

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

**Кафедра строительства,  
энергетики и транспорта**

**Методические указания  
к практическим занятиям для студентов**

по дисциплине: **Электроэнергетика**

для направления подготовки (специальности)

**13.03.02**

код направления подготовки

**«Электроэнергетика и электротехника». Профиль – «Электроснабжение»**

наименование направления подготовки

**Для всех форм обучения**

код и наименование специальности, форма обучения

**Мурманск  
2021**

Составил: Васильева Елена Витальевна, доцент кафедры строительства, электроэнергетики и транспорта Мурманского государственного технического университета

Методические указания к практическим занятиям студентов рассмотрены и одобрены на заседании кафедры СЭиТ 01.07. 2021 г., протокол № 05

Методические указания составлены на основе ФГОС ВО по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», утвержденного приказом Минобрнауки РФ 03.09.2015 № 955, учебного плана в составе ОПОП по направлению подготовки/специальности 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электроснабжение».

Процесс изучения дисциплины «Электроэнергетика» направлен на формирование элементов следующих компетенций в соответствии с ФГОС ВО: ОПК-2. Способность применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении профессиональных задач. ПК-5. Готовность определять параметры оборудования объектов профессиональной деятельности

В результате изучения дисциплины студент должен:

Знать: способы производства электроэнергии; методы расчета электрических нагрузок; общие сведения об электрических станциях, подстанциях и ЛЭП; показатели качества электроэнергии и способы его обеспечения; компенсацию реактивной мощности.

Уметь: выполнять выбор основного электрооборудования РУ предприятий и подстанций и обосновывать его; производить расчет электрических нагрузок предприятия; выполнять расчет режимов работы электрических сетей предприятия; выполнять чертежи принципиальных электрических схем объектов профессиональной деятельности.

Владеть: методиками расчета электрических нагрузок предприятия; навыками построения схем и чертежей объектов профессиональной деятельности; анализом результатов, получаемых в результате расчета режимов работы предприятия.

## **ОГЛАВЛЕНИЕ**

1 .ВВЕДЕНИЕ	4
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ	5
3. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	18

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач практических занятий является закрепление у студентов знаний теоретического курса. Кроме того, решение практических задач помогает лучше понять и представить физические процессы, происходящие в электрических сетях при передаче и распределении электроэнергии. В методических указаниях приведены типичные задачи, возникающие при расчётах, анализе работы и проектировании сетей промышленных предприятий.

# МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

## Тема 1. Графики электрических нагрузок

**Пример 1.** Определить режим работы электроприемника, график нагрузки которого, приведен на рисунке 1.

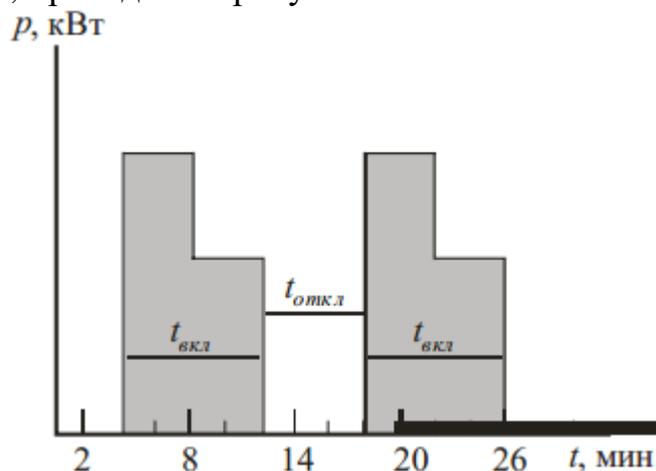


Рисунок 1 – График нагрузки электроприемника

### Решение.

Из графика нагрузки видно, что периоды работы электроприемника чередуются с паузами. Время цикла составляет:

$$t_{\text{цикл}} = t_{\text{вкл}} + t_{\text{откл}}$$
$$t_{\text{цикл}} = 8 + 6 = 14 \text{ мин.}$$

При длительности цикла  $t_{\text{цикл}} > 10$  минут режим работы электроприемника считается продолжительным.

**Пример 2.** Для электроприемника, график нагрузки которого приведен на рисунке 1, определить коэффициент включения и загрузки, если коэффициент использования равен 0,25.

### Решение.

1. Коэффициент включения – это отношение продолжительности включения приемника в цикле ко всей продолжительности цикла. По графику нагрузки  $t_{\text{вкл}} = 8$  мин.,  $t_{\text{цикл}} = 14$  мин., то есть

$$K_{\text{вкл}} = t_{\text{вкл}} / t_{\text{цикл}}$$

$$K_{\text{вкл}} = 8 / 14 = 0.57$$

2. Коэффициент загрузки – это отношение фактически потребленной приемником активной мощности за время включения в течение цикла к его номинальной мощности. Если принять, что фактически потребленная за время включения мощность равна средней, то:

$$K_{\text{загр}} = P_{\text{фак}} / P_{\text{ном}} = P_{\text{ср.вкл}} / P_{\text{ном}} = 1 / P_{\text{ном}} * 1 / t_{\text{вкл}}$$

$$\int P dt_{\text{вцикл}} = (P_{\text{ср.}} / P_{\text{ном}}) * (t_{\text{цикл}} / t_{\text{вкл}}) = K_{\text{и}} / K_{\text{вкл}}$$

$$K_{\text{загр}}=0.25 / 0.57=0.44$$

Коэффициент загрузки и включения непосредственно связаны с технологическим процессом и изменяются с изменением режима работы электроприемника.

## Тема 2. Методы расчета электрических нагрузок

**Пример 1.** Определить активную электрическую нагрузку группы из трех электроприемников длительного режима работы со следующими данными:

- а) электродвигатель фрезерного станка 15 кВт,  $K_{\text{и}} = 0,2$ ;
- б) электродвигатель вентилятора 10 кВт,  $K_{\text{и}} = 0,7$ ;
- в) электродвигатель токарного станка 7,5 кВт,  $K_{\text{и}} = 0,17$ .

**Решение.**

Общая номинальная (установленная) мощность:

$$P_{\text{ном.}} = \sum_{i=1}^n p_{\text{ном.}i}$$

$$P_{\text{ном.}} = 15 + 10 + 7,5 = 32,5 \text{ кВт}$$

Средняя активная мощность за наиболее загруженную смену:

$$P_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n k_{\text{и}} \cdot p_{\text{ном.}i}$$

$$P_{\text{см}} = 0,2 \cdot 15 + 0,7 \cdot 10 + 0,17 \cdot 7,5 = 11 \text{ кВт}$$

Для трех и менее электроприемников в группе максимальная расчетная нагрузка равна

$$P_{\text{м.}} = \sum_{i=1}^{n \leq 3} p_{\text{ном.}i}$$

Т.е для рассматриваемой группы  $P_{\text{м}} = 32,5 \text{ кВт}$

**Пример 2.** Определить эффективное число электроприемников для группы ЭП длительного режима работы следующих номинальных мощностей: 10 по 0,6 кВт, 5 по 4,5 кВт, 6 по 7 кВт, 5 по 10 кВт и 2 по 14 кВт. Групповой коэффициент использования  $K_{\text{и}} = 0,5$ .

**Решение.**

Проверяем возможность принять в расчете  $n_{\text{эф}} = n$ . Определяем значение показателя силовой сборки в группе.

Десять наименьших электроприемников по 0,6 кВт могут быть исключены, т.к их суммарная мощность 6 кВт меньше 5 % общей суммарной номинальной мощности приемников всей группы ( $P_{\text{ном}} = 148,5 \text{ кВт}$ ). Тогда наибольшим по мощности в группе будет приемник 14 кВт, наименьшим 4,5 кВт. Следовательно:

$$m = P_{\text{ном.max}} / P_{\text{ном.min}}$$

$$m = 14 / 4,5 \approx 3$$

При  $m = 3$ , и  $K_{и} = 0,5$  значение  $n_{эф}$  может быть принято  $n$ , что без учета исключенных приемников составляет:  $n_{эф} = 28 - 10 = 18$

Сравним полученный результат, воспользовавшись следующим соотношением:

$$n_{эф} = \frac{(\sum P_{ном.i})^2}{\sum P_{ном.i}^2}$$

$$n_{эф} = \frac{(10 \cdot 0,6 + 5 \cdot 4,5 + 6 \cdot 7 + 5 \cdot 10 + 2 \cdot 14)^2}{10 \cdot 0,6^2 + 5 \cdot 4,5^2 + 6 \cdot 7^2 + 5 \cdot 10^2 + 2 \cdot 14^2} = \frac{148,5^2}{1290,8} = 17$$

**Пример 3.** Определить эффективное число электроприемников для группы приемников длительного режима работы следующих номинальных мощностей: 4 по 20 кВт, 5 по 14 кВт, 6 по 7 кВт, 6 по 10 кВт, 5 по 7 кВт, 4 по 4,5 кВт, 5 по 2,8 кВт и 20 по 1 кВт. Групповой коэффициент использования  $K_{и} = 0,4$ .

**Решение.**

Определяем величины  $n$  и  $m$ :

$$n = 4 + 5 + 6 + 5 + 4 + 5 + 20 = 49$$

$$m = P_{ном.max} / P_{ном.min} = 20 / 1 = 20$$

Следовательно, эффективное число ЭП не может быть принято равным фактическому числу приемников, т.к.  $m > 3$ .

При  $m > 3$  и  $K_{и} = 0,4$  воспользуемся выражением:

$$n_{эф} = 2 \sum P_{ном.i} / P_{ном.max}$$

$$n_{эф} = 2 \cdot 297 / 20 = 30$$

Сравним полученный результат, воспользовавшись следующим соотношением:

$$n_{эф} = \frac{(\sum P_{ном.i})^2}{\sum P_{ном.i}^2}$$

$$n_{эф} = \frac{(4 \cdot 20 + 5 \cdot 14 + 6 \cdot 10 + 5 \cdot 7 + 4 \cdot 4,5 + 5 \cdot 2,8 + 20 \cdot 1)^2}{4 \cdot 20^2 + 5 \cdot 14^2 + 6 \cdot 10^2 + 5 \cdot 7^2 + 4 \cdot 4,5^2 + 5 \cdot 2,8^2 + 20 \cdot 1^2} = \frac{297^2}{3485} = 25$$

**Пример 4.** Определить полную расчетную нагрузку механического цеха машиностроительного завода. Удельная расчетная нагрузка цеха 0,3 кВА/м<sup>2</sup>, площадь цеха 13000 м<sup>2</sup>.

**Решение.**

Расчетная нагрузка определяется по соотношению:

$$S_{расч} = p_0 \cdot F$$

$$S_{расч} = 0,3 \cdot 13000 = 3900 \text{ кВА}$$

**Пример 5.** Определить расчетную нагрузку алюминиевого завода производительностью 100 000 т алюминия в год. Удельный расход электроэнергии на переменном напряжении на производство алюминия составляет

18000 кВт/ч, расход на остальные нужды завода – 5 % от годового расхода на электролиз. Число часов использования максимума нагрузки составляет 8300 ч.

**Решение.**

Годовой расход электроэнергии на электролиз:

$$W_{a'} = W_{a \text{ уд}} \cdot M$$

$$W_{a'} = 18000 \cdot 100000 = 1800 \cdot 10^6 \text{ кВт.ч.}$$

Расход на иные нужды завода:

$$W_{a''} = 0,05 \cdot W_{a'}$$

$$W_{a''} = 0,05 \cdot 18000 \cdot 10^6 \text{ кВт.ч.}$$

Общий расход электроэнергии:

$$W_a = W_{a'} + W_{a''}$$

$$W_a = 18000 \cdot 10^6 + 90 \cdot 10^6 = 1890 \cdot 10^6 \text{ кВт.ч.}$$

Расчетная нагрузка завода:

$$P_{\text{расч}} = W_a / T_m$$

$$P_{\text{расч}} = \frac{1890 \cdot 10^6}{8300} = 227711 \text{ кВт} \approx 230 \text{ МВт.}$$

**Пример 5.** Определить расчетные нагрузки на питающих магистралях и на стороне низкого напряжения трансформаторной подстанции цеха методом коэффициента максимума.

Номинальные мощности станков, вентиляторов и другого оборудования участка механического цеха показаны на рис. 1. На этом же рисунке приведена группировка электрических нагрузок по узлам схемы электроснабжения цеха (показан распределительный шинопровод ШРА-1 с подключенными к нему электроприемниками). Вся силовая сеть выполнена проводом АПВ в пластмассовых трубах, пусковая аппаратура, поставляемая комплектно с технологическим оборудованием не показана. Проведем расчет группы электроприемников, присоединенных к ШРА-1. Все электроприемники, представленные на рис. 1, целесообразно разбить на две группы:

группа А-электроприемники с повторно-кратковременным режимом работы (ПКР) (станки, трансформаторы, выпрямители, краны, тележки);

группа Б-электроприемники с продолжительным режимом работы (вентиляторы).

**Решение.** Результаты расчета средних нагрузок, показанные в графах 4, 8, 9, табл. 1, получены суммированием.

**Шинопровод ШРА-1. Группа А.** Коэффициент использования (средневзвешенный) находится следующим образом:

$$K_{\text{и}} = \frac{P_{\text{см}}}{P_{\text{ном}}} = \frac{186}{1121} = 0,17,$$

Средневзвешенный

$$\text{tg } \varphi = \frac{Q_{\text{см}}}{P_{\text{ном}}} = \frac{237}{186} = 1,27,$$

соответственно  $\cos \varphi = 0,62$ -до компенсации реактивной мощности.

$$m = \frac{P_{\text{ном max}}}{P_{\text{ном min}}} = \frac{190,4}{2,5} = 76 > 3;$$

так как  $m > 3$  и  $K_{\text{и}} < 0,2$ , то определяем относительное эффективное число ЭП

$$n_* = \frac{n_1}{n} = \frac{6}{29} = 0,2; P_* = \frac{P_{\text{ном1}}}{P_{\text{ном}}} = \frac{919,9}{1121} = 0,82, \quad \text{где}$$

$n_1$  – число наибольших электроприемников в группе, каждый из которых имеет мощность не менее половины наибольшего по мощности ЭП данной группы  $P_{\text{ном max}}$ ;

$P_{\text{ном1}}$  – суммарная номинальная мощность этих

$n_1$  электроприемников, кВт

$P_{\text{ном}}$  – суммарная номинальная мощность всей группы  $n$  приемников, кВт.

По табл. 2.2 [1]  $n_{\text{э}*} = 0,28$ .

В этом случае эффективное число ЭП определяется так

$$n_{\text{э}} = n_{\text{э}*} \cdot n = 8.$$

По табл. 2.3 [1] при  $n_{\text{э}} = 8$  и  $K_{\text{и}} = 0,17$  определяем  $K_{\text{м}} = 2,2$ .

$$P_{\text{р}} = K_{\text{м}} \cdot P_{\text{см}} = 2,2 \cdot 186,07 = 409,2 \text{ кВт},$$

$$Q_{\text{р}} = K'_{\text{м}} \cdot Q_{\text{см}} = 1,1 \cdot 237 = 260,7 \text{ кВар},$$

При  $K_{\text{и}} < 0,2$  и  $n_{\text{э}} \leq 100$ , а так же при  $K_{\text{и}} \geq 0,2$  и  $n_{\text{э}} \leq 10$  коэффициент  $K'_{\text{м}} = 1,1$ .

Во всех остальных случаях можно принять  $K'_{\text{м}} = 1$ .

С учетом компенсации реактивной мощности (предварительно) примем, что после компенсации суммарная реактивная мощность рассматриваемого узла (шинопровода ШРА-1) будет  $Q'_{\text{р}} = 130$  квар.

Отдельно подсчитываем расчетные нагрузки по группе Б и вносим их значения  $P_{\text{р}}$  и  $Q_{\text{р}}$  в табл. 1.

Определяем (с учетом предварительной компенсации) полную расчетную мощность шинопровода ШРА-1

$$S_{\text{р}} = \sqrt{P_{\text{р}}^2 + Q_{\text{р}}^2} = \sqrt{418,8^2 + 130^2} = 440 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Расчетный ток

$$I_{\text{р}} = \frac{S_{\text{р}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{440}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 660 \text{ А}.$$

Расчет нагрузок шинопроводов ШРА-2, ШРА-3, ШРА-4, ШРА-5, ШРА-6 и ШРА-7 аналогичен расчету нагрузок шинопровода ШРА-1. Поэтому в табл. 1 для шинопроводов ШРА-2–ШРА-7 показаны только итоговые значения расчетных величин.

Определим расчетные нагрузки на выводе низкого напряжения 0,38 кВ трансформаторной подстанции КТП-1, т. е. в начале магистрали 1М-1.

Определяем коэффициент использования

$$K_{\text{и}} = \frac{944,9}{4373,6} = 0,21,$$

Так как  $m > 3$  и  $K_{\text{и}} > 0,2$ , то определяем относительное эффективное число ЭП

$$n_{\text{э}} = \frac{2 \cdot 4373,6}{190,4} = 46.$$

По табл. 2.3 [1] при  $n_{\text{э}} = 46$  и  $K_{\text{и}} = 0,21$  определяем  $K_{\text{м}} = 1,22$ .

$$P_{\text{р}} = 1,22 \cdot 944,9 = 1159 \text{ кВт},$$

$$Q_{\text{р}} = 1,1 \cdot 1444 = 1588 \text{ квар.}$$

После компенсации  $Q'_{\text{р}} = 400 \text{ квар.}$

Полная расчетная мощность

$$S_{\text{р}} = \sqrt{1159^2 + 400^2} = 1180 \text{ кВ} \cdot \text{А.}$$

$$I_{\text{р}} = \frac{1180}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 1790 \text{ А.}$$

Вносим полученные данные в табл. 1.

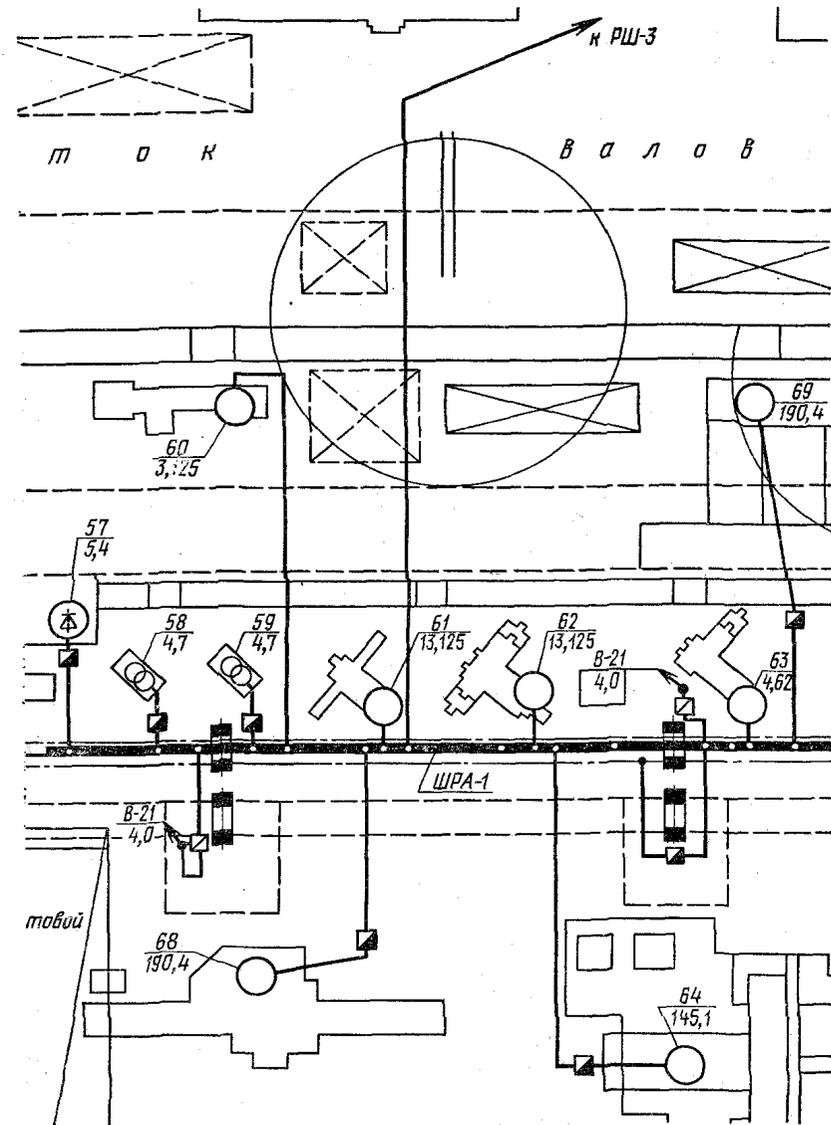
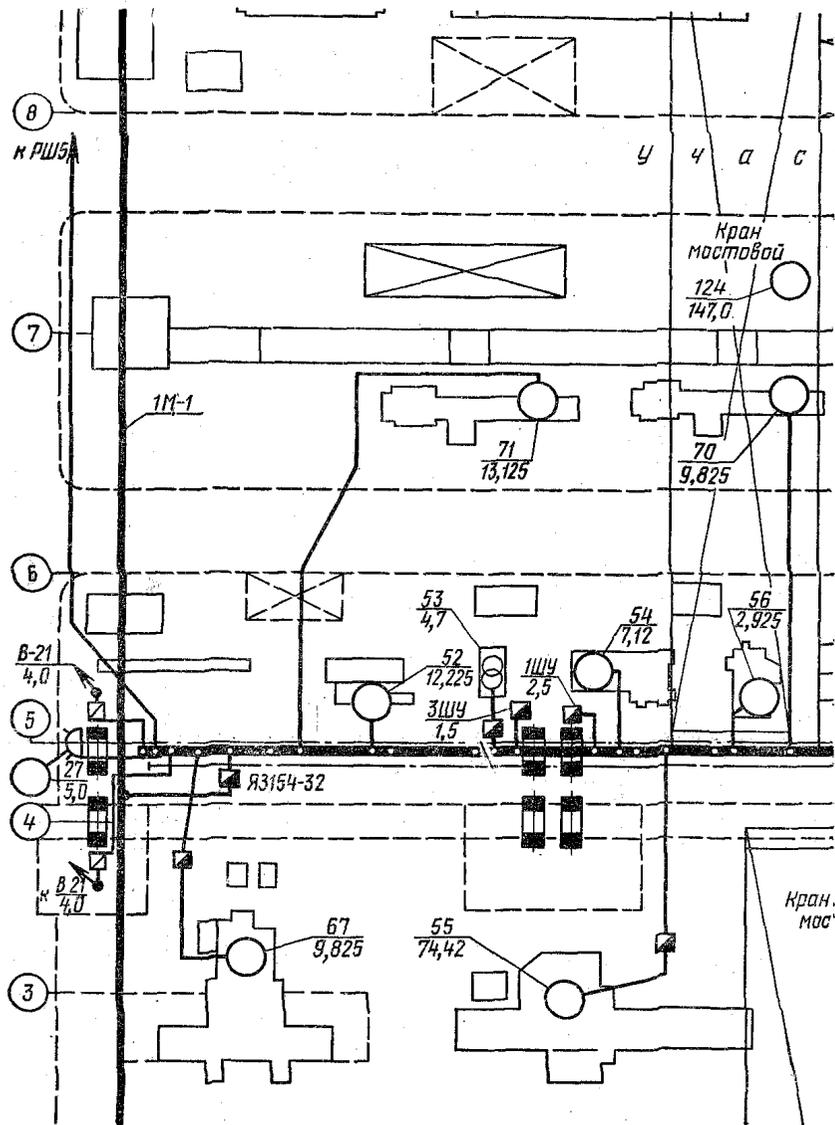


Рис. 1 Схема внутрицехового электроснабжения

Таблица 1

Питающие магистрали и группы ЭП	$n$	Установленная мощность приведенная к ПВ=100%		$m$	Коэффициент	$\cos\varphi / \text{tg}\varphi$ до компенсац	Средняя нагрузка за наиболее загруженную смену		$n_{\text{э}}$	$K_{\text{М}}$	Расчетная нагрузка (30-минутный максимум)				$I_{\text{р}}, \text{А}$
		Пределы номинальных мощностей ЭП в группе	Суммарная мощность $P_{\text{НОМ}}$ , кВт				$P_{\text{см}} = K_{\text{н}} \cdot P_{\text{НОМ}}$ , кВт	до компенсации $Q_{\text{см}} = P_{\text{см}} \cdot \text{tg}\varphi$ , квар			$P_{\text{р}} = K_{\text{м}} \cdot P_{\text{см}}$ , кВт	до компенсации $Q_{\text{р}} \approx Q_{\text{см}}$ , квар	после компенсации $Q'_{\text{р}}$ , квар	$S_{\text{р}}, \text{кВ} \cdot \text{А}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
<b>Шинопровод ШРА-1</b>															
<b>Группа А</b>															
Станки мелкие № 67, 71, 52, 54, 56, 70, 61, 62, 63, 60 и РШ-5	15	3,125 – 13,125	98,2	–	0,13	0,5/1,73	12,7 7	22,0 8	–	–	–	–	–	–	
Станки крупные № 55, 68, 64, 69 и в РШ-3	6	74,42 – 190,4	847,3	–	0,17	0,65/1,1 8	144, 0	169, 9	–	–	–	–	–	–	
Краны и тележки № 124 и 27	2	5,0 – 147	152,0	–	0,1	0,5/1,73			–	–	–	–	–	–	
	6	2,5 – 4,7	23,5	–	0,3	0,6/1,33	15,2	26,3	–	–	–	–	–	–	
<b>Выпрямители и трансформаторы № 53, 57, 58, 59, 1ШУ, 3ШУ</b>							14,1	18,7							
Итого по группе А	29	2,5 – 190,4	1121	76	0,17	0,62/1,2 7	186, 1	237, 0	8	2,2	409, 2	260,7/130	–	–	
<b>Группа Б</b>															
Вентиляторы В-21	4	4,0	16	–	0,6	0,8/0,75	9,6	7,2	–	1	9,6	7,2	–	–	

Итого по ШРА-1	33	2,5 – 190,7	1137	76			195,	244,			418,	267,9/130	440	660
Шинопровод ШРА-2	24	4 – 58	440	14,5	0,178	0,53/1,6	7	2	16	1,6	8	138/58	138	208
Шинопровод ШРА-3	44	7– 48	748	6,8	0,24	0,54/1,5	78,5	125,	17	1,45	126	290/65	270	412
Шинопровод ШРА-4	13	4,5 – 72	246,4	16	0,2	6	180	8	3	2,7	260	100/25	142	216
Шинопровод ШРА-5	11	7 – 108	515	15,4	0,16	0,5/1,73	49,3	282	3	3,16	136	156/46	270	410
Шинопровод ШРА-6	49	5 – 65	530	13	0,38	0,5/1,73	82,4	86	12	1,26	263	195/45	256	390
Шинопровод ШРА-7	34	3,2 – 72	757,2	22,5	0,21	0,75/0,8	200	141	13	1,75	253	280/55	284	430
						9	159	178			278			
						0,52/1,6		258						
						2								

### Тема 3. Расчет токов короткого замыкания в сетях электроснабжения промышленных предприятий

**Пример 1.** Для схемы, приведенной на рис. 1 определить токи при трехфазном, двухфазном и однофазном к.з. в т. К-1. Для трехфазного к.з. определить максимальное и минимальное значение тока к.з.

Система С:  $S_K=200$  МВ·А,  $U_{\text{ср. ВН}}=6$  кВ.

Трансформатор Т:ТС=1000/6,  $S_H=1000$  кВ·А,  $U_{\text{ВН}}=6,3$  кВ,  $U_{\text{НН}}=0,4$  кВ,  $P_K=11,2$  кВт,  $U_K=5,5\%$ .

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

Шинопровод ШМА4-1600 Ш:  $r_{\text{ш}}=0,14$  мОм/м;  $x_{\text{ш}}=0,14$  мОм/м;  $r_{\text{шп}}=0,14$  мОм/м;  $x_{\text{шп}}=0,14$  мОм/м;  $l=10$  м.

Болтовые контактные соединения:  $r_k=0,003$  мОм;  $n=4$ .

**Решение.** Расчет параметров схемы замещения.

Параметры схемы замещения прямой последовательности.

Сопротивление системы

$$x_c = \frac{U_{\text{ст.НН}}^2}{S_K} \cdot 10^{-3} = \frac{400^2}{200} \cdot 10^{-3} = 0,8 \text{ мОм.}$$

Активное и индуктивное сопротивления трансформатора

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

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

Активное и индуктивное сопротивления шинпровода

$$R_{\text{ш}} = r_{\text{ш}} \cdot \frac{X}{R} = 0,03 \cdot 10 = 0,3 \text{ мОм,}$$

$$x_{\text{ш}} = x_{\text{ш}} \cdot \frac{X}{R} = 0,014 \cdot 10 = 0,14 \text{ мОм.}$$

Активное сопротивление болтовых соединений

$$R_k = r_k \cdot \frac{X}{R} = 0,003 \cdot 4 = 0,012 \text{ мОм.}$$

Активное сопротивление дуги

$$r_d = 5,6 \text{ мОм.}$$

Параметры схемы замещения нулевой последовательности

$$r_{от} = 19,1 \text{ МОм}; x_{от} = 60,6 \text{ МОм};$$

$$r_{нп} = r_{нп} \cdot \frac{X}{R} = 0,037 \cdot 10 = 0,37 \text{ МОм};$$

$$x_{нп} = x_{нп} \cdot \frac{X}{R} = 0,042 \cdot 10 = 0,4 \text{ МОм}.$$

Расчет токов трехфазного к.з.

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

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

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

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

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

$$i_{\text{уд. max}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{ПО max}} \cdot K_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot 23,3 \cdot 1,45 = 47,84 \text{ кА};$$

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

где  $K_{\text{уд}}$  определяют по кривой рис. 12 [1].

$$i_{\text{ао. max}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{ПО max}} = \sqrt{2} \cdot 23,3 = 32,9 \text{ кА};$$

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

Расчет токов однофазного к.з.

$$r_{о\Sigma} = r_{от} + r_{ош} + r_{кв} + r_K = r_{от} + r_{1ш} + 3 \cdot r_{нп} + r_{кв} + r_K =$$

$$= 19,1 + 0,3 + 3 \cdot 0,37 + 0,14 + 0,012 = 20,66 \text{ МОм};$$

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

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

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

Ток однофазного к.з. с учетом активного сопротивления дуги

$$I_{\text{ПО}}^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400}{\sqrt{(2 \cdot (2,24 + 5,6) + 29,26)^2 + (2 \cdot 9,64 + 62,08)^2}} = 7,46 \text{ кА}.$$

Расчет токов однофазного к.з.

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

Ток двухфазного к.з. с учетом активного сопротивления дуги

$$I_{\text{ПО}}^{(2)} = \frac{400}{2 \cdot \sqrt{\left(2,24 + \frac{5,6}{2}\right)^2 + 9,64^2}} = 18,39 \text{ кА.}$$

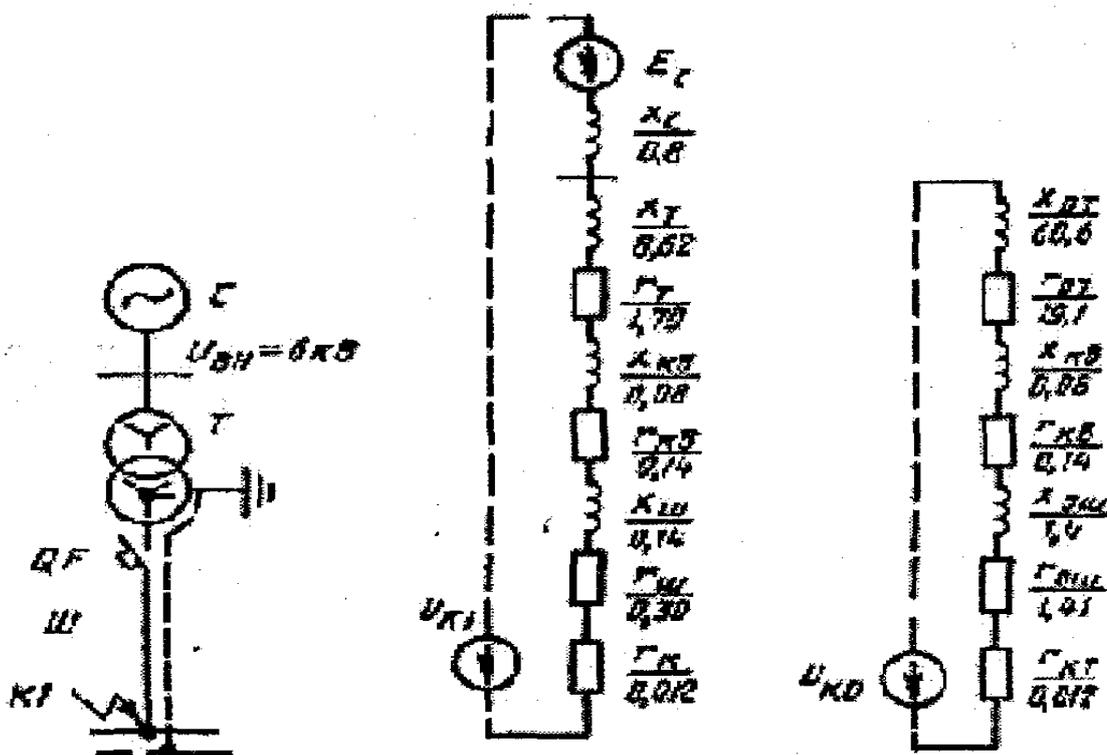


Рис. 1 Исследуемая система и схема замещения исследуемой системы

#### Тема 4. Выбор отдельных видов проводников и аппаратов напряжением до и выше 1 кВ.

**Пример1.** Провести расчет и выбор проводника для привода станка.

Проведем расчет и выбор проводов для двигателей станков.  $P_{\text{ном}}=4,2$  кВт – мощность электропривода станков;  $\cos\varphi_{\text{н}}=1$ ;  $\eta=0,5$ ;  $U_{\text{х}}=105\%$  - напряжение холостого хода на зажимах вторичной обмотки трансформатора КТП;  $\Delta P_{\text{к}}=7,6\%$  - потери короткого замыкания;  $U_{\text{к}}=5,5\%$  - напряжение короткого замыкания;  $\cos\varphi=0,7$ ;  $\Delta U_{\text{с}}=6,02\%$  - потеря напряжения в сети;  $K_{\text{з}}=0,76$  – коэффициент загрузки трансформатора.

**Решение.**

Распределительная сеть выполнена проводами марки АПВ в трубах. Расчетный ток электроприемника

$$I_{\text{р}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi \cdot \eta} = \frac{4,2}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 1 \cdot 0,5} = 20,4 \text{ А.}$$

Принимаем провод АПВ сечением  $4 \text{ мм}^2$ .

Определим активную составляющую напряжения короткого замыкания

$$U_{\text{а}} = \frac{\Delta P_{\text{к}}}{S_{\text{н}}} \cdot 100 = \frac{7,6}{1000} \cdot 100 = 0,76\%.$$

Определим реактивную составляющую напряжения короткого замыкания

$$U_{\text{р}} = \sqrt{U_{\text{к}}^2 - U_{\text{а}}^2} = \sqrt{5,5^2 - 0,76^2} = 5,44\%.$$

Определим потерю напряжения в трансформаторе КТП

$$\Delta U_{\text{т}} = K_{\text{з}} \left( U_{\text{а}} \cdot \cos\varphi + U_{\text{р}} \cdot \sin\varphi \right) = 0,76(0,76 \cdot 0,7 + 5,44 \cdot 0,71) = 3,34\%.$$

Напряжение на зажимах наиболее удаленного от КТП электроприемника

$$U_{\text{дв}} = U_{\text{х}} - \Delta U_{\text{т}} - \Delta U_{\text{с}} = 105 - 3,34 - 6,02 = 96,05\%.$$

Напряжение на зажимах наиболее удаленного станка находится в допустимых пределах.

**Пример2.** Выбрать сечение кабеля по экономической плотности тока по следующим условиям.

Подстанция промышленного предприятия питается по кабельной линии напряжением 10 кВ. Для прокладки в земле принят бронированный кабель с бумажно-масляной изоляцией и алюминиевыми жилами. Максимальная токовая нагрузка  $I_{\text{р}} = 45$  А. Расчетная продолжительность использования максимальной нагрузки  $T_{\text{max}} = 4500$  час.

**Решение.** В ПУЭ находим, что для указанного кабеля и расчетной продолжительности использования максимальной нагрузки экономическая плотность тока составляет  $J_{\text{эк}} = 1,4$  А/мм<sup>2</sup>. Экономическое сечение кабеля определим по формуле

$$F_{\text{эк}} = I_{\text{р}} / J_{\text{эк}} = 45 / 1,4 = 31,5 \text{ мм}^2$$

Округляем полученный результат до ближайшего стандартного сечения  $35 \text{ мм}^2$ . Выбранное сечение следует проверить по нагреву.

## Тема 5. Выбор количества и мощности трансформаторов на подстанциях в зависимости от категории надежности электроснабжения потребителя.

**Пример 1.** Выбрать число и мощность трансформаторов на ГПП завода.

$P_{\text{ср}}$  предприятия за максимально загруженную смену  $P_{\text{см}} = 60$  МВт,  $\cos \varphi = 0,92$ . Максимальная расчетная мощность завода  $P_{\text{р}} = 70$  МВт. Электроприемники I и II категории потребляют 83% мощности предприятия. Суммарное время максимальной расчетной нагрузки  $t_2 = 4$  ч. Температура охлаждающей среды  $\theta_{\text{охл}} = 10^\circ \text{C}$ .

**Решение.**

На заводе есть потребители I категории, поэтому выбираем на подстанции два трансформатора. По табл. 4.6. [1] примем рекомендуемый коэффициент загрузки  $K_{\text{зар}} = 0,7$ . Определим мощность трансформатора

$$S_{\text{рек}} = P_{\text{рас}} / (n * K_{\text{зар}}) = P_{\text{см}} / (n * \cos \varphi * K_{\text{зар}})$$

$$S_{\text{рек}} = 60 / (2 * 0,92 * 0,7) = 46,5 \text{ МВА}$$

Выбираем два трансформатора мощностью 40 МВА с охлаждением М В период загрузки трансформатора расчетной максимальной мощностью

$$S_{\text{т}} = 70 / (2 * 0,92 * 0,7) = 54,2 \text{ МВА}$$

Мощность электроприемников I и II категории составляет в максимально загруженную смену и в период максимальной мощности завода

$$P_{\text{см I,II}} = 60 * 0,83 = 50 \text{ МВт}$$

$$P_{\text{р I,II}} = 70 * 0,83 = 58,1 \text{ МВт}$$

В нормальном режиме при  $t_2 = 4$  ч по табл. 4.8. [1] определим максимальную систематическую загрузку  $K_{\text{зар2}} = 1,39$ . Загрузка трансформатора расчетной максимальной мощностью в нормальном режиме составит

$$K_{\text{т нор}} = 54,2 / 40 = 1,36 < 1,39$$

При аварийном выходе из строя одного трансформатора и при отключении нагрузок III категории

$$K_{\text{т ав}} = 58,1 / (40 * 0,92) = 1,58$$

По табл. 4.8. [1] аварийная перегрузка при  $t_2 = 4$  ч составляет  $K_{\text{ав}} = 1,6 > 1,58$ , следовательно мощность трансформаторов выбрана правильно.

Тема 6. Размещение, определение мощности и выбор типа КУ в электрических сетях промышленных предприятий.

**Пример1.** Провести расчет и выбор ЦТП и компенсирующих устройств.

Принимаем для ЭП II категории установку двухтрансформаторной подстанции.  $P_{см}=637,9$  кВт – суммарная среднесменная мощность по КТП;  $N=2$  – количество трансформаторов на КТП;  $K_3=0,7$  – коэффициент загрузки трансформаторов;  $P_p=769,9$  кВт – расчетная активная мощность в целом на КТП;  $P_{p1}=393,9$  кВт,  $P_{p2}=415,0$  кВт – расчетная активная нагрузка соответственно на первой и второй секциях шин;  $Q_{p1}=317,7$  квар,  $Q_{p2}=306,8$  квар – расчетная реактивная нагрузка соответственно на первой и второй секциях шин.

**Решение.**

Мощность одного трансформатора при условии полной компенсации реактивной мощности

$$S_{н.т} \geq \frac{P_{см}}{N \cdot K_3} = \frac{637,9}{2 \cdot 0,7} = 455,6 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Для установки выбираем трансформаторы ТМЗ-630/6 со схемой соединения обмоток звезда-звезда с глухим присоединением нейтрали.

Предварительная проверка по допустимой перегрузке выбранных трансформаторов осуществляется по соотношению

$$1,3 \cdot S_{ном} \geq P_p = 1,3 \cdot 630 = 819,0 \text{ кВт} \geq 769,9 \text{ кВт}.$$

Условие по допустимой перегрузке выбранных трансформаторов выполняется.

Действительный коэффициент загрузки трансформаторов при условии полной компенсации реактивной мощности

$$K_{з.д} \geq \frac{P_p}{N \cdot S_{н.т}} = \frac{769,9}{2 \cdot 630} = 0,61.$$

### Компенсация реактивной мощности

Для первой секции шин

$$Q_1 = \sqrt{(K_3 \cdot S_{н.т})^2 + P_p^2} = \sqrt{(0,7 \cdot 630)^2 + 393,9^2} = 198,2 \text{ квар},$$

$$Q_{ку.тр1} = Q_p - Q_1 = 317,7 - 198,2 = 119,5 \text{ квар},$$

$$Q_{ку.тр2} = Q_p - P_p \cdot \text{tg} \varphi_3 = 317,7 - 393,9 \cdot 0,3 = 199,5 \text{ квар}.$$

Таким образом, на первой секции шин устанавливается регулируемая конденсаторная установка КРМ-0,4-200 мощностью 200 квар.

Для второй секции шин

$$Q_1 = \sqrt{(K_3 \cdot S_{н.т})^2 + P_p^2} = \sqrt{(0,7 \cdot 630)^2 + 415,0^2} = 149,2 \text{ квар},$$

$$Q_{\text{ку.тр1}} = Q_p - Q_1 = 306,8 - 149,2 = 119,5 \text{ квар},$$

$$Q_{\text{ку.тр2}} = Q_p - P_p \cdot \text{tg} \varphi_3 = 306,8 - 415,0 \cdot 0,3 = 182,3 \text{ квар}.$$

Таким образом, на второй секции шин устанавливается регулируемая конденсаторная установка КРМ-0,4-200 мощностью 200 квар.

Полная расчетная мощность с учетом компенсации

Для первой секции шин

$$S'_p = \sqrt{P_p^2 + (Q_p - Q_{\text{ку}})^2} = \sqrt{393,9^2 + (317,7 - 200)^2} = 411,1 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Для второй секции шин

$$S'_p = \sqrt{P_p^2 + (Q_p - Q_{\text{ку}})^2} = \sqrt{415,0^2 + (306,8 - 200)^2} = 428,5 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Суммарная полная мощность по КТП

$$\begin{aligned} S'_p &= \sqrt{(P_{p1} + P_{p2})^2 + (Q_{p1} + Q_{p2} - \sum Q_{\text{ку}})^2} = \\ &= \sqrt{(393,9 + 415,0)^2 + (317,7 + 306,8 - 2 \cdot 200)^2} = 839,5 \text{ кВ} \cdot \text{А}. \end{aligned}$$

Действительные коэффициенты трансформации после компенсации реактивной мощности

Для первой секции шин

$$K_{з.д} \geq \frac{S'_p}{S_{н.т}} = \frac{411,1}{630} = 0,65.$$

Для второй секции шин

$$K_{з.д} \geq \frac{S'_p}{S_{н.т}} = \frac{428,5}{630} = 0,68.$$

Проверка по допустимой перегрузке трансформаторов КТП после компенсации реактивной мощности

$$1,3 \cdot S_{н.т} \geq S'_{p\Sigma} = 1,3 \cdot 630 = 819,0 \text{ кВт} \leq 839,5 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Условие по допустимой перегрузке трансформаторов не выполняется. Для выполнения условия в послеаварийном режиме необходимо отключать нагрузку III категории надежности в размере 20,5 кВ·А, которая имеется среди приемников сторонней нагрузки.

## Тема 7. Расчет заземляющего устройства подстанций.

**Пример1.** Рассчитать заземляющее устройство заводской подстанции 35/10 кВ, находящейся во второй климатической зоне. Ток замыкания на землю на стороне 35 кВ  $I_z = 8\text{А}$ , на стороне 10 кВ  $I_z = 19\text{А}$ . Собственные нужды подстанции получают питание от трансформатора 10/0,4 кВ. Естественных заземлителей нет. Удельное сопротивление грунта при нормальной влажности  $\rho = 62\text{ Ом м}$ . Электрооборудование подстанции занимает площадь  $18 \times 8\text{ м}^2$ .

**Решение.** Сети 35 и 10 кВ работают с изолированной нейтралью. Трансформатор собственных нужд имеет заземленную нейтраль на стороне 0,4 кВ. Сопротивление заземляющего устройства для установок 35 кВ в любое время года должно быть

$$R_z < 250 / I_z \quad R_z = 250 / 8 = 31,2\text{ Ом} ;$$

для установок 10 кВ

$$R_z < 250 / I_z \quad R_z = 250 / 19 = 13,2\text{ Ом}$$

Сопротивление заземляющего устройства нейтрали трансформатора 0,4 кВ согласно ПУЭ должно быть не более 4 Ом. Заземляющее устройство подстанции выполняется общим для сетей 35, 10 и 0,4 кВ, поэтому последнее условие является определяющим для расчета.

Заземляющее устройство выполняем в виде контура из полосы  $40 \times 4\text{ мм}$ , проложенной на глубине 0,7 м вокруг оборудования подстанции, и стержней длиной 5 м и диаметром 12 мм на расстоянии 5 м друг от друга. Общая длина полосы по плану 60 м, предварительно намечаем количество стержней 12.

Контур заземления укладывается на расстоянии 1 м от площади, занятой оборудованием.

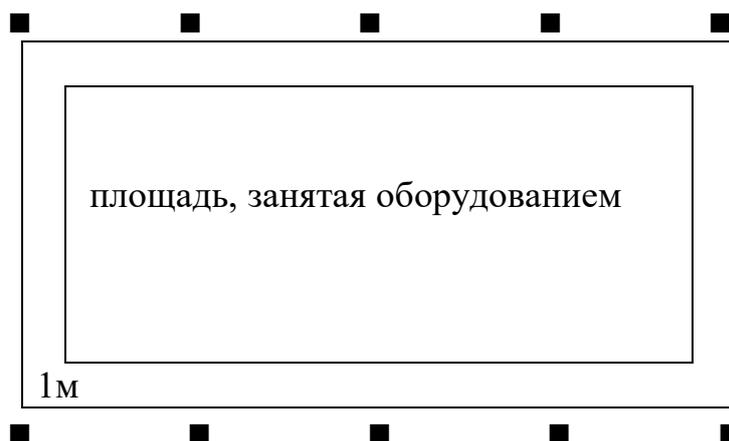


Рис 1. План заземляющего устройства.

Сопротивление одного стержня определяется

$$r_{\text{в}} = 0,27 \rho_{\text{рас}} = 0,27 * 89,9 = 24,3\text{ Ом} , \text{ где}$$

$$\rho_{\text{рас}} = K_{\text{сез}} * \rho = 1,45 * 62 = 89,9\text{ Ом}, \quad K_{\text{сез}} = 1,45 \text{ для второго}$$

климатического района

Необходимое число вертикальных заземлителей определяется

$n_{\text{в}} = r_{\text{в}} / (R_{\text{з}} * K_{\text{в}})$   $K_{\text{в}}$  - коэффициент использования вертикальных заземлителей, зависящий от расстояния между ними, их длины и числа, определяется по справочнику, для  $a/l = 1$   $n = 12$

$$n_{\text{в}} = 24,3 / (4 * 0,52) = 11,7$$

Определим сопротивление заземляющей полосы

$$r_{\Gamma} = (0,366 * \rho_{\text{рас}} / l) * \lg(2l^2 / b * t), \text{ где } \rho_{\text{рас}} = \rho_{\text{рас}} = K_{\text{сез}} * \rho$$

$K_{\text{сез}} = 3,5$  определяется по справочнику для горизонтальной полосы  
 $l$  - длина полосы,  $b$  - ширина полосы,  $t$  - глубина заложения, все величины указываются в м

$$r_{\Gamma} = (0,366 * 3,5 * 62 / 60) * \lg(2 * 60^2 / 40 * 10^{-3} * 0,7) = 8,48 \text{ Ом}$$

Сопротивление полосы в контуре из 12 электродов

$$R_{\Gamma} = r_{\Gamma} / K_{\Gamma} \quad R_{\Gamma} = 8,48 / 0,34 = 24,9 \text{ Ом}, \text{ где}$$

$K_{\Gamma}$  - определено по справочнику

Необходимое сопротивление вертикальных заземлителей найдем по

$$R_{\text{в}} = R_{\Gamma} * R_{\text{з}} / (R_{\Gamma} - R_{\text{з}}) = 24,9 * 4 / (24,9 - 4)$$

Уточним число стержней

$$n_{\text{в}}' = r_{\text{в}} / R_{\text{в}} * K_{\text{в}} \quad n_{\text{в}} = 24,3 / (4,76 * 0,52) = 9,81$$

Таким образом, окончательно принимаем  $n_{\text{в}} = 10$ , т.е. два стержня в торцах подстанции не устанавливаем (см. рис 1)

## Тема 8. Расчет защитной зоны стержневого молниеотвода

**Пример1.** Рассчитать защитную зону двойного стержневого молниеотвода высотой  $h = 10$  м и при расстоянии между молниеотводами  $a=8$  м. Защищаемое сооружение имеет высоту  $h_x = 8$  м и площадь  $s*d = 7*2$  м

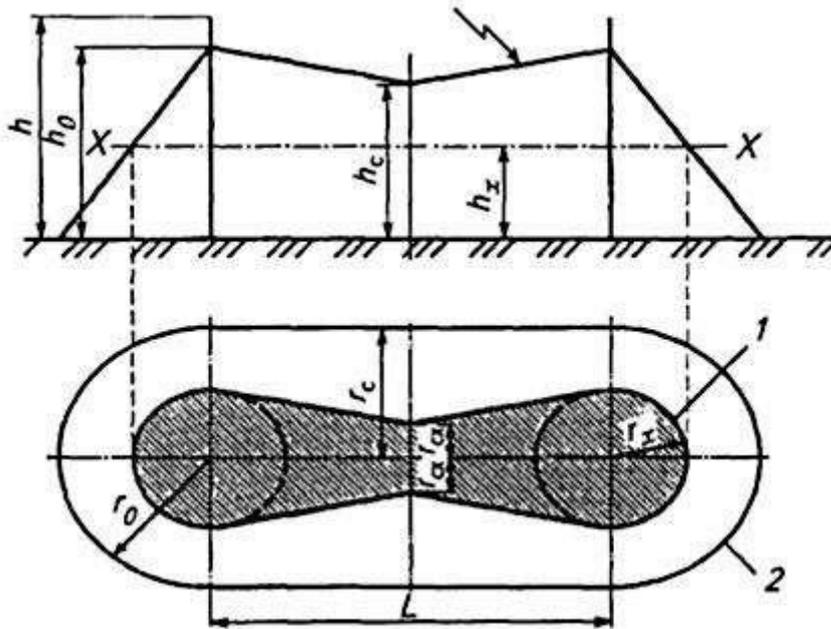


Рис1. Зона защиты двойного стержневого молниеотвода высотой до 150 м:  
1 — граница зоны защиты на высоте  $h_x$ ;  
2 — граница зоны защиты на уровне земли

**Решение.** Определим активную высоту молниеотвода

$$h_a = h - h_x = 10 - 8 = 2 \text{ м}$$

Коэффициент, учитывающих разные высоты молниеотвода

$$K_p = 5,5 / \sqrt{h} = 5,5 / \sqrt{10} = 1,7$$

Определим расстояние  $r_x$ , при котором защищаемый объект окажется внутри зоны защиты

$$r_x = 1,6 * h_a * K_p / (1 + h_x/h) = 1,6 * 2 * 1,7 / (1 + 8/10) = 3 \text{ м}$$

Определим отношения  $a/h_a = 8/2 = 4$ ,  $h_x/h = 8/10 = 0,8$ , по кривым значений наименьшей ширины зоны защиты  $b_x$  двух стержневых молниеотводов находим

$$b_x / 2 * h_a = 0,6, \text{ откуда } b_x = 0,6 * 2 * 2 = 2,4 \text{ м}$$

Перенесем найденные значения на рисунок, из него видно, что защищаемый объект находится внутри зоны защиты.

## Список рекомендуемой литературы

1. Коновалова Л. Л., Рожкова Л. Д. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Быстрицкий Г.Ф. Основы энергетики. – М.: КноРус, 2013.-278 с. ил.
3. Герасименко А.А. Передача и распределение электрической энергии. – М.: КноРус, 2015.-724 с. ил.
4. Кудрин Б.И. Электроснабжение. – М.: Академия, 2013.-672 с. ил.
5. Кудрин Б.И. Электроснабжение. – М.: Академия, 2013.-672 с. ил.
6. Шаров Ю.В. Электроэнергетика. – М.: Инфра-М, 2014.-384 с. ил.
7. Внутрицеховое электроснабжение. Учебное пособие для выполнения курсового и дипломного проектов. Киров: ВГУ, 2005.
8. Анчарова Т.В. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений: Учебник. – М.: Инфра-М, 2014. – 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. Справочник по проектированию электрических сетей и электрооборудования/ Под редакцией В.И. Круповича и др. М. Энергоиздат, 1981
12. Почаевец В.С. Электрические подстанции: Учебник. – М.: Маршрут, 2012. – 492 с. ил.
13. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий. Промышленные электрические сети / Под ред. А. А. Федорова и Г. В. Сербиновского. М.: Энергия, 1980.
14. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий. Электрооборудование и автоматизация / Под ред. А. А. Федорова и Г. В. Сербиновского. М.: Энергия, 1981.
15. Липкин Б. Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. М.: Высш. школа, 1981.
16. Фролов Ю.М., Шелякин В.П. Основы электроснабжения. – СПб.: Лань, 2013. – 432 с. ил.

