панелей распределительных щитов: вводных, линейных, секционной. Линейные панели комплектуются трансформаторами тока, амперметрами и коммутационно-защитной аппаратурой следующих видов:

1) блоки рубильник – предохранитель с  $I_{на} = 100; 250; 400 \text{ А}$  ( $2 \times 100 + 2 \times 250; 4 \times 250; 2 \times 250 + 2 \times 400$ );

2) рубильник, предохранитель с  $I_{на} = 600 \text{ А}$ ;

3) рубильники, автоматические выключатели с  $I_{нтр} \geq 100 \text{ А}$  ( $6 \times 100; 4 \times 250; 2 \times 600; 4 \times 100$ );

4) автоматические выключатели с  $I_{нтр} \geq 100 \text{ А}$  ( $6 \times 100; 4 \times 250; 2 \times 600; 4 \times 100$ );

5) разъединитель, автоматический выключатель с  $I_{нтр} = 400; 1000 \text{ А}$  ( $1 \times 400; 1 \times 1000$ ).

Вводные панели комплектуются трансформаторами тока, амперметрами, вольтметрами и коммутационно-защитными аппаратами:

1) рубильник, предохранитель;

2) разъединитель;

3) разъединитель, автоматический выключатель.

Секционные панели комплектуются либо рубильником, либо разъединителем, а также автоматическим выключателем с рубильниками или разъединителями.

Автоматические выключатели в панелях РУНН могут иметь стационарное исполнение или выдвижное, что влияет на компоновку цеховой подстанции.

В данном разделе необходимо указать способ присоединения цеховых трансформаторов к распределительной сети, тип выбранной КТП, ее комплектацию и компоновку.

#### **4 Выбор схемы силовой сети цеха**

Внутрицеховые сети выполняют по радиальной, магистральной или смешанной схемам. На выбор схемы влияют категория потребителей по надежности электроснабжения, взаимное расположение ЭП по площади цеха, их единичная мощность, связанность электроприемников единым технологическим процессом и характеристика окружающей среды.

Радиальные схемы применяют в помещениях с любой окружающей средой. Данные схемы характерны тем, что от источника питания (КТП) прокладывают линии, питающие непосредственно ЭП большой мощности или комплектные распределительные устройства (шкафы, пункты, сборки, щиты), от которых по отдельным линиям питаются электроприемники малой и средней мощности. Распределительные устройства следует располагать в центре электрических нагрузок данной группы потребителей (если позволяет окружающая среда) с целью уменьшения длины распределительных линий. Линии, по которым запитываются распределительные устройства, называются питающими и выполняются, как правило, кабелями. Радиальные схемы требуют установки на цеховых подстанциях большого числа коммутационных аппаратов и значительного расхода кабелей.

Радиальные схемы следует применять:

- для электроснабжения потребителей I категории;
- для электроснабжения мощных ЭП, не связанных единым технологическим процессом;
- для электроснабжения потребителей, взаимное расположение которых делает нецелесообразным питание их по магистральной схеме;
- для питания насосных и компрессорных станций;
- во взрывоопасных, пожароопасных и пыльных помещениях, в которых распределительные устройства должны быть вынесены в отдельные помещения с нормальной средой.

На рис. 11 приведен пример выполнения радиальной схемы.

Наиболее экономичными являются магистральные схемы. Широкое применение получили схемы "блок трансформатор – магистраль" (БТМ) без распределительных устройств на подстанциях. В схемах БТМ целесообразно использование комплектных шинопроводов: в питающей сети – магистральных шинопроводов серии ШМА, в распределительной сети – распределительных шинопроводов серии ШРА. Магистральные схемы с шинопроводами обеспечивают высокую степень надежности электроснабжения. Их основными достоинствами являются универсальность и гибкость, позволяющие производить изменения технологического процесса и перестановку технологического оборудования в цехах без существенного изменения электрических сетей.

Магистральные схемы применяют:

- для питания электроприемников, связанных единым технологическим процессом, когда прекращение питания одного электроприемника вызывает необходимость прекращения всего технологического процесса;
- для питания большого числа мелких электроприемников, не связанных единым технологическим процессом, равномерно распределенных по площади цеха.

На рис. 12 приведена схема БТМ для двухтрансформаторной подстанции. Магистральные шинопроводы подключаются к вводным

автоматическим выключателям. Непосредственно к трансформатору допускается присоединять некоторые ЭП или освещение для бесперебойного их питания при отключении главной магистрали.

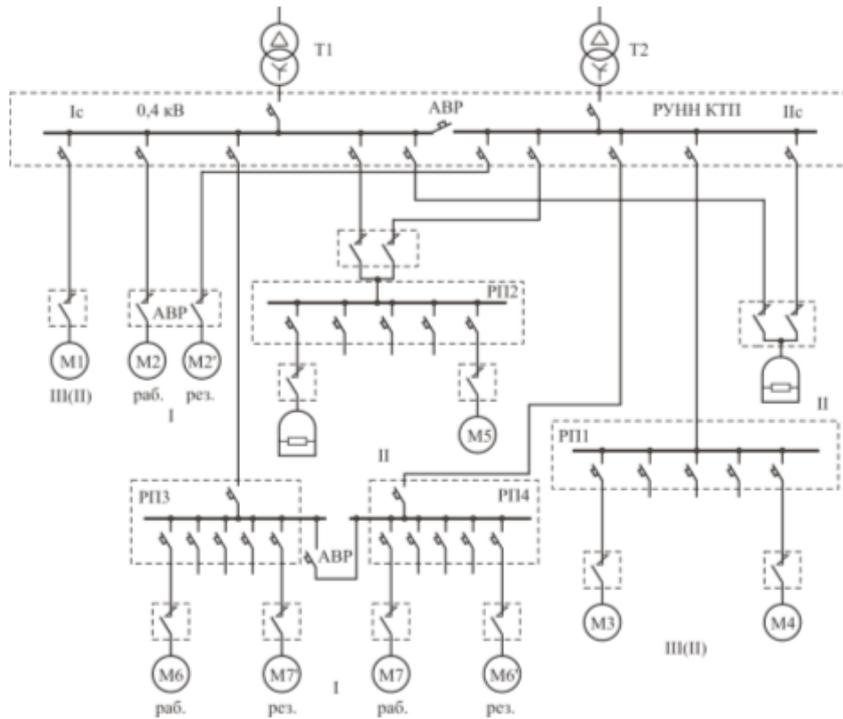


Рис. 11. Пример радиальной схемы для ЭП различных категорий по надёжности электроснабжения

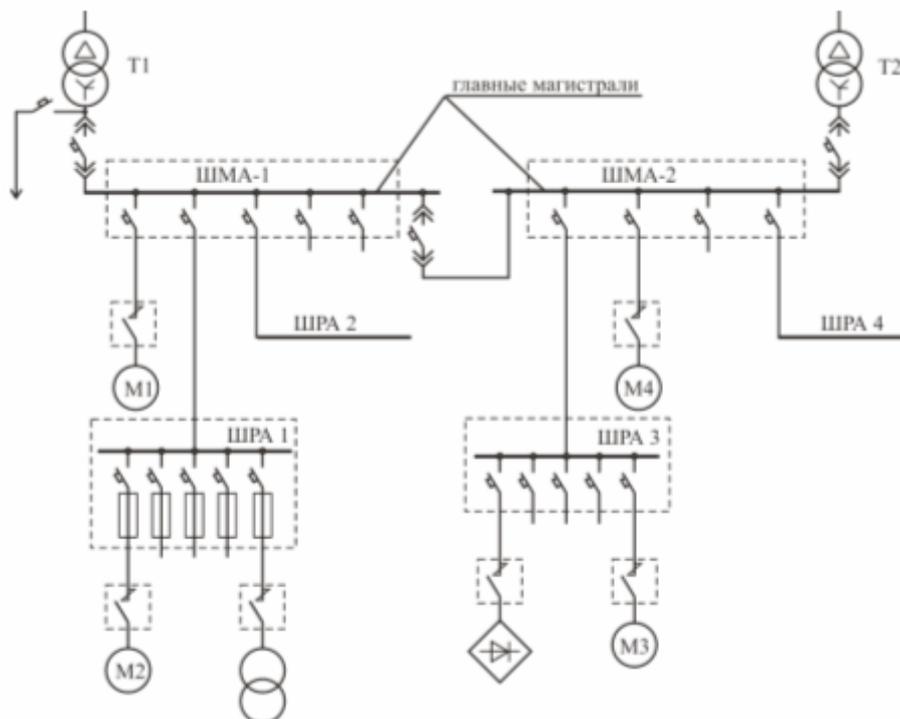


Рис. 12. Пример выполнения магистральной схемы при двухтрансформаторной КТП

Магистральные шинопроводы прокладываются в цехе на высоте  $4 \div 4,5$  метров от пола, распределительные шинопроводы для удобства эксплуатации устанавливаются, как правило, на высоте  $2,5 \div 3$  метров.

На практике наибольшее распространение получили смешанные схемы.

### **5 Выбор способов прокладки силовой сети цеха**

В зависимости от выбранной схемы цеховых сетей они конструктивно могут быть выполнены комплектными шинопроводами или кабельными линиями, проложенными открыто или скрыто. На выбор способов прокладки кабелей влияют количество линий, совпадающих по трассе, и характеристика окружающей среды. В соответствии с ПУЭ производственные помещения в зависимости от характеристики окружающей среды делят на сухие, влажные, сырые, особо сырые, жаркие, с химически активной средой, пыльные, пожаро- и взрывоопасные. В любой среде возможна прокладка кабелей открыто по строительным конструкциям (не более шести кабелей, идущих в одном направлении) с учётом следующих ограничений:

- в помещениях с химически активной средой необходимо использовать кабели с изоляцией, инертной к химически агрессивной среде (например, поливинилхлоридную);
- в пожароопасных – кабели с негорючим наружным слоем: например, защитные герметичные оболочки кабелей из негорючей резины (АНРГ) или негорючего поливинилхлорида (АПВВнг-LS, АПВВГнг);
- во взрывоопасных зонах любого класса использовать только бронированные кабели;
- во взрывоопасных зонах классов В-I и В-IIа использовать бронированные кабели только с медными жилами;
- во взрывоопасных зонах всех классов запрещается использовать кабели с полиэтиленовой изоляцией и полиэтиленовой защитной оболочкой.

Тросовые проводки применяют в помещениях со сложной конфигурацией строительной части, где из-за большого числа различных трубопроводов, колонн, ферм и балок трудно выполнить проводку другого типа.

Прокладку в стальных трубах следует использовать только во взрывоопасных зонах вместо бронированных кабелей.

Для защиты кабелей от воздействия окружающей среды и механических повреждений возможно использовать прокладку в алюминиевых трубах и полимерных (полипропиленовые, поливинилхлоридные, полиэтиленовые и др.)

При большом числе кабельных линий, совпадающих по направлению, следует использовать прокладку кабелей на специальных кабельных конструкциях, на лотках, в коробах и кабельных каналах с учётом влияния окружающей среды на выбор марки кабеля.

Целесообразно использование модульной прокладки в цехах машиностроительной, приборостроительной, радиотехнической и других отраслей промышленности. Применение модульной сети делает электротехническую часть производства независимой от размещения технологического оборудования. В такой сети кабели прокладываются под полом в трубах с ответвительными коробками для присоединения ЭП с шагом (модулем)  $1,5 \div 6$  метров в зависимости от характера производства и габаритов технологического оборудования.

Для питания передвижных ЭП (крановых электродвигателей тельферов, мостовых кранов, кран-балок) применяют троллейные линии, выполненные из профильной стали или алюминиевых шин, а также троллейными шинопроводами типа ШТМ. Возможно использовать для их питания гибкие кабели.

## 6 Выбор силового электрооборудования напряжением до 1000

### В

#### 6.1 Выбор и проверка комплектных шинопроводов

Сечение шин выбирают по допустимому нагреву длительно протекающим максимальным током нагрузки по условию:

$$I_p \leq I_n, \quad (62)$$

где  $I_n$  – номинальный ток шинопровода, А.

Для оценки уровня напряжения, подводимого к ЭП, запитанным от шинопроводов, необходимо учитывать потери напряжения в шинопроводах.

Потери напряжения в шинопроводах определяют по формуле:

$$\Delta U_{\text{ш}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 100}{U_n} (r_0 \cos \varphi_{\text{ср}} + x_0 \sin \varphi_{\text{ср}}) \sum_{i=1}^n I_{pi} \cdot l_i, \quad \%, \quad (63)$$

где  $r_0$ ,  $x_0$  – соответственно удельные активное и индуктивное сопротивления шинопроводов, Ом/км;  $\cos \varphi_{\text{ср}}$  – средневзвешенный коэффициент нагрузки шинопровода;  $I_{pi}$  – ток расчётный  $i$ -той нагрузки, А;  $l_i$  – длина шинопровода от ввода до точки подключения  $i$ -той нагрузки, км.

При токе нагрузки, близком к номинальному току шинопровода, потери напряжения допускается определять по линейной потере напряжения на 100 м шинопровода по формуле:

$$\Delta U_{\text{ш}} = \frac{\Delta U_{\text{лш}} \cdot l_{\text{ш}}}{U_n}, \quad \%, \quad (64)$$

где  $\Delta U_{\text{лш}}$  – линейная потеря напряжения шинопровода, В;  $l_{\text{ш}}$  – длина шинопровода до точки подключения нагрузки, м;  $U_n$  – номинальное напряжение, В.

После расчета токов короткого замыкания необходимо сделать проверку выбранных сечений шинопроводов по термической и электродинамической стойкости. Для этого ток трехфазного КЗ ( $I_k^{(3)}$ ), рассчитанный в начале шинопровода следует сравнить с термической

стойкостью шинпровода, а ударный ток – с электродинамической стойкостью по условиям:

$$I_{\text{к}}^{(3)} \leq i_{\text{тс}}, \text{ кА}, \quad (65)$$

$$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{уд доп.}}, \text{ кА},$$

где  $i_{\text{тс}}$  – термическая стойкость шинпровода, кА;  $i_{\text{уд доп.}}$  – электродинамическая стойкость шинпровода, кА, взятые из технических характеристик.

## 6.2 Выбор силовых распределительных пунктов

В качестве силовых распределительных пунктов (РП) можно выбирать щиты распределительные (корпуса для электрощитового ЭО), либо типовые РП. Данные по щитам распределительным, а также по осветительно-силовым щиткам приведены в части 1 методических указаний по курсовому и дипломному проектированию. Типовые РП комплектуются либо предохранителями (серии ШР11 и ШРС1), либо автоматическими выключателями (серии ПР8501, ПР 8503, ПР11 и др.)

Распределительные пункты выбирают по степени защиты, по номинальному току ввода, по количеству отходящих линий, типу защитного аппарата (с предохранителями или с автоматическими выключателями) и номинальному току аппаратов для присоединений.

Согласно ПУЭ от перегрузки должны быть защищены:

- сети внутри помещений, выполненные открыто проложенными проводниками с горючей наружной оболочкой или изоляцией;
- осветительные сети в жилых и общественных зданиях, в торговых помещениях, служебно-бытовых помещениях промышленных предприятий, включая сети для переносных и бытовых ЭП, а также в пожароопасных зонах;
- силовые сети на промышленных предприятиях, в жилых и общественных зданиях, торговых помещениях – только в случае, когда по условиям технологического процесса или по режиму работы сети может возникать длительная перегрузка проводников;

– сети всех видов во взрывоопасных зонах классов В-I, В-Ia; В-II, В-IIIa.

### 6.3 Выбор сечений силовых линий

Сечения силовых линий выбираются по допустимому нагреву длительно протекающим максимальным током нагрузки, по потере напряжения и по условию соответствия выбранному аппарату защиты.

### 6.4 Выбор сечений по допустимому нагреву

Силовые линии разделяют на распределительные, непосредственно питающие один или несколько ЭП, и питающие, которые питают группу электроприемников, но непосредственно к ним не подключаются.

Сечение по допустимому нагреву выбирают по условию:

$$I_p \leq I_d K_{\Pi}, \quad (66)$$

где  $I_p$  – максимальный рабочий (расчетный) ток нагрузки, А;  $I_d$  – длительно допустимый ток, А;  $K_{\Pi}$  – поправочный коэффициент, учитывающий реальные условия охлаждения проводника и зависящий от температуры окружающей среды и способа прокладки.

За расчетный ток нагрузки линии, питающей одиночный электроприемник, принимается номинальный ток нагрузки этого ЭП:

$$I_p = I_n, \text{ А.} \quad (67)$$

Для линии, питающей многодвигательный агрегат с одновременным пуском электродвигателей, расчетный ток нагрузки равен сумме номинальных токов двигателей:

$$I_p = \sum_{i=1}^n I_{ni}, \text{ А.} \quad (68)$$

Для магистралей и питающих линий определяется расчетная нагрузка группы ЭП по методу коэффициента активной расчетной мощности, а затем рассчитывается ток нагрузки по формуле (49).

Поправочный коэффициент необходимо учитывать при прокладке линий в жарких помещениях, а также при прокладке кабелей в коробах. Значения поправочных коэффициентов в зависимости от температуры

окружающей среды для разных видов изоляции жил приведены в табл. 15; в зависимости от способа прокладки кабелей в коробах – в табл. 16.

Таблица 15 Поправочные коэффициенты на токи для кабелей в зависимости от температуры воздуха

Материал изоляции жил кабеля	Значение $K_{\Pi}$ при температуре воздуха, °С					
	+25	+30	+35	+40	+45	+50
резиновая изоляция	1,00	0,91	0,82	0,71	0,58	0,41
поливинилхлоридная (ПВХ) изоляция	1,00	0,94	0,87	0,79	0,71	0,61
изоляция из сшитого полиэтилена (СПЭ-изоляция)	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,74

Таблица 16 Значения поправочных коэффициентов для кабелей, прокладываемых в коробах

Способ прокладки	Количество проложенных проводов и кабелей		Снижающий коэффициент для проводников, питающих	
	однопровольные х	многопровольные х	отдельные ЭП с коэффициентом использования до 0,7	группы ЭП и отдельные ЭП с коэффициентом использования более 0,7
Многослойно и пучками	–	До 4	1,00	–
	2	5 – 6	0,85	–
	3 – 9	7 – 9	0,75	–
	10 – 11	10 – 11	0,70	–
	12 – 14	12 – 14	0,65	–
	15 – 18	15 – 18	0,60	–
Однослойно	2 – 4	2 – 4	–	0,67
	5	5	–	0,60

В остальных случаях  $K_{\Pi} = 1$ .

Для электроприемников с повторно-кратковременным режимом работы для медных проводников сечением более 6 мм<sup>2</sup> и алюминиевых сечением более 10 мм<sup>2</sup> ток ЭП приводится к длительному режиму работы умножением  $I_{\Pi}$  на коэффициент  $K_{\Pi В} = 1,14\sqrt{\Pi В}$  :

$$I_p = I_{\Pi} K_{\Pi В} = 1,14 I_{\Pi} \sqrt{\Pi В}, \text{ А, (69)}$$

где  $\Pi В$  – относительная продолжительность включения в относительных единицах; 1,14 – коэффициент запаса.

Во взрывоопасных зонах сечения распределительных линий, питающих асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором, выбирают по условию:

$$1,25I_p \leq I_d K_{II}. \quad (70)$$

### 6.5 Проверка сечений по потере напряжения

Согласно ПУЭ, для силовых электроприемников отклонение напряжения от номинального должно составлять не более  $\pm 5\%$ .

Выбранные по допустимому нагреву сечения силовых линий проверяют по потере напряжения по условию:

$$\Delta U_{\Sigma} = \Delta U_{тр} + \Delta U_{пл} + \Delta U_{рл} \leq \Delta U_{доп}, \quad (71)$$

где  $\Delta U_{тр}$  – потери напряжения во вторичной обмотке цехового трансформатора, %;  $\Delta U_{пл}$  – потери напряжения в питающей линии, %;  $\Delta U_{рл}$  – потери напряжения в распределительной линии, %;  $\Delta U_{доп}$  – допустимые потери напряжения, равные 10 % для силовых электроприемников.

Потери напряжения в распределительных линиях определяются по формулам:

– при питании одиночного ЭП

$$\Delta U_{рл} = \frac{\sqrt{3}I_p l \cdot 100}{U_H} (r_0 \cos \varphi + x_0 \sin \varphi), \quad \%, \quad (72)$$

– для магистрали

$$\Delta U_{рл} = \frac{\sqrt{3} \cdot 100}{U_H} (r_0 \cos \varphi + x_0 \sin \varphi) \sum_{i=1}^n I_{pi} l_i, \quad \%. \quad (73)$$

Потери напряжения в питающей линии

$$\Delta U_{пл} = \frac{\sqrt{3}I_p l \cdot 100}{U_H} (r_0 \cos \varphi_{ср} + x_0 \sin \varphi_{ср}), \quad \%, \quad (74)$$

где  $I_p$  – расчетный ток линии, А;  $I_{pi}$  – расчетный ток  $i$ -ой нагрузки магистральной линии, А;  $r_0$ ,  $x_0$  – соответственно удельные активное и индуктивное сопротивления линий, Ом/км;  $l$  – длина линии,

км;  $l_i$  – длина линии до точки подключения  $i$ -ой нагрузки к магистрали, км;  $\cos \varphi_{cp}$  – средневзвешенный коэффициент мощности группы электроприемников.

Значения удельных сопротивлений кабелей приведены в табл. 17.

Таблица 17 Удельные активные и индуктивные сопротивления кабелей

Номинальное сечение жилы, мм <sup>2</sup>	Активное сопротивление жил при +20 °С, Ом/км		Индуктивное сопротивление при $U_n$ до 1 кВ, Ом/км
	алюминиевых	медных	
1,5	–	12,26	0,101
2,5	13,3	7,36	0,099
4	7,74	4,6	0,095
6	5,17	3,07	0,09
10	3,1	1,84	0,073
16	1,94	1,15	0,0675
25	1,24	0,74	0,0662
35	0,89	0,52	0,0637
50	0,62	0,37	0,0625
70	0,443	0,26	0,0612
95	0,326	0,194	0,0602
120	0,258	0,153	0,0602
150	0,206	0,122	0,0596
185	0,167	0,099	0,0596
240	0,013	0,077	0,0587

Если ЭП, запитанные от одного РП или ШРА, имеют одинаковую мощность, то проверку сечений по потере напряжения следует проводить для наиболее удаленного электроприемника.

### 6.6 Проверка сечений на соответствие выбранному аппарату защиты

Данная проверка производится после выбора защитной аппаратуры. Для выбора защитных аппаратов необходимо рассчитать пиковые нагрузки линий, которые возникают при пуске электроприемников. Для распределительной линии, питающей одиночный электроприемник, пиковый ток равен пусковому току этого ЭП:

$$I_{\text{пик}} = I_{\text{п}}, \text{ А}, (75)$$

где  $I_{\text{п}}$  – пиковый ток электроприемника, определяемый по паспортным данным ЭП.

При отсутствии паспортных данных пусковой ток может быть принят равным:

– для асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором и синхронных – 5-кратному значению номинального тока;

– для асинхронных электродвигателей с фазным ротором и двигателей постоянного тока –  $2,5I_{\text{н}}$ ;

– для печных и сварочных трансформаторов –  $3I_{\text{н}}$  (без приведения к ПВ = 100 %).

Для распределительной линии, питающей группу одновременно запускаемых ЭП:

$$I_{\text{пик}} = \sum_{i=1}^n I_{\text{п}i}, \text{ А}, (76)$$

где  $I_{\text{п}i}$  – пусковой ток  $i$ -ого ЭП.

Для магистрали пиковой нагрузкой является пуск электроприемника с самым большим пусковым током в то время, когда все остальные ЭП нормально работают:

$$I_{\text{пик}} = I_{\text{п max}} + \sum_{i=1}^n I_{\text{н}i}, \text{ А}, (77)$$

где  $I_{\text{н}i}$  – номинальный ток  $i$ -ого нормально работающего ЭП.

Для питающей линии

$$I_{\text{пик}} = I_{\text{п max}} + (I_{\text{р}} - K_{\text{и}} I_{\text{н max}}), \text{ А}, (78)$$

где  $I_{\text{п max}}$  – наибольший пусковой ток ЭП в группе;  $I_{\text{р}}$  – расчетный максимальный ток всех ЭП, питающихся от данной линии;  $K_{\text{и}}$  – коэффициент использования запускаемого ЭП;  $I_{\text{н max}}$  – номинальный ток ЭП с наибольшим пусковым током.

Для того чтобы протекание токов перегрузки и токов короткого замыкания по проводникам не приводило к их перегреву, выбранное

сечение проводника должно быть согласовано с аппаратом защиты этого проводника по условию:

$$\frac{I_D}{I_3} \geq K_{\text{защ}}, \quad (79)$$

где  $I_D$  – длительно допустимый ток проводника, А;  $I_3$  – ток аппарата защиты, А;  $K_{\text{защ}}$  – коэффициент защиты.

Значения коэффициента защиты и принимаемый ток аппарата защиты приведены в табл. 18.

Таблица 18 Значения коэффициента защиты

Тип защитного аппарата и принимаемый ток защиты $I_3$	Коэффициент защиты $K_{\text{защ}}$ или кратность длительно допустимого тока для сетей			
	при обязательной защите от перегрузки			не требуется защиты от перегрузки
	проводники с резиновой и аналогичной по тепловым характеристикам изоляцией		кабели с бумажной изоляцией	
	взрыво- и пожаро-опасные помещения	невзрыво- и непожаро-опасные помещения		
Номинальный ток плавкой вставки предохранителей: $I_3 = I_{\text{н вст.}}$	1,25	1,0	1,0	0,33
Ток срабатывания автоматического выключателя, имеющего только максимальный мгновенно действующий расцепитель: $I_3 = I_{\text{нэр}}$	1,25	1,0	1,0	0,22
Номинальный ток расцепителя выключателя с нерегулируемой обратно-зависимой характеристикой (независимо от наличия или отсутствия отсечки): $I_3 = I_{\text{нтр}}$	1,0	1,0	1,0	1,0
Ток срабатывания расцепителя автоматического выключателя с регулируемой, обратнoзависимой от тока характеристикой (при наличии отсечки): $I_3 = I_{\text{уст}}$ при перегрузке	1,0	1,0	0,8	0,66

Данные по выбору сечений силовых линий свести в табл. 19.

Таблица 19 Выбор сечений силовых линий

Номер кабельной линии	Обозначение ЭП на плане цеха	Способ прокладки	Марка кабеля	Длина линии L, м	Расчетные токи		Поправочный коэффициент $K_{\text{п}}$	Сечение по допустимому напряжению S, мм <sup>2</sup>	Длительно допустимый ток $I_{\text{д}}$ , А	Потери напряжения в линии $\Delta U_{\text{л}}$ , %	Суммарные потери напряжения $\Delta U_{\Sigma}$ , %	Коэффициент защиты $K_{\text{защ}}$	Ток аппарата защиты $I_{\text{а}}$ , А	Окончательно выбранное сечение
					Рабочий ток $I_{\text{р}}$ , А	Пиковый ток $I_{\text{пик}}$ , А								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Силовые линии, питающие однофазные электроприемники, могут иметь двух- или трехпроводное исполнение, а питающие трехфазные ЭП, четырех- или пятипроводные.

Однофазные двух- и трехпроводные линии, а также трехфазные четырех- и пятипроводные линии при питании однофазных нагрузок должны иметь сечение нулевых рабочих (N) проводников, равное сечению фазных проводников.

Трехфазные четырех- и пятипроводные линии при питании трехфазных симметричных нагрузок должны иметь сечение N-проводников, равное сечению фазных проводников, если фазные проводники имеют сечение до 16 мм<sup>2</sup> по меди и 25 мм<sup>2</sup> по алюминию, а при больших сечениях – не менее 50 % сечения фазных проводников.

Сечение нулевых защитных проводников (РЕ) проводников при их наличии должно равняться сечению фазных проводников при сечении последних до 16 мм<sup>2</sup>, иметь сечение 16 мм<sup>2</sup> при сечении фазных проводников от 16 до 35 мм<sup>2</sup> и не менее 50 % сечения фазных проводников при больших сечениях.

Окончательно выбранное сечение в табл. 19 указывать в полном виде с указанием марки проводника и сечений фазных и нулевых проводников (например, АВВГ 3×50 + 2×25).

## 7 Выбор защитной аппаратуры

Предохранители предназначены для защиты от токов короткого замыкания. Предохранители имеют простую конструкцию, небольшие размеры и сравнительно малую стоимость. Однако предохранителям присущи и серьезные недостатки, ограничивающие область их применения, к числу которых относятся: большой разброс срабатывания плавкой вставки – до 50 % по току, необходимость замены плавкой вставки или всего предохранителя после однократного срабатывания, возможность работы двигателя на двух фазах при перегорании предохранителя на одной фазе и др.

Предохранители выбирают по следующим параметрам:

– по номинальному напряжению: номинальное напряжение предохранителей  $U_{н пр.}$  должно быть, как правило, равно номинальному напряжению сети, где они устанавливаются:

$$U_{н пр.} = U_c; \quad (80)$$

– по номинальному току предохранителя  $I_{н пр.}$ :

$$I_{н пр.} \geq I_p; \quad (81)$$

по номинальному току плавкой вставки предохранителя  $I_{н вст.}$ , который должен быть отстроен от пусковых токов:

$$I_{н вст.} \geq \frac{I_{п}}{a}, \quad (82)$$

где  $I_{п}$  – пусковой ток ЭП, А;  $a$  – коэффициент, зависящий от пускового режима защищаемых электродвигателей и типа плавкого предохранителя.

При выборе плавких вставок безинерционных предохранителей (ПН, НПН, ППН) для защиты электродвигателей с легким режимом пуска (электропривод вентиляторов, насосов, металлорежущих станков и пр. с длительностью пуска  $2 \div 5$  с)  $a = 2,5$ ; для электродвигателей с тяжелым режимом пуска (электропривод кранов, дробилок, центрифуг и т. п. с частыми пусками и большой длительностью пускового периода)

$a = 1,6$ . Для малоинерционных предохранителей (ПР2) при легком режиме пуска  $a = 3$  и при тяжелом режиме  $a = 2$ . При частых пусках двигателей с легким режимом пуска (15 и более в час) плавкие вставки нужно выбирать, как для тяжелого режима.

При защите магистрали, питающей несколько ЭП с разными режимами пуска:

$$I_{\text{н вст.}} \geq \frac{I_{\text{пик}}}{2,5}, \quad (83)$$

где  $I_{\text{пик}}$  – пиковый ток магистрали, рассчитанный по формуле (77).

При защите питающей линии номинальный ток плавкой вставки выбирается по условию (83), а пиковый ток определяется по формуле (78).

Последовательно включенные предохранители должны быть проверены по селективности. По защитным характеристикам плавких предохранителей определяют время отключения при протекании максимального тока КЗ ( $I_{\text{к}}^{(3)}$ ). Селективность срабатывания предохранителей обеспечивается, если время отключения более удаленного от места повреждения предохранителя не менее чем в три раза больше времени отключения предохранителя, ближайшего к месту КЗ.

Автоматические выключатели, в основном, предназначены для защиты электроустановок напряжением до 1000 В от коротких замыканий и перегрузок.

Автоматические выключатели выбирают по следующим условиям:

$U_{\text{на}} \geq U_{\text{с}};$ $I_{\text{на}} \geq I_{\text{р}};$ $I_{\text{нтр}} \geq I_{\text{р}};$ $I_{\text{нэр}} \geq (1,25 \div 1,35)I_{\text{пик}},$	(84)
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------

где  $U_{\text{на}}$  – номинальное напряжение автоматического выключателя (АВ);  $I_{\text{на}}$  – номинальный ток АВ;  $I_{\text{нтр}}$  – номинальный ток теплового расцепителя;  $I_{\text{нэр}}$  – номинальный ток (ток уставки) электромагнитного расцепителя;  $U_{\text{с}}$  – напряжение сети;  $I_{\text{р}}$  – максимальный рабочий ток линии;  $I_{\text{пик}}$  – пиковый ток линии.

Номинальные токи расцепителей соседних автоматических выключателей последовательно включенных в сеть должны различаться не менее чем на одну ступень. Номинальные токи расцепителей автоматического выключателя, ближайшего к источнику питания (вводного в ТП), должны быть не менее чем в 1,5 раза больше, чем у наиболее удаленного. Выполнение этих условий обеспечивает селективность срабатывания тепловых расцепителей. При коротких замыканиях селективность защиты обеспечиваться не будет, так как электромагнитные расцепители при токах, равных или больших их токов уставки, срабатывают практически мгновенно. Для гарантированного обеспечения селективности следует выбирать АВ с регулируемой характеристикой срабатывания, у которых возможно задавать (выставлять) время срабатывания.

Результаты выбора защитных аппаратов свести в табл. 20.

Таблица 20 Выбор защитных аппаратов цеховых электрических сетей (силовых и осветительных)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номер линии	Обозначение ЭП или узла питания на схеме	Тип автоматического выключателя или предохранителя	Номинальное напряжение аппарата защиты, $U_{\text{н}}$ , В	Расчетный ток линии, $I_{\text{р}}$ , А	Пиковый ток линии, $I_{\text{пик}}$ , А	Номинальный ток аппарата защиты, $I_{\text{на}}$ , А	Номинальный ток теплового расцепителя, $I_{\text{нтр}}$ , А или номинальный ток плавкой	Номинальный ток электромагнитного расцепителя, $I_{\text{нэр}}$ , А

## 8 Расчет токов короткого замыкания

Расчет токов КЗ необходим для проверки защитных аппаратов по отключающей способности, проверки защит по чувствительности действия и шинопроводов (ШМА, ШРА) по термической и электродинамической стойкости.

С этой целью рассчитываются токи трехфазного короткого замыкания ( $I_K^{(3)}$ ) на выходе защитных аппаратов, токи однофазного КЗ ( $I_K^{(1)}$ ) в конце защищаемой зоны аппарата защиты, ток трехфазного КЗ и ударный ( $i_y$ ) в начале шинопровода.

При расчетах токов КЗ в электроустановках до 1 кВ необходимо учитывать:

- 1) индуктивные сопротивления всех элементов короткозамкнутой цепи, включая силовые трансформаторы, проводники, трансформаторы тока, реакторы, токовые катушки автоматических выключателей;
- 2) активные сопротивления элементов короткозамкнутой цепи;
- 3) активные сопротивления различных контактов и контактных соединений;
- 4) значения параметров синхронных и асинхронных электродвигателей.

При расчетах токов КЗ рекомендуется учитывать:

- 1) сопротивление электрической дуги в месте КЗ;
- 2) изменение активного сопротивления проводников короткозамкнутой цепи вследствие их нагрева при КЗ;
- 3) влияние комплексной нагрузки (электродвигатели, преобразователи, термические установки, лампы накаливания) на ток КЗ, если номинальный ток электродвигателей нагрузки превышает 1,0 % начального значения периодической составляющей тока КЗ, рассчитанного без учета нагрузки.

Токи КЗ рекомендуется рассчитывать в именованных единицах.

Следует использовать 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.

Сопротивления всех элементов схемы замещения выразить в миллиомах.

При электроснабжении электроустановки от энергосистемы через понижающий трансформатор начальное действующее значение периодической составляющей трехфазного тока КЗ в килоамперах без учета подпитки от электродвигателей рассчитывают по формуле:

$$I_{\text{к}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср.НН}}}{\sqrt{3}\sqrt{r_{1\Sigma}^2 + x_{1\Sigma}^2}}, \quad (85)$$

где  $U_{\text{ср.НН}}$  – среднее номинальное напряжение сети, в которой произошло короткое замыкание, В;

$r_{1\Sigma}$ ,  $x_{1\Sigma}$  – соответственно суммарное активное и индуктивное сопротивление прямой последовательности цепи до точки КЗ, мОм.

Значение периодической составляющей тока однофазного КЗ от системы в килоамперах рассчитывают по формуле

$$I_{\text{к}}^{(1)} = \frac{\sqrt{3}U_{\text{ср.НН}}}{\sqrt{(2r_{1\Sigma} + r_{0\Sigma})^2 + (2x_{1\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}}, \quad (86)$$

где  $r_{0\Sigma}$  и  $x_{0\Sigma}$  – суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивление нулевой последовательности относительно точки КЗ, мОм.

Для определения суммарных сопротивлений до точки КЗ необходимо составить расчетную схему, на которой приводятся технические характеристики цехового трансформатора (тип, схема соединения обмоток, номинальная мощность, номинальные напряжения обмоток, напряжение КЗ трансформатора и мощность потерь при КЗ), марка кабелей, сечения и длины линий, типы и номинальные токи коммутационно-защитных аппаратов, точки КЗ.

Пример расчетной схемы приведен на рис. 13.

Далее составляются схемы замещения прямой и нулевой последовательностей, представленные на рис. 14 и рис. 15.

Эквивалентное индуктивное сопротивление системы, приведенное к ступени низшего напряжения сети, рассчитывается по формуле



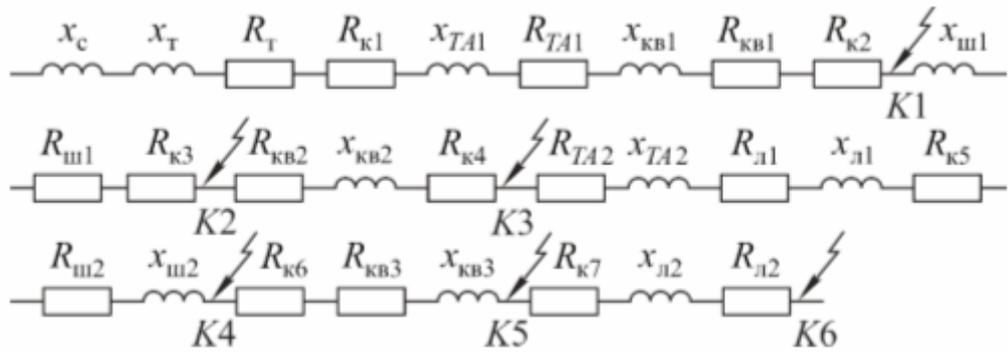


Рис. 14. Схема замещения прямой последовательности:  $x_c$  – эквивалентное сопротивление системы;  $R_T, x_T$  – активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности цехового трансформатора;  $R_{TA}, x_{TA}$  – активное и индуктивное сопротивления первичных обмоток трансформаторов тока;  $R_{kv}, x_{kv}$  – активное и индуктивное сопротивления токовых катушек автоматических выключателей;  $R_{ш}, x_{ш}$  – активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности шинпроводов;  $R_{л}, x_{л}$  – активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности кабельных линий;  $R_k$  – активное сопротивление различных контактов.

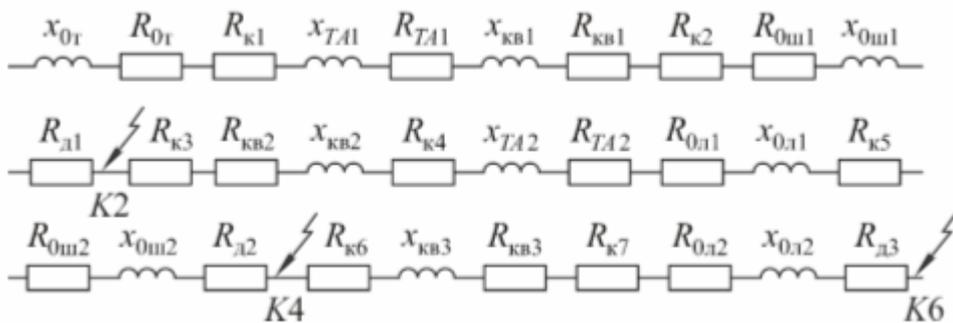


Рис. 15. Схема замещения нулевой последовательности:  $R_{0T}, x_{0T}$  – активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности цехового трансформатора;  $R_{0ш}, x_{0ш}$  – активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности шинпроводов;  $R_{0л}, x_{0л}$  – активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности кабельных линий;  $R_{л}$  – сопротивление дуги в месте короткого замыкания.

При отсутствии указанных данных эквивалентное индуктивное сопротивление системы в миллиомах допускается рассчитывать по формуле

$$x_c = \frac{U_{\text{ср.НН}}^2}{\sqrt{3}I_o U_{\text{ср.ВН}}}, \quad (88)$$

где  $I_o$  – номинальный ток отключения силового выключателя, установленного на стороне высшего напряжения понижающего трансформатора .

Активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности понижающих трансформаторов ( $r_T, x_T$ ) в миллиомах, приведенные к ступени низшего напряжения сети, рассчитывают по формулам:

$$r_T = \frac{P_K U_{\text{НН}}^2}{S_{\text{НТ}}^2} 10^6; \quad (89)$$

$$x_T = \sqrt{u_K^2 - \left(\frac{100P_K}{S_{\text{НТ}}}\right)^2} \frac{U_{\text{НН}}^2}{S_{\text{НТ}}} 10^4, \quad (90)$$

где  $S_{\text{НТ}}$  – номинальная мощность трансформатора, кВА;  $P_K$  – потери КЗ в трансформаторе, кВт;  $U_{\text{НН}}$  – номинальное напряжение обмотки низшего напряжения трансформатора, кВ;  $u_K$  – напряжение КЗ трансформатора, %.

Активные и индуктивные сопротивления нулевой последовательности понижающих трансформаторов, обмотки которых соединены по схеме  $\Delta/Y_0$ , при расчете КЗ в сети низшего напряжения следует принимать равными соответственно активным и индуктивным сопротивлениям прямой последовательности. При других схемах соединения обмоток трансформаторов активные и индуктивные сопротивления нулевой последовательности необходимо принимать в соответствии с указаниями изготовителей.

Активные и индуктивные сопротивления прямой и нулевой последовательностей шинопроводов приведены в табл. 21.

Таблица 21 Параметры комплектных шинопроводов

Тип шинопровода	Номинальное напряжение, кВ	Номинальный ток, А	Сопротивление фазы, мОм/м		Сопротивление нулевого проводника, мОм/м	
			$R_{ш}$	$X_{ш}$	$R_{0ш}$	$X_{0ш}$
ШМА4-1250	0,38/0,66	1250	0,034	0,016	0,054	0,053
ШМА4-1650	0,38/0,66	1600	0,030	0,014	0,037	0,042
ШМА4-3200	0,38/0,66	3200	0,010	0,005	0,064	0,035
ШМА68П	0,38/0,66	2500	0,020	0,020	0,070	0,045
ШМА68П	0,38/0,66	4000	0,013	0,015	0,070	0,045
ШРА73	0,38	250	0,210	0,210	0,12	0,210
ШРА73	0,38	400	0,150	0,170	0,162	0,164
ШРА73	0,38	630	0,100	0,130	0,162	0,164

Значения удельных сопротивлений кабелей приведены в табл. 17.

Значения активных сопротивлений контактов различного вида приведены в табл. 22, 23, 24.

Таблица 22 Сопротивления контактных соединений кабелей

Сечение алюминиевого 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 23 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 контактного соединения, мОм	0,009	0,006	0,004	0,003	0,002	0,001

Таблица 24 Приближенные значения сопротивлений разъемных контактов коммутационных аппаратов напряжением до 1 кВ

Номинальный ток аппарата, А	Активное сопротивление, мОм, разъемных соединений		
	автоматического выключателя	рубильника	разъединителя
50	1,30	—	—
70	1,00	—	—
100	0,75	0,50	—
150	0,65	—	—
200	0,60	0,40	—
400	0,40	0,20	0,20
600	0,25	0,15	0,15
1000	0,12	0,08	0,08
3000	—	—	—

При приближенном учете сопротивлений контактов принимают:  $r_k = 0,1 \text{ мОм}$  – для контактных соединений кабелей;  $r_k = 0,01 \text{ мОм}$  – для шинопроводов;  $r_k = 1,0 \text{ мОм}$  – для коммутационных аппаратов.

При расчете токов КЗ в электроустановках напряжением до 1 кВ следует учитывать как индуктивные, так и активные сопротивления первичных обмоток всех многовитковых измерительных трансформаторов тока, которые имеются в цепи КЗ. Значения активных и индуктивных сопротивлений нулевой последовательности принимают равными значениям сопротивлений прямой последовательности. Параметры некоторых многовитковых трансформаторов тока приведены в табл.25. Активным и индуктивным сопротивлением одновитковых трансформаторов (на токи более 500 А) при расчетах токов КЗ можно пренебречь.

Расчеты токов КЗ в электроустановках напряжением до 1 кВ следует вести с учетом индуктивных и активных сопротивлений катушек (расцепителей) максимального тока автоматических выключателей, принимая значения активных и индуктивных сопротивлений нулевой последовательности равными соответствующим сопротивлениям прямой последовательности. Значения сопротивлений катушек расцепителей и контактов некоторых автоматических выключателей приведены в табл. 26.

Таблица 25 Сопротивления первичных обмоток многовитковых трансформаторов тока

Коэффициент трансформации трансформаторов тока	Сопротивление первичной обмотки многовиткового трансформатора, мОм, класса точности			
	1		3	
	$X_{ГТ}$	$\Gamma_{ГТ}$	$X_{ГТ}$	$\Gamma_{ГТ}$
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	0,30	0,20	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 26 Сопротивления катушек и контактов автоматических выключателей

Номинальный ток выключателя, А	Сопротивление катушки и контакта, мОм	
	$R_{кв}$	$X_{кв}$
50	7	4,50
70	3,50	2
100	2,15	1,20
140	1,30	0,70
200	1,10	0,50
400	0,65	0,17
600	0,41	0,13
1000	0,25	0,10
1600	0,14	0,08
2500	0,13	0,07
4000	0,10	0,05

При определении минимального значения тока КЗ следует учитывать влияние на ток КЗ активного сопротивления электрической дуги в месте КЗ.

Приближенные значения активного сопротивления дуги приведены в табл. 27.

Таблица 27 Значения активного сопротивления дуги

Расчетные условия КЗ	Активное сопротивление дуги ( $r_d$ ), мОм, при КЗ за трансформаторами мощностью, кВА					
	250	400	630	1000	1600	2500
КЗ вблизи выводов низшего напряжения трансформатора:						
- в разделке кабелей напряжением:						
0,4 кВ	15	10	7	5	4	3
0,525 кВ	14	8	6	4,5	3,5	2,5
0,69 кВ	12	7	5	4	3	2
- в шинопроводе типа ШМА напряжением:						
0,4 кВ	—	—	—	6	4	3
0,525 кВ	—	—	—	5	3,5	2,5
0,69 кВ	—	—	—	4	3	2
КЗ в конце шинопровода типа ШМА длиной						

100–150 м напряже-нием:						
0,4 кВ	–	–	–	6–8	5–7	4–6
0,525 кВ	–	–	–	5–7	4–6 3	3–5
0,69 кВ	–	–	–	4–6	–5	2–4

Значение ударного тока короткого замыкания определяется по формуле

$$i_y = \sqrt{2} K_y I_K^{(3)}, \text{ кА, (91)}$$

где  $K_y$  – ударный коэффициент, определяемый по графику на рис. 16 и зависящий от отношения активного и индуктивного сопротивлений

в точке КЗ:  $K_y = f\left(\frac{R_K}{x_K}\right)$ .

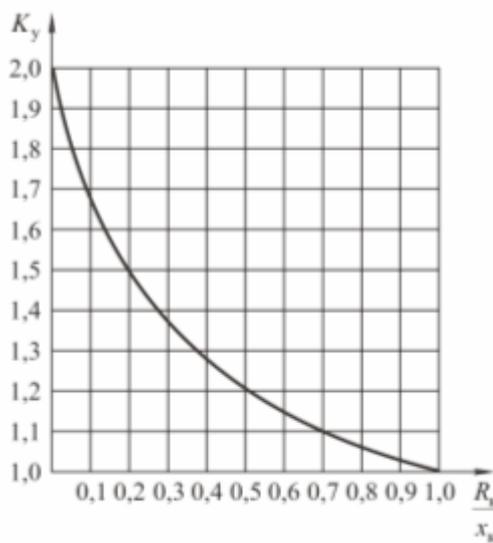


Рис. 16. Зависимость  $K_y = f\left(\frac{R_K}{x_K}\right)$

Пример расчета токов короткого замыкания привести для одной точки КЗ. Результаты расчета токов КЗ свести в табл. 28.

Таблица 29 Результаты расчета токов КЗ

Обозначение точки КЗ	$R_{1\Sigma}$ , мОм	$x_{1\Sigma}$ , мОм	$z_{1\Sigma}$ , мОм	$R_{0\Sigma}$ , мОм	$x_{0\Sigma}$ , мОм	$I_{\kappa}^{(1)}$ , кА	$I_{\kappa}^{(3)}$ , кА	$i_y$ , кА
1	2	3	4	5	6	7	8	9

## 9 Проверка правильности выбора защитной аппаратуры

Предохранители и автоматические выключатели проверяются по отключающей способности по условию:

$$I_0 \geq I_{\kappa}^{(3)}, \quad (92)$$

где  $I_0$  – отключающая способность аппарата защиты, кА;  $I_{\kappa}^{(3)}$  – ток трехфазного КЗ на выходе аппарата защиты, кА.

Проверка правильности выбора предохранителя по чувствительности:

$$\left. \begin{aligned} \frac{I_{\kappa}^{(1)}}{I_{\text{н. вст.}}} &\geq 3 \text{ – для помещений с нормальной средой;} \\ \frac{I_{\kappa}^{(1)}}{I_{\text{н. вст.}}} &\geq 4 \text{ – для помещений со взрывоопасной средой;} \end{aligned} \right\} \quad (93)$$

где  $I_{\kappa}^{(1)}$  – ток однофазного КЗ в конце зоны защиты предохранителя, А;  $I_{\text{н. вст.}}$  – номинальный ток плавкой вставки предохранителя, А.

Проверка правильности выбора автоматических выключателей по чувствительности действия защит:

– для тепловых расцепителей:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{I_{\text{к}}^{(1)}}{I_{\text{нтр}}} \geq 3 \text{ – для помещений с нормальной средой;} \\ \frac{I_{\text{к}}^{(1)}}{I_{\text{нтр}}} \geq 6 \text{ – для взрывоопасных помещений;} \end{array} \right\}; (94)$$

– для электромагнитных расцепителей:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{I_{\text{к}}^{(1)}}{I_{\text{нэр}}} \geq 1,4 \text{ – для АВ с } I_{\text{на}} \leq 100 \text{ А;} \\ \frac{I_{\text{к}}^{(1)}}{I_{\text{нэр}}} \geq 1,25 \text{ – для остальных АВ;} \end{array} \right\}, (95)$$

где  $I_{\text{к}}^{(1)}$  – ток однофазного КЗ в конце зоны защиты автоматического выключателя, А;  $I_{\text{нтр}}$  – номинальный ток теплового расцепителя АВ, А;  $I_{\text{нэр}}$  – номинальный ток электромагнитного расцепителя АВ, А.

Данные по проверке предохранителей свети в табл.29, автоматических выключателей – в табл. 30.

Таблица 29 Проверка правильности выбора предохранителей

№ линии	Обозначение ЭП	Тип предохранителя	$I_{\text{н пр.}}$ , А	$I_{\text{н. вст.}}$ , А	$I_0$ , кА	$I_{\text{к}}^{(3)}$ , кА	$I_{\text{к}}^{(1)}$ , кА	$\frac{I_{\text{к}}^{(1)}}{I_{\text{н. вст.}}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Таблица 31 Проверка правильности выбора автоматических выключателей

№ линии	Обозначение ЭП	Тип АВ	$I_{\text{на}}$ , А	$I_{\text{нтр}}$ , А	$I_{\text{нэр}}$ , А	$I_0$ , кА	$I_{\text{к}}^{(3)}$ , кА	$I_{\text{к}}^{(1)}$ , кА	$\frac{I_{\text{к}}^{(1)}}{I_{\text{нтр}}}$	$\frac{I_{\text{к}}^{(1)}}{I_{\text{нэр}}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Если выбранные аппараты не проходят проверку по отключающей способности, то их необходимо заменить на другие типы аппаратов с большей отключающей способностью. Если защитные аппараты не проходят проверку по чувствительности, необходимо увеличить сечения линий, чтобы увеличить ток однофазного КЗ.

## **10 Методические указания по выполнению графической части проекта электроснабжения электроприемников цеха**

На планах размещения электрооборудования цеха наносят и указывают:

- строительные конструкции и строительные оси;
- наименование производственных участков;
- классы взрывоопасных и пожароопасных зон, категорию и группу взрывоопасных смесей для взрывоопасных зон;
- обозначение силовых ЭП, их позиционные номера и паспортную мощность;
- комплектные распределительные устройства на напряжение до 1000 В (распределительные щиты, щиты станций управления, распределительные пункты, ящики и шкафы управления, вводно-распределительные устройства) и их обозначения;
- линии питающие и распределительные и их обозначения (номера);
- компоновку цеховой КТП.

Пример оформления плана расположения электрооборудования приведен на рис.17.

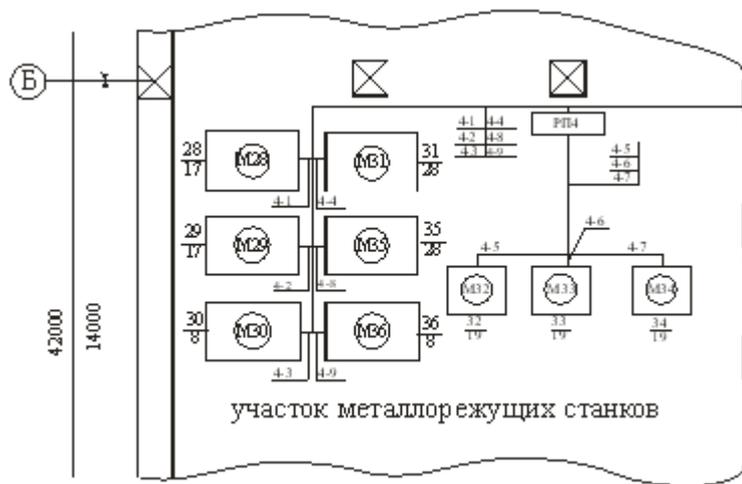


Рис.17 . Фрагмент плана расположения ЭО цеха.

На схемах цеховой электрической сети наносят и указывают:

- цеховые трансформаторы, их тип и мощность, схему соединения обмоток;
- над силовыми линиями: номер линии, марка проводника, количество и сечение жил, под линией –длина линии в метрах;
- возле коммутационно-защитной аппаратуры: тип аппарата и номинальный ток плавкой вставки для предохранителя или номинальный ток теплового расцепителя для автоматического выключателя;
- для силовых ЭП их обозначение и паспортную мощность;
- типы комплектных распределительных устройств.

Пример оформления схемы цеховой сети приведен на рис.18.

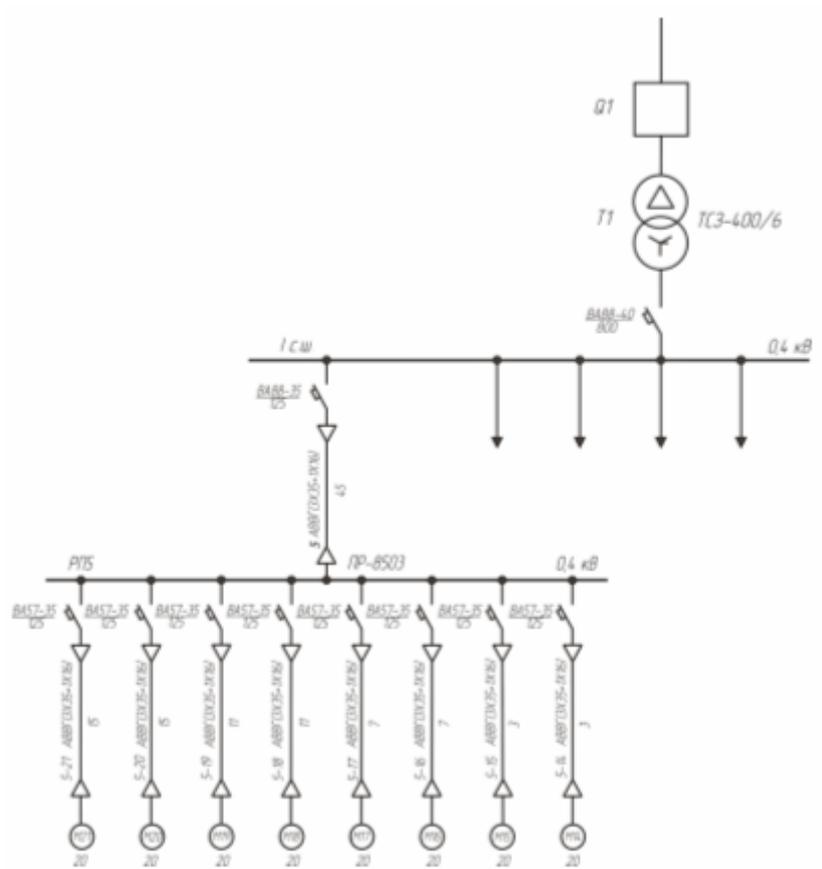


Рис.18. Фрагмент схемы цеховой электрической сети.

## Литература

1. Быстрицкий Г.Ф. Основы энергетики. – М.: КноРус, 2013.-278 с. ил.
2. Герасименко А.А. Передача и распределение электрической энергии. – М.:КноРус, 2015.-724 с. ил.
3. Кудрин Б.И. Электроснабжение. – М.: Академия, 2013.-672 с. ил.
4. Кудрин Б.И. Электроснабжение. – М.: Академия, 2013.-672 с. ил.
5. Шаров Ю.В. Электроэнергетика. – М.: Инфра-М, 2016.-384 с. ил.
6. Кудинов А.А. Тепловые электрические станции. Схемы и оборудование: Учебное пособие. – М.:Инфра-М, 2015. – 376 с. ил.
7. Грунтович Н.В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования. – М.:Инфра-М, 2013. – 271 с. ил.
8. Анчарова Т.В. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений: Учебник. – М.:Инфра-М, 2016. – 416 с. ил.
9. Сибикин Ю.Д. Технология энергоснабжения: Учебник – 3-е изд., перераб. и доп. – М.:Форум, 2015. – 352 с. ил.
10. Сибикин Ю.Д. Электрические подстанции. – М.:РадиоСофт, 2014. – 141 с. ил.
11. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии/ под ред. В.В. Денисова. – М.:Феникс, 2015. – 382 с. ил.
12. Шабад В.К. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах. – М.:Академия, 2013. – 193 с. ил.
13. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. – М.:КноРус, 2016. – 240 с. ил.
14. Важов В.Ф. Техника высоких напряжений: Учебник. – М.:Инфра-М, 2016. – 264 с. ил.
15. Ушаков В.Я. Электроэнергетические системы и сети. – М.:Юрайт, 2016. – 446 с. ил.
16. Климова Г.Н. Электроэнергетические системы и сети. Энергосбережение. 2-е изд. – М.:Юрайт, 2016. – 179 с. ил.
17. Бачаров Ю.Н. Техника высоких напряжений. –М.:Юрайт, 2016. – 264 с. ил.
18. Хрущев Ю.В. Электроэнергетические системы и сети. Электрические переходные процессы. – М.:Юрайт, 2016. – 153 с. ил.
19. Исмагилов Ф.Р. Основные вопросы проектирования воздушных линий электропередач: Учебное пособие. – М.:Машиностроение, 2015. – 211 с. ил.
20. Фролов Ю.М., Шелякин В.П. Основы электроснабжения. – СПб.:Лань, 2013. – 432 с. ил.
21. Почаевец В.С. Электрические подстанции: Учебник. – М.:Маршрут, 2012. – 492 с. ил.