

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Электроснабжение

(направленность (профиль) / специализация)

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Проектирование системы электроснабжения группы цехов металлургического завода

Студент

В.В. Ратницын

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

д.т.н., доцент, А.А. Кувшинов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Консультант

к.п.н., доцент, А.В. Кириллова

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2021

## Аннотация

Темой ВКР является «Проектирование системы электроснабжения группы цехов металлургического завода».

В данной работе проведен расчет электрических нагрузок потребителей, расположенных на территории металлургического завода. Затем был проведен расчет освещения потребителей методом удельной мощности. На основании рассчитанных суммарных нагрузок по методу удельной плотности нагрузки были выбраны соответствующие силовые трансформаторы для их установки на комплектных трансформаторных подстанциях (КТП) завода, были определены места расположения КТП и ГПП металлургического завода. Проведен расчет и выбор компенсирующих устройств.

Далее был произведен выбор схемы электроснабжения потребителей завода. Произведен расчет и выбор кабельных линий, рассчитаны потери напряжения.

Далее, проведен расчет токов короткого замыкания (ТКЗ). На основании проведенных расчетов было выбрано электрооборудование ТП с учетом проведенных проверок на термическую и электродинамическую стойкость.

ВКР содержит 52 страницы, 20 таблиц, 9 рисунков, шесть чертежей, выполненных на форматах листа А1.

## **Abstract**

The title of the graduation work is Designing the power supply system for a group of shops at a metallurgical plant.

The graduation work consists of an introduction, seven parts, a conclusion, tables, list of references and the graphic part on 6 A1 sheets.

The aim of the work is to give some information about correct calculation and to choose suitable transformers, cables and lighting lamps according to Russian technical standards.

The key issue of the thesis is the design of power supply systems in the workshops at the metallurgical plant. We touch upon the problem of workshops choice at the metallurgical plant, as well as the problems of choosing transformers, lighting and cables.

The graduation work may be divided into several logically connected parts. The first is the selection and analysis of workshops, the second is the calculations, the third is making the conclusion and submitting the results.

Finally, we present the work on the successful analysis and correct calculations, which allow us to choose the proper transformers, lamps and cables laying, as well as grounding.

In conclusion we'd like to stress this work may help to design many metallurgical plants throughout Russia. A huge amount of experience been gained, allow to share and apply it in the future.

## Содержание

Введение.....	3
1 Расчет электрических нагрузок .....	4
2 Расчет освещения .....	11
3 Выбор числа и мощности трансформаторов.....	15
4 Расчет и выбор кабельных линий.....	22
5 Расчет ТКЗ.....	31
5.1 Расчет ТКЗ выше 1 кВ .....	31
5.1 Расчет ТКЗ ниже 1 кВ.....	36
6 Выбор оборудования трансформаторных подстанций .....	41
7 Расчет заземления и молниезащиты.....	46
Заключение .....	50
Список используемых источников.....	51

## Введение

Тема данной работы является актуальной, поскольку металлургия играет важную роль в создании показателей макроэкономики нашей страны. Металлургия относится к ведущей экспортоориентированной отрасли. Также благодаря этой отрасли, производится до 95% конструктивных материалов для ряда отраслей промышленности таких как: автомобилестроение, машиностроение и оборудование, строительство, нефтедобыча и газодобыча, трубопроизводство.

Помимо того, что к проектируемым объектам предъявляются все новые требования, при проектировании систем электроснабжения необходимо также использовать самые актуальные стандарты, нормы и правила. Все это имеет большое значение, поскольку от этого зависит надежность работы спроектированной системы электроснабжения, а также безопасность жизни и здоровья людей.

Целью данной работы является создание грамотно спроектированной, экономически выгодной, надежной и эффективной схемы электроснабжения металлургического завода. Исходя из поставленной цели был проведен анализ потребителей электроэнергии, их характеристик и параметров, проведен расчет электрических нагрузок, по которому было выбрано соответствующее современное электрооборудование. Оно было выбрано по актуальным каталогам производителей.

Для достижения поставленной цели, которая включает в себя ряд задач были проведены необходимые расчеты. Первой задачей для достижения цели являлся расчет нагрузок, который также включал расчет осветительной нагрузки. Исходя из данных нагрузок были выбраны соответствующие трансформаторы и компенсирующие устройства. Далее был проведен расчет токов КЗ, по которому было выбрано электрооборудование ТП.

## 1 Расчет электрических нагрузок

Потребителями электроэнергии металлургического завода являются:

- Кислородная станция;
- Склады;
- Компрессорная станция;
- Маляропокрасочный цех;
- Сборосварочные цеха;
- Заготовительный цех;
- Гараж;
- Кузнечнопрессовый цех;
- Теплица;
- Теплопункт;
- Заводоуправление.

Расчет проведем методом расчетных коэффициентов на основании РТМ 36.18.32.4-92. Согласно данному нормативному документу:

«Все ЭП группируются по характерным категориям с одинаковыми КИ и  $tg\phi$ . В каждой строке указываются ЭП одинаковой мощности.» [1]

«При наличии в справочных материалах интервальных значений  $k_{И}$  следует для расчета принимать наибольшее значение. Значения  $k_{И}$  должны быть определены из условия, что вероятность превышения фактической средней мощности над расчетной для характерной категории ЭП должна быть не более 0,05.» [1]

На основании найденных коэффициент использования определим групповой коэффициент использования для отдельного узла питания:

$$K_{И} = \frac{\sum K_{И} \cdot P_{Н}}{\sum P_{Н}} \quad (1)$$

Эффективное число электроприемников определим по формуле:

$$n_{\text{Э}} = \frac{(\sum P_{\text{Н}})^2}{\sum n p_{\text{Н}}^2} \quad (2)$$

При значительном числе электроприемников, эффективное число электроприемников определим по следующей формуле:

$$n_{\text{Э}} = \frac{2 \sum P_{\text{Н}}}{P_{\text{Нmax}}} \quad (3)$$

Найденное эффективное число электроприемников округлим до ближайшего меньшего целого числа.

Далее определяем коэффициент расчетной нагрузки.

«В зависимости от средневзвешенного коэффициента использования и эффективного числа электроприемников определяется согласно п. 2.11 настоящих Указаний и заносится в графу 11 коэффициент расчетной нагрузки  $K_{\text{р}}$ » [1]

Найденное значение коэффициента расчетной мощности необходимо для нахождения расчетной активной мощности.

Расчетная активная мощность:

$$P_{\text{р}} = K_{\text{р}} \sum K_{\text{и}} P_{\text{Н}}, \quad (4)$$

где  $K_{\text{р}}$  – коэффициент расчетной мощности;

$K_{\text{и}}$  – коэффициент использования;

$P_{\text{Н}}$  – номинальная мощность, кВт.

Таблица 1 – Расчет нагрузок по заводу в целом для нагрузок до 1кВ (форма Ф636-92)

№ по ГП	Наименование ЭП	n	Мощность, кВт			K <sub>И</sub>	cosφ	tgφ	Расчетные величины			n <sub>э</sub>	K <sub>Р</sub>	Расчетная мощность			Расчетный ток I <sub>Р</sub> , А
			P <sub>min</sub>	P <sub>max</sub>	P <sub>Н</sub>				K <sub>И</sub> · P <sub>Н</sub> , кВт	Q <sub>Р</sub> = P <sub>Р</sub> · tgφ, кВар	np <sup>2</sup> н			P <sub>Р</sub> , кВт	Q <sub>Р</sub> , кВар	S <sub>Р</sub> , кВА	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	Кислородная станция	15	3	29	130	0,2	0,53	1,6	26	41,6	-	9	0,91	23,66	37,86	44,64	68
		10		20,5	205	0,8	0,84	0,65	164	106,6	-	10	0,9	147,6	95,94	176,04	267
	Итого	25			335				190	148,2				171,26	133,8	220,68	335
2	Склад химических реактивов	20	1	5	50	0,7	0,78	0,8	35	28	-	20	0,91	31,85	25,48	40,79	62
3	Насосная станция	12	5	29	130	0,1	0,49	1,78	13	23,14	-	9	0,91	11,83	21,06	24,16	37
		34	3	12	170	0,65	0,82	0,7	110,5	77,35	-	28	0,91	100,56	70,39	122,75	186
	Итого	46			300				123,5	100,49				112,39	91,45	146,91	223
4	Склад готовой продукции (металла)	20	5	90	450	0,15	0,51	1,69	67,5	114,75	-	10	0,97	65,48	110,66	128,58	195
		28	5	12,5	125	0,8	0,74	0,91	100	90	-	20	0,9	90	81,90	121,69	185
	Итого	48			575				167,5	204,75				155,48	192,56	250,27	380
5	Склад	10	3	18	55	0,2	0,61	1,3	11	14,3	-	6	0,91	10,01	13,01	16,42	25
		34	3	12,5	125	0,6	0,78	0,8	75	60	-	20	0,91	68,25	54,60	87,4	133
	Итого	44			180				86	74,3				78,26	67,61	103,82	158



Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
6	Компрессорная станция	8	3	28	70	0,3	0,51	1,69	21	35,49	-	5	0,91	19,11	32,30	37,53	57
		26	10	105	1050	0,7	0,74	0,91	735	668,85	-	20	0,91	668,85	608,65	904,33	1374
	Итого	34			1120				756	704,34				687,96	640,95	941,86	1431
7	Маляропокрасочный цех	40	5	109	1475	0,17	0,49	1,78	250,75	446,34	-	27	0,91	228,18	406,16	465,87	708
		80	5	50	1600	0,65	0,8	0,75	1040	780	-	64	0,91	946,4	709,80	1183	1797
	Итого	120			3075				1290,75	1226,34				1174,58	1115,96	1648,87	2505
8	Цех опор линий электропередач	100	7	190	3400	0,4	0,71	0,99	1360	1346,4	-	80	0,91	1237,6	1225,22	1741,5	2646
		60	7	60	1200	0,8	0,82	0,7	960	672	-	40	0,91	873,6	611,52	1066,36	1620
	Итого	160			4600				2320	2018,4				2111,2	1836,74	2807,86	4266
9	Сборосварочный цех 1	120	5	113	3400	0,2	0,49	1,78	680	1210,4	-	96	0,91	618,8	1101,46	1263,38	1920
		240	7	24	1800	0,7	0,8	0,75	1260	945	-	198	0,91	1146,6	859,95	1433,25	2178
	Итого	360			5200				1940	2155,4				1765,4	1961,41	2696,63	4097

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
10	Сборосварочный цех 2	96	3	121	3700	0,2	0,55	1,52	740	1124,8	-	81	0,91	673,4	1023,57	1225,22	1862
		140	5	52	2700	0,7	0,82	0,7	1890	1323	-	120	0,91	1719,9	1203,93	2099,41	3190
	Итого	236			6400				2630	2447,8				2393,3	2227,5	3324,63	5051
11	Заготовительный цех	60	7	372	5600	0,3	0,64	1,2	1680	2016	-	40	0,91	1528,8	1834,56	2388,06	3628
		120	7	21	950	0,75	0,78	0,8	712,5	570	-	90	0,91	648,38	518,70	830,33	1262
	Итого	180			6550				2392,5	2586				2177,18	2353,26	3218,39	4890
12	Гараж	14	5	30	75	0,2	0,61	1,3	15	19,5	-	5	0,91	13,65	17,75	22,39	34
		6	1	2	6	0,65	0,82	0,7	3,9	2,73	-	6	0,91	3,55	2,49	4,34	7
	Итого	20			81				18,9	22,23				17,2	20,24	26,73	41
13	Кузнечно-прессовый цех	35	4,5	60	677,5	0,5	0,5	1,73	338,75	586,04	-	-	0,91	308,26	533,29	615,97	936
14	Теплица	14	1,5	7	35	0,7	0,78	0,8	24,5	19,6	-	10	0,91	22,3	17,84	28,56	43
15	Теплопункт	6	1,5	7,5	15	0,17	0,47	1,88	2,55	4,79	-	4	0,91	2,32	4,36	4,94	8
		20	3	10	80	0,6	0,74	0,91	48	43,68	-	16	0,91	43,68	39,75	59,06	90
	Итого	26			95				50,55	48,47				46	44,11	64	97

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
16	Заводоуправление	18	1,5	13	80	0,3	0,47	1,88	24	45,12	-	12	0,91	21,84	41,06	46,51	71
		26	3	12	125	0,7	0,86	0,59	87,5	51,63	-	21	0,91	79,63	46,98	92,46	140
	Итого	44			205				111,5	96,75				101,47	88,04	138,97	211
17	Склад ремонтно-механического цеха	16	3	25	135	0,2	0,61	1,3	27	35,1	-	11	0,91	24,57	31,94	40,3	61
		8		7,5	60	0,65	0,82	0,7	39	27,3	-	8	0,91	35,49	24,84	43,32	66
	Итого	24			195				66	62,4				60,06	56,78	83,62	127
	ИТОГО	1436	1	372	29674				12541	12530	-	215	0,7	11414	11407	16359	24854

«По полученному для каждой группы электроприемников значению  $P_p$  определяется реактивная нагрузка:

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg}\varphi, \quad (5)$$

где  $\operatorname{tg}\varphi$  – коэффициент реактивной мощности группы электроприемников.»[1]

В случае, если  $n_{\text{э}} \leq 10$ , значение  $Q_p$  необходимо увеличить на 10% согласно п.3.2.8.1 [1].

Далее определяется полная нагрузка:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} \quad (6)$$

Расчетный ток определяется по следующей формуле:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3}U_H} \quad (7)$$

Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Расчет выполнен по форме Ф636-92.

Выводы по разделу

В результате расчетов получаем, что полная нагрузка потребителей металлургического завода без учета наружного и внутреннего освещения составляет 16359 кВА.

Далее необходимо произвести расчет освещения металлургического завода для определения общей мощности и выбора соответствующего оборудования для электроснабжения группы цехов.

## 2 Расчет освещения

При проведении расчета освещения завода необходимо учитывать нагрузку искусственного внутрицехового освещения металлургического завода, а также наружное освещение территории завода [21].

Нагрузку искусственного освещения завода определим с помощью удельной мощности освещения по формуле:

$$P_0 = F \cdot S \cdot K_{CO} \cdot 10^{-3}, \quad (8)$$

где  $F$  – площадь освещения, м<sup>2</sup>;

$S$  – удельная плотность нагрузки на освещение, Вт/м<sup>2</sup>;

$K_{CO}$  – коэффициент спроса освещения.

При длительном пребывании работающих в помещении освещенность принимаем 200 лк [2]. Значения удельной мощности примем исходя из значений освещенности помещений по СП 52.13330.2016 табл.7.2. Получаем 10 Вт/м<sup>2</sup> [3]. По аналогии определим значения удельной мощности для других цехов и занесем их в таблицу 2.

В качестве светильников для освещения складов примем светильники GALAD Иллюминатор LED-160 (Medium) с мощностью 160 Вт. Для освещения цехов и производственных помещений, в которых присутствует повышенная температура, применим светильники ГСП/ЖСП70-400-1031 с мощностью 470 Вт, с температурой эксплуатации до +70°С с лампами ДРИ/ДНаТ. Коэффициент мощности светильников 0,9. Внешний вид данных светильников представлен на рисунке 1 [4], [22].

Вид кривой силы света (КСС) данных светильников представлен на рисунке 2.

Данные светильники удобно монтируются на специальные крюки, трос d6-12,5, а также на монтажный профиль и трубу 3/4”.

Таблица 2 – Расчет нагрузки внутреннего искусственного освещения цехов завода

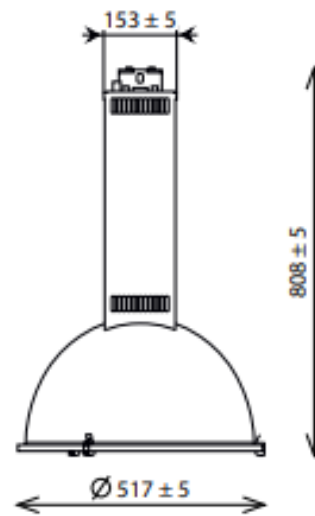
№ по генплану	Наименование потребителя	F, м <sup>2</sup>	S, Вт/м <sup>2</sup>	K <sub>со</sub>	P <sub>0</sub> , кВт	cosφ	tgφ	Q <sub>0</sub> , квар	S <sub>0</sub> , кВА
1	Кислородная станция	1224	14	0,85	14,57	0,9	0,48	6,99	16,16
2	Склад химических реактивов	819	10	0,6	4,91	0,9	0,48	2,36	5,45
3	Насосная станция	777	14	0,85	9,25	0,9	0,48	4,44	10,26
4	Склад готовой продукции (металла)	7119	10	0,6	42,71	0,9	0,48	20,5	47,38
5	Склад	1288	10	0,6	7,73	0,9	0,48	3,71	8,57
6	Компрессорная станция	1064	14	0,85	12,66	0,9	0,48	6,08	14,04
7	Малярпокраочный цех	6392	16	0,95	97,16	0,9	0,48	46,64	107,77
8	Цех опор линий электро-передач	10750	16	0,95	163,4	0,9	0,48	78,43	181,25

Продолжение таблицы 2

№ по генплану	Наименование потребителя	F, м <sup>2</sup>	S, Вт/м <sup>2</sup>	K <sub>CO</sub>	P <sub>0</sub> , кВт	cosφ	tgφ	Q <sub>0</sub> , квар	S <sub>0</sub> , кВА
9	Сборосварочный цех 1	9964	18	0,95	170,38	0,9	0,48	81,78	188,99
10	Сборосварочный цех 2	18368	18	0,95	314,09	0,9	0,48	150,76	348,4
11	Заготовительный цех	9870	16	0,95	150,02	0,9	0,48	72,01	166,41
12	Гараж	1610	10	0,6	9,66	0,9	0,48	4,64	10,72
13	Кузнечнопрессовый цех	3844	16	0,95	58,43	0,9	0,48	28,05	64,81
14	Теплица	3192	16	0,9	45,96	0,9	0,48	22,06	50,98
15	Теплопункт	728	16	0,9	10,48	0,9	0,48	5,03	11,62
16	Заводоуправление	1743	20	0,8	27,89	0,9	0,48	13,39	30,94
17	Склад ремонтно-механического цеха	1148	10	0,6	6,89	0,9	0,48	3,31	7,64
	ИТОГО				1146,19			550,18	1271,39

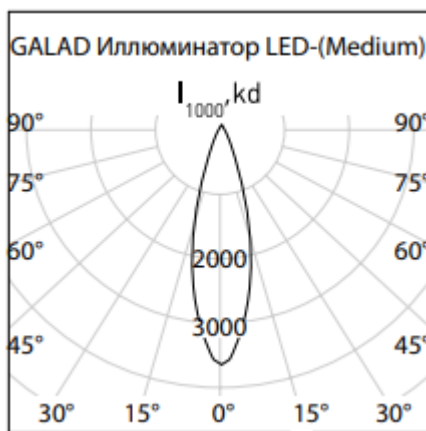


Иллюминатор LED-160 (Medium)

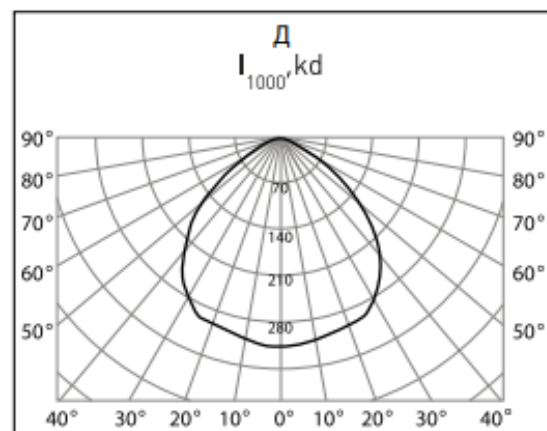


ГСП/ЖСП70-400-1031

Рисунок 1 – Внешний вид светильников и их габаритные размеры



Иллюминатор LED-160 (Medium)



ГСП/ЖСП70-400-1031

Рисунок 2 – КСС светильников

Выводы по разделу

В результате расчета нагрузки освещения группы цехов металлургического завода получаем полную мощность, которая составляет 1271 кВА.



### 3 Выбор числа и мощности трансформаторов

Электроснабжение проектируемых энергопринимающих устройств предусматривается от существующих спроектированных ранее внешних сетей.

«Напряжение сети 380/220В при глухо-заземленной нейтрали трансформатора. Тип системы заземления TN-C-S.» [5]

Класс напряжения электросети, к которым будет осуществляться подключение – 10/0,4 кВ.

Расчет мощности трансформаторов будем проводить по методу удельной плотности нагрузок [23].

Проведем расчет мощности на один трансформатор по следующему выражению:

$$\sigma = \frac{S}{F_{\Pi}} \quad (7)$$

где  $S$  – полная расчетная мощность цехов, кВА;

$F_{\Pi}$  – площадь предприятия, м<sup>2</sup>.

Отсюда получаем:

$$\sigma = \frac{S}{F_{\Pi}} = \frac{17630}{575 \cdot 430} = 0,071 \text{ кВА/м}^2$$

Принимаем рекомендуемую мощность трансформаторов 1000 кВА. [6]

Коэффициент загрузки принимаем равным 0,7.

Поскольку количество трансформаторов, и соответственно число КТП, зависит от полной мощности потребителя, то для снижения полной потребляемой мощности необходимо установить компенсирующие устройства. Условно примем, что реактивная мощность полностью компенсируется конденсаторными батареями.

Количество КТП определим по следующей формуле:

$$N = \frac{S}{k_3 S_{HT}} \quad (8)$$

где  $S_{HT}$  – номинальная мощность трансформаторов, кВА;

$k_3$  – коэффициент загрузки трансформаторов.

В результате расчета по формуле 8 мы получаем, что для электроснабжения группы цехов завода необходимо 18 трансформаторов. Для электроснабжения группы цехов принимаем 9 КТП с двумя трансформаторами ТМГ 1000 10/0,4.

Теперь проведем расчет конденсаторных батарей, необходимых для компенсации реактивной мощности.

«Наибольшая реактивная мощность  $Q_1$ , которая может быть передана в сеть напряжением до 1 кВ из сети 6-10 кВ без увеличения числа трансформаторов, определяется по формуле» [8]:

$$Q = \sqrt{(1,1 \cdot N \cdot k_3 \cdot S_{HT})^2 - P^2} \quad (9)$$

$$Q = \sqrt{(1,1 \cdot 18 \cdot 0,7 \cdot 1000)^2 - 12560^2} = 5860 \text{ квар}$$

Мощность БК на напряжение 0,4 кВ определяется по формуле:

$$Q_{НБК} = \sum Q_{PH} - Q \quad (10)$$

$$Q_{НБК} = 11407 - 5860 = 5547 \text{ квар} \quad (11)$$

Мощность одной ККУ:

$$Q_{НБК1} = \frac{Q_{НБК}}{N} \quad (12)$$

$$Q_{НБК1} = \frac{5547}{18} = 308 \text{ квар.}$$

В результате расчета по формуле 12, к установке на каждую секцию шин подстанций установим по одной АКУ-0,4-300-25 с номинальной мощностью 300 квар. Суммарная мощность БК составит 5400 квар.

Для выбора экономически целесообразного расположения КТП, необходимо определить центры электрических нагрузок (ЦЭН) завода.

Расчет ЦЭН потребителей проведем с учетом того, что точкой отсчета будет нижний левый угол завода, а расстоянием до объекта будет являться расстояние от точка отсчета до геометрического центра объекта (потребителя).

ЦЭН электрических нагрузок завода рассчитаем путем определения координат по следующим формулам:

$$x_{ц} = \frac{\sum S_i x_i}{S_i}, y_{ц} = \frac{\sum S_i y_i}{S_i} \quad (13)$$

где  $S$  – нагрузка  $i$ -го потребителя, кВА;

$x_i, y_i$  – координаты ЦЭН  $i$ -го потребителя.

Для составления картограммы нагрузок определим радиус окружностей цехов для представления нагрузки на генплане завода по формуле:

$$r_i = \sqrt{S/\pi \cdot m}, \quad (14)$$

где  $S$  – расчетная нагрузка  $i$ -го потребителя, кВА;

$m$  – масштаб для определения площади окружности (примем равным 0,7).

Результаты расчетов по формуле 13 занесем в таблицу 3. Коэффициент загрузки трансформаторов КТП определяется с учетом компенсации реактивной мощности.

На основании полученных расчетов в таблице 3 определим ЦЭН ГПП 110/10кВ на основании нагрузок и месторасположений КТП. Данный расчет занесем в таблицу 4.

Таблица 3 – Расчет ЦЭН для КТП с трансформаторами ТМГ 1000 10/0,4

№ цеха	P, кВт	Q, квар	Q <sub>кУ</sub> , квар	S, кВА	X	Y	к <sub>з</sub>	x <sub>ц</sub> , м	у <sub>ц</sub> , м	r <sub>i</sub> , м
ТП1	1329,03	1195,93	4х300	1329,028			0,66451	247,323	478,746	
1	185,83	140,79		236,84	190	570				10,38
2	36,76	27,84		46,24	120	510				4,59
3	121,64	95,89		157,17	245	530				8,45
4	198,19	213,06		297,65	140	450				11,63
5	85,99	71,32		112,39	345	480				7,15
6	700,62	647,03		955,9	290	455				20,85
ТП-2,3	2274,6	1915,17	4х300	2274,757			0,56869	420	385	
8	2274,6	1915,17		2989,11	420	385				36,87
ТП-4,5	3207,52	3205,79	10х300	3207,552			0,80189	180	332,164	
7	1271,74	1162,6		1756,64	180	385				28,26
9	1935,78	2043,19		2885,62	180	300				36,22
ТП-6,7,8,9	5749,19	5640,31	18х300	5749,211			0,71865	321,094	190,388	
10	2707,39	2378,26		3673,03	435	220				40,87
11	2327,2	2425,27		3384,8	180	195				39,23
12	26,86	24,88		37,45	530	110				4,13
13	366,69	561,34		680,78	415	110				17,59
14	68,26	39,9		79,54	160	25				6,01
15	56,48	49,14		75,62	230	25				5,86
16	129,36	101,43		169,91	310	30				8,79
17	66,95	60,09		91,26	420	40				6,44

Таблица 4 – Расчет ЦЭН для ГПП завода

№ КТП	S, кВА	X	Y	хц, м	уц, м
ГПП	35460,55			232,27	256,61
ТП1	1329,03	247,32	478,75		
ТП-2,3	2274,76	420	385		
ТП-4,5	3207,55	180	332,16		
ТП-6,7,8,9	5749,21	321,09	190,39		
СД1-2	1400	290	455		
СД3-4	2300	290	455		
СД5-10	16900	180	195		
АД1-5	2300	180	195		

Синхронные и асинхронные двигатели подключены к шинам ГПП (рисунок 5).

Определив места расположения ГПП и КТП, необходимо выбрать схему питания КТП [7].

«2.3.8. Выбор схем (магистральные или радиальные) и конструктивного выполнения (воздушные или кабельные) линий 110 кВ и выше определяется технико-экономическими сопоставлениями с учетом особенностей данного предприятия, электрической нагрузки, взаимного расположения районных подстанций в ГПП, ожидаемой перспективы развития существующей схемы электроснабжения, степени загрязненности атмосферы, возможности прокладки линий к ГПП» [9], [24].

В соответствии с этим рассмотрим для технико-экономического обоснования радиальную схему питания с глухим присоединением ТП к шинам ГПП (рисунок 3) и магистральную схему (рисунок 4).

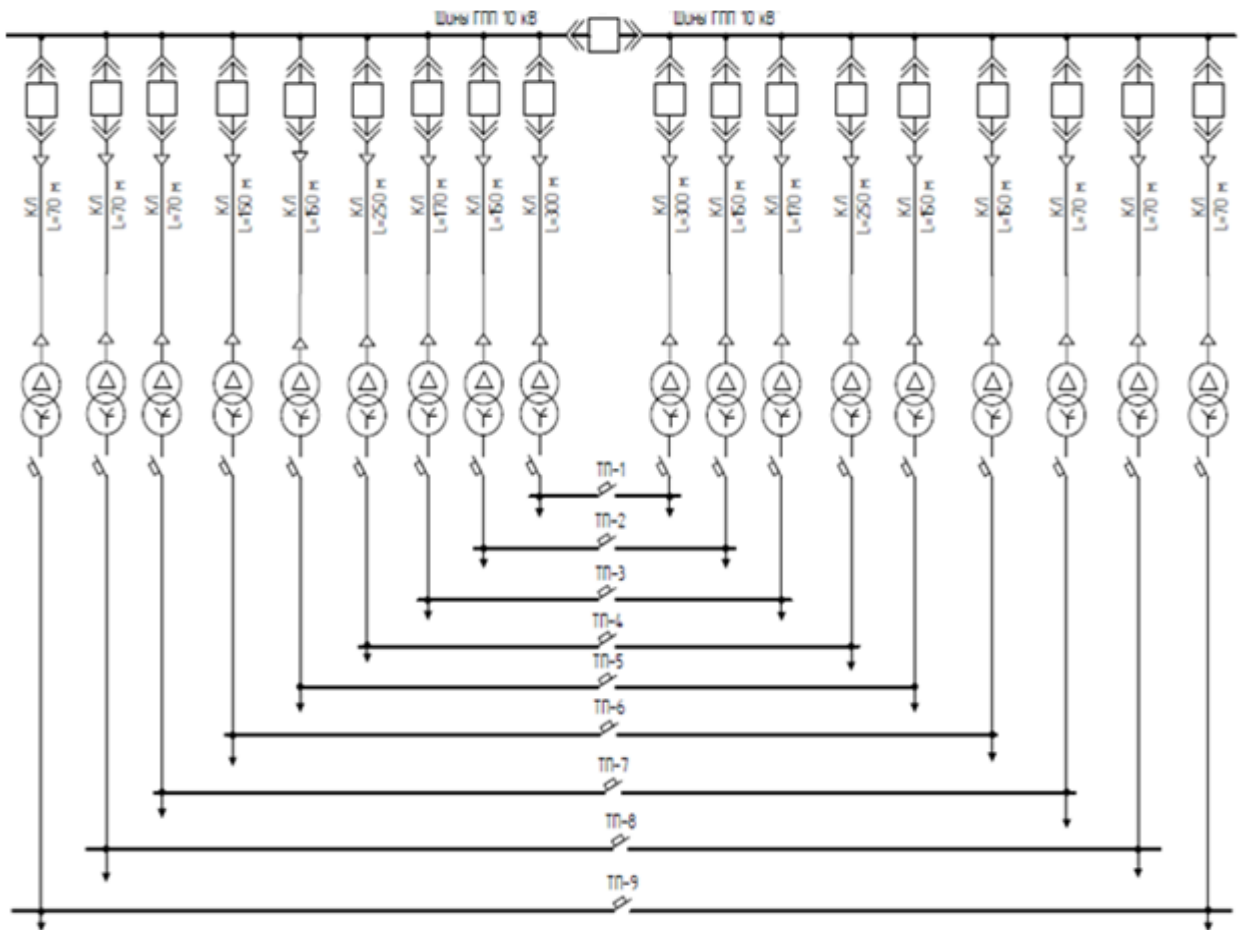


Рисунок 3 – Радиальная схема питания

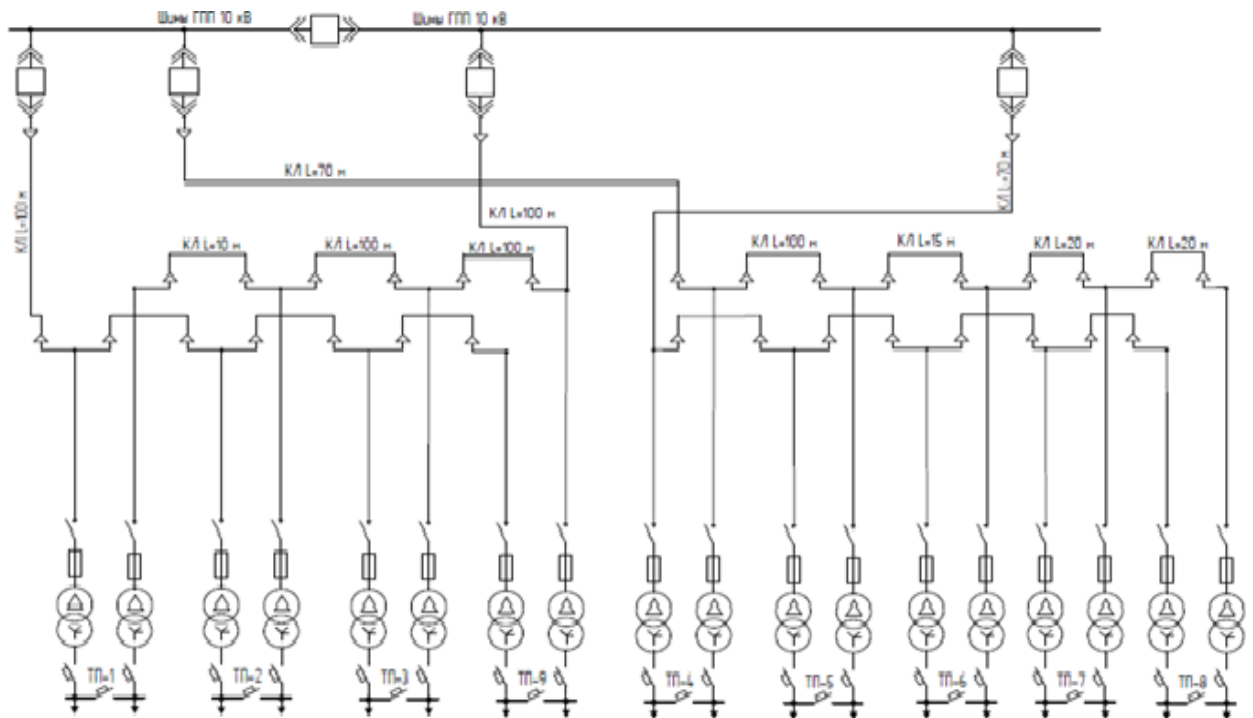


Рисунок 4 – Магистральная схема питания

## Выводы по разделу

В ходе выполнения расчетов для электроснабжения группы цехов металлургического завода было выбрано 9 КТП. Каждая КТП имеет в своем составе по два трансформатора ТМГ 1000 10/0,4.

Трансформаторы выбраны исходя из расчетов и требований нормативно-технической документации [25].

Для компенсации реактивной мощности были использованы АКУ-0,4-300-25.

Далее был проведен расчет ЦЭН группы цехов металлургического завода. На основании данного расчета были установлены КТП с учетом компенсации реактивной мощности. Далее был аналогично определен ЦЭН для установки ГПП с использованием рассчитанных координат мест установки КТП.

В последующем разделе необходимо провести технико-экономический расчет для радиальной и магистральной схем питания.

#### 4 Расчет и выбор кабельных линий

Кабельные трассы на территории завода прокладываются на основании расположения КТП.

Расчет токов, возникающих в нормальном и аварийном режимах, проведем по следующей формуле:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U \cdot n} \quad (15)$$

где  $n$  – количество кабельных линий, участвующих в электроснабжении потребителя. Принимаем по кабеля марки АПвБбШп.

Рассчитаем сечение кабельных линий:

$$F = \frac{I}{j} \quad (16)$$

«где  $I$  – расчетный ток в час максимума энергосистемы, А;

$j_{\text{эк}}$  – нормированное значение экономической плотности тока, А/мм<sup>2</sup>, для заданных условий работы, выбираемое по табл. 1.3.36.» [6]

Для выбранной марки кабеля  $j = 1,6$  А/мм<sup>2</sup>, поскольку принимаем, что число часов использования максимума нагрузки более 5000 часов.

«Длительно допустимый ток:

$$I_{\text{доп}} = I_{\text{доп.справ}} \cdot k_{\text{п}} \cdot k_t \cdot k_{\text{ж}} \quad (17)$$

где  $I_{\text{доп.справ}}$  – допустимый длительный ток для кабелей с алюминиевыми жилами с пластмассовой изоляцией, прокладываемых в земле, принимаемый по таблице 1.3.7;

$k_{\text{п}}$  – коэффициент прокладки, определяемый по числу кабелей, проложенных в траншее, согласно таблицы 1.3.26. Для двух кабелей принимаем  $k_{\text{п}} = 0,9$ .

$k_t$  – коэффициент поправки на температуру среды, согласно таблицы 1.3.3 ПУЭ. Принимаем равным  $k_t = 1,06$ ;



$k_{ж}$  – коэффициент поправки на количество жил. Для четырехжильного кабеля принимаем  $k_{ж} = 0,92$ .» [6]

Для послеаварийного режима длительный допустимый ток считается аналогично. За аварийный режим принят режим, при котором один кабель перестает работать. В соответствии с этим коэффициент прокладки  $k_{п} = 1$ .

Проведем расчет потерь напряжений для выбранных кабелей. Для сетей 10 кВ допустимые потери напряжений составляют не более 5%.

Потери напряжения в кабельных линиях определим по следующему выражению [11]:

$$\Delta U = \frac{(P \cdot r_0 + Q \cdot x_0) l}{U_{ном}} \quad (18)$$

где  $r_0, x_0$  – активное и индуктивное сопротивление кабеля, Ом/км;

$l$  – длина кабеля, км;

$P, Q$  – активная и реактивная мощность проходящая через кабель.

Результаты расчетов потерь занесем в таблицу 5 для варианта 1 и в таблицу 6 для варианта 2.

Таблица 5 – Вариант 1

№ КТП	$n$	$P$ , кВт	$Q$ , квар	$S$ , кВА	$I_{\text{раб}}$ , А	$I_{\text{пав}}$ , А	$F_{\text{расч}}$ , мм <sup>2</sup>	$F$ , мм <sup>2</sup>	$I_{\text{доп.справ}}$ , А	$I_{\text{доп.раб}}$ , А	$I_{\text{доп.пав}}$ , А
1	2	1329,03	2,02	1329,03	38,37	76,73	23,98	35	140	122,88	136,53
2	2	1137,30	969,66	1494,56	43,14	86,29	26,97	35	140	122,88	136,53
3	2	1137,30	969,66	1494,56	43,14	86,29	26,97	35	140	122,88	136,53
4	2	1603,76	7,17	1603,78	46,30	92,59	28,94	35	140	122,88	136,53
5	2	1603,76	7,17	1603,78	46,30	92,59	28,94	35	140	122,88	136,53
6	2	1437,30	3,88	1437,30	41,49	82,98	25,93	35	140	122,88	136,53
7	2	1437,30	3,88	1437,30	41,49	82,98	25,93	35	140	122,88	136,53
8	2	1437,30	3,88	1437,30	41,49	82,98	25,93	35	140	122,88	136,53
9	2	1437,30	3,88	1437,30	41,49	82,98	25,93	35	140	122,88	136,53

Таблица 6 – Вариант 2

№ КТП	$n$	$P$ , кВт	$Q$ , квар	$S$ , кВА	$I_{\text{раб}}$ , А	$I_{\text{пав}}$ , А	$F_{\text{расч}}$ , мм <sup>2</sup>	$F$ , мм <sup>2</sup>	$I_{\text{доп.справ}}$ , А	$I_{\text{доп.раб}}$ , А	$I_{\text{доп.пав}}$ , А
0, 1	2	4521,18	2229,69	5041,09	145,52	291,05	90,95	185	385	337,91	375,45
1, 2	2	3325,25	1649,88	3712,06	107,16	214,32	66,97	120	295	258,92	287,68
2, 3	2	2367,66	1011,51	2574,68	74,32	148,65	46,45	70	210	184,31	204,79
0, 4	2	7436,02	1117,07	7519,46	217,07	434,14	135,67	300	460	403,73	448,59
4, 5	2	5833,13	984,86	5915,68	170,77	341,54	106,73	240	400	351,07	390,08
5, 6	2	4230,23	835,28	4311,91	124,47	248,95	77,80	95	255	223,81	248,68
6, 7	2	2820,16	556,85	2874,61	82,98	165,97	51,86	70	210	184,31	204,79
7, 8	2	1410,08	278,43	1437,30	41,49	82,98	25,93	35	140	122,88	136,53
3, 9	2	1410,08	278,43	1437,30	41,49	82,98	25,93	35	140	122,88	136,53

Таблица 7 – Вариант 1

№ КТП	$n$	$P$ , кВт	$Q$ , квар	$S$ , кВА	$F$ , мм <sup>2</sup>	$r$ , Ом/км	$x$ , Ом/км	$l$ , м	$dU_{\text{раб}}$ , %	$dU_{\text{пав}}$ , %
1	2	1329,03	2,02	1329,03	35	0,92	0,0637	300	1,83%	3,67%
2	2	1137,30	969,66	1494,56	35	0,92	0,0637	150	0,83%	1,66%
3	2	1137,30	969,66	1494,56	35	0,92	0,0637	170	0,94%	1,88%
4	2	1603,76	7,17	1603,78	35	0,92	0,0637	250	1,84%	3,69%
5	2	1603,76	7,17	1603,78	35	0,92	0,0637	150	1,11%	2,21%
6	2	1437,30	3,88	1437,30	35	0,92	0,0637	150	0,99%	1,98%
7	2	1437,30	3,88	1437,30	35	0,92	0,0637	70	0,46%	0,93%
8	2	1437,30	3,88	1437,30	35	0,92	0,0637	70	0,46%	0,93%

Таблица 8 – Вариант 2

№ КТП	$n$	$P$ , кВт	$Q$ , квар	$S$ , кВА	$F$ , мм <sup>2</sup>	$r$ , Ом/км	$x$ , Ом/км	$l$ , м	$dU_{\text{раб}}$ , %	$dU_{\text{пав}}$ , %
0, 1	2	4521,18	2229,69	5041,09	185	0,169	0,078	300	1,41%	2,81%
1, 2	2	3325,25	1649,88	3712,06	120	0,261	0,08	10	0,05%	0,10%
2, 3	2	2367,66	1011,51	2574,68	70	0,447	0,082	150	0,86%	1,71%
0, 4	2	7436,02	1117,07	7519,46	300	0,106	0,062	70	0,30%	0,60%
4, 5	2	5833,13	984,86	5915,68	240	0,329	0,081	100	1,00%	2,00%
5, 6	2	4230,23	835,28	4311,91	95	0,169	0,078	150	0,59%	1,17%
6, 7	2	2820,16	556,85	2874,61	70	0,447	0,082	200	1,31%	2,61%
7, 8	2	1410,08	278,43	1437,30	35	0,894	0,088	20	0,13%	0,26%

Таблица 9 – Технико-экономический расчет варианта 1

№ КТП	$n$	$F$ , мм <sup>2</sup>	$l$ , км	$C_{\text{прокл}}$ , руб/м	$K_{\text{прокл}}$ , руб	$C_{\text{каб}}$ , руб/м	$K_{\text{каб}}$ , руб	$V_{\text{земл}}$ , м <sup>3</sup>	$K_{\text{земл}}$ , руб
1	2	35	300	220	66000	210	126000	150	172500
2	2	35	150	220	33000	210	63000	75	86250
3	2	35	170	220	37400	210	71400	85	97750
4	2	35	250	220	55000	210	105000	125	143750
5	2	35	150	220	33000	210	63000	75	86250
6	2	35	150	220	33000	210	63000	75	86250
7	2	35	70	220	15400	210	29400	35	40250
8	2	35	70	220	15400	210	29400	35	40250
9	2	35	70	220	15400	210	29400	35	40250
					303600		579600	690	793500

Таблица 10 – Технико-экономический расчет варианта 2

№ КТП	$n$	$F$ , мм <sup>2</sup>	$l$ , км	$C_{\text{прокл}}$ , руб/м	$K_{\text{прокл}}$ , руб	$C_{\text{каб}}$ , руб/м	$K_{\text{каб}}$ , руб	$V_{\text{земл}}$ , м <sup>3</sup>	$K_{\text{земл}}$ , руб
0, 1	2	185	300	380	114000	863	517800	150	172500
1, 2	2	120	10	340	3400	578	11560	5	5750
2, 3	2	70	150	270	40500	353	105900	75	86250
0, 4	2	300	70	500	35000	1200	168000	35	40250
4, 5	2	240	100	410	41000	1096	219200	50	57500
5, 6	2	95	150	310	46500	440	132000	75	86250
6, 7	2	70	200	270	54000	353	141200	100	115000
7, 8	2	35	20	220	4400	210	8400	10	11500
3, 9	2	35	20	220	4400	210	8400	10	11500
					343200		1312460	510	586500

Полученные варианты являются допустимыми [10]. Проведем технико-экономический расчет вариантов для последующего выбора наиболее выгодного.

Рассчитаем затраты на прокладку кабельных линий для 1 и 2 вариантов. Примем, что глубина кабельной траншеи 1 м, а ширина траншеи 0,5 м для двух кабелей. Объем земли необходимый для разработки грунта и проведения обратной засыпки после прокладки каждого кабеля представлен в таблице 9 для варианта 1 и в таблице 10 для варианта 2.

Стоимость одного погонного метра кабеля каждого сечения было взято из каталога [12].

Общая стоимость капиталовложений для прокладки кабельных линий рассчитывается по следующей формуле:

$$Z = K_{\text{прокл}} + K_{\text{каб}} + K_{\text{земл}} = (C_{\text{прокл}} + C_{\text{каб}})L + V_{\text{земл}}C_{\text{земл}} \quad (19)$$

где  $C_{\text{прокл}}$  – стоимость прокладки кабеля, руб/м;

$C_{\text{каб}}$  – стоимость кабеля, руб/м;

$V_{\text{земл}}$  – объем земляных работ, м<sup>3</sup>;

$C_{\text{земл}}$  – стоимость земляных работ (включает разработку грунта 800 руб/м<sup>3</sup> и обратную засыпку 350 руб/м<sup>3</sup> [13]), руб/м<sup>3</sup>;

#### Выводы по разделу

В результате расчетов мы получили, что стоимость прокладки кабельных линий для варианта 1 составляет 1,677 млн. руб, а стоимость прокладки для варианта 2 составляет 2,242 млн. руб.

В результате расчетов, наиболее выгодным будет являться 1 вариант.



## 5 Расчет ТКЗ

### 5.1 Расчет ТКЗ выше 1 кВ

Рассчитаем ТКЗ по формулам приближенного приведения в относительных единицах (о.е.).

«Мощность трехфазного короткого замыкания сети с  $S_c=500$  МВА.  $U_6=10,5$  кВ,  $S_6=1000$  МВА.» [14]

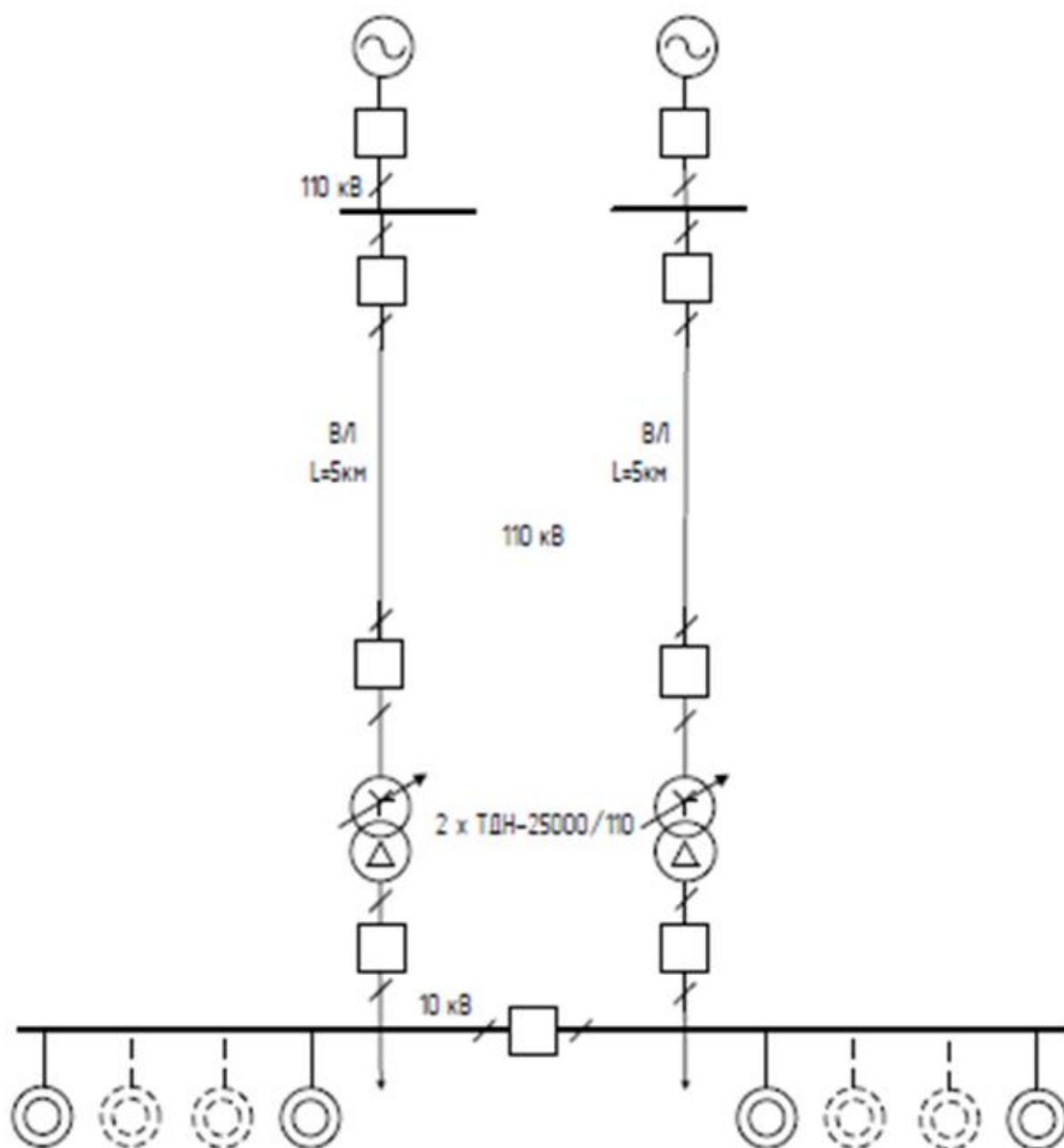


Рисунок 5 – Схема системы электроснабжения

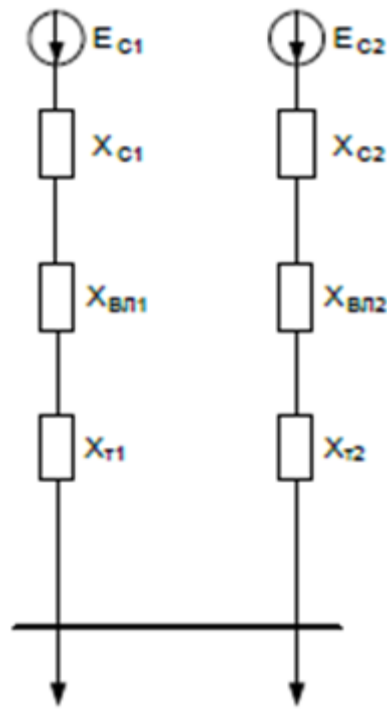


Рисунок 6 – Схема замещения системы электроснабжения

Базисный ток для ступеней напряжения 10 кВ и 110 кВ:

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_6} \quad (20)$$

$$I_6 = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 55 \text{ кА}$$

$$I_6 = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 5,02 \text{ кА}$$

Мощность трансформаторов ГПП с учетом 40% перегрузки определим по следующей формуле:

$$S_{т.гпп} = \frac{S}{0,7 \cdot 2} \quad (21)$$

$$S_{т.гпп} = \frac{35460,55}{0,7 \cdot 2} = 25329 \text{ МВА}$$

В результате расчета выбираем 2хТДН-25000/110,  $k_3 = 0,71$ .

В результате расчета по формулам 15 и 16 по мощности трансформаторов ГПП получаем сечение проводов 150 мм<sup>2</sup>.  $r_{уд} = 0,2039$  Ом/км. Расстояние от ГПП до точки подключения 5 км.

Сопротивление ВЛ рассчитаем по формуле:

$$r_{ВЛ1} = r_{уд} \cdot l_{ВЛ1} \quad (22)$$
$$r_{ВЛ1} = 0,2039 \cdot 5 = 1,0195 \text{ Ом}$$

Сопротивление ВЛ в о.е.:

$$x_{бВЛ1} = r_{ВЛ1} \frac{S_6}{U_{ВН}^2} \quad (23)$$
$$x_{бВЛ1} = 1,0195 \cdot \frac{1000}{115^2} = 0,0771 \text{ о.е.}$$

Сопротивление системы в о.е.:

$$x_{бс} = \frac{S_6}{S_c} \quad (24)$$
$$x_{бс} = \frac{1000}{1500} = 0,6667 \text{ о.е.}$$

Сопротивления трансформатора:

$$x_{ТР} = \frac{U_k S_6}{100 \cdot S_{ТР}} \quad (25)$$
$$x_{ТР} = \frac{10,5 \cdot 1000}{100 \cdot 25} = 4,2 \text{ о.е.}$$

Эквивалентное сопротивление схемы:

$$x_{брез} = \frac{x_{бс} + x_{бВЛ1} + x_{ТР}}{2} \quad (26)$$
$$x_{брез} = \frac{0,6667 + 0,0771 + 4,2}{2} = 2,25 \text{ о.е.}$$

В результате мы получаем эквивалентные ЭДС  $E_{ВН} = E_G = 1,0$  о.е., сопротивление внешней цепи  $x_{ВН} = 2,25$  о.е. (рисунок 6).

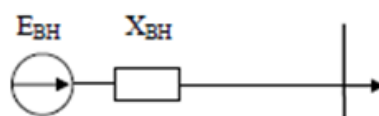


Рисунок 7 – Свернутая схема замещения

Проведем расчет схемы, включающий сопротивления от точки КЗ до шин трансформатора (рисунок 7).

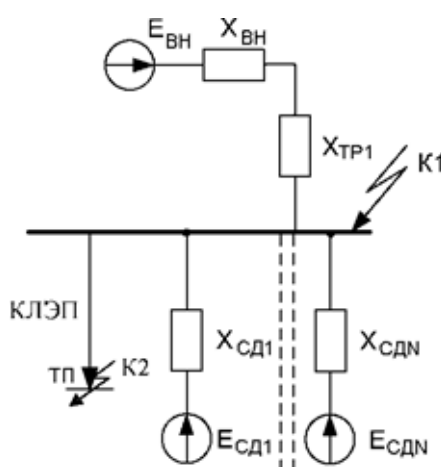


Рисунок 8 – Схема замещения сопротивления участка короткозамкнутой цепи

Сверхпереходный ток сети внешнего электроснабжения:

$$I''_{ВН} = \frac{E''_{ВН} I_6}{x_{ВН} + x_{доп}} = \frac{E''_{ВН}}{x_{\Sigma}} \cdot I_6 \quad (27)$$

$$I''_{ВН} = \frac{1}{2,25} \cdot 55 = 24,44 \text{ кА}$$

где  $x_{доп}$  – сопротивление участка короткозамкнутой цепи.

Для дальнейшего расчета воспользуемся параметрами двигателей, занесенных в таблицу 11.

Таблица 11 – Параметры синхронных и асинхронных двигателей

Обозначение	$x_d''$	$\cos\phi_i$	P, МВт	S, МВА	x	E
СД1-2	0,12	0,9	2x0,63	1,4	85,72	1,1
СД3-4	0,114	0,9	2x1,0	2,22	51,35	1,1
СД5-10	0,1	0,9	6x2,5	16,67	6	1,1
АД1-5	2,35	0,85	5x0,4	2,35	35,97	0,9

Параметры эквивалентного двигателя определим по формуле параллельного соединения сопротивлений. Получаем:  $x_{сдо} = 4,43$  о.е.,  $E_{до} = 1,1$  о.е.

Сверхпереходный ток подпитывающего влияния двигателей:

$$I''_{ДВ} = \frac{E''_{до} I_6}{x_{сдо}} \quad (28)$$

$$I''_{ДВ} = \frac{1,1 \cdot 55}{4,43} = 13,66 \text{ кА}$$

В результате преобразований получаем схему замещения, представленную на рисунке 8.

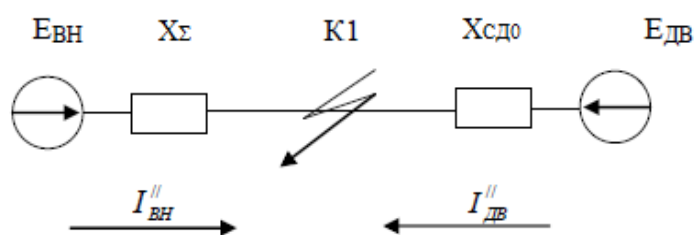


Рисунок 8 – Преобразованная схема замещения

Сверхпереходное значение трехфазного ТКЗ:

$$I''_{К1} = I''_{ВН} + I''_{ДВ} \quad (29)$$

$$I''_{К1} = I''_{ВН} + I''_{ДВ} = 24,44 + 13,66 = 38,1 \text{ кА}$$

Ударный ток в точке К1 определим по следующей формуле:

$$i_{уд} = k_{удТ} \sqrt{2} I''_{ВН} + k_{уд,ДВ} \sqrt{2} I''_{ДВ} \quad (30)$$
$$i_{уд} = 1,0 \cdot \sqrt{2} \cdot 24,44 + 1,6 \cdot \sqrt{2} \cdot 13,66 = 65,46 \text{ кА}$$

где  $k_{уд}$  и  $k_{уд,ДВ}$  – ударные коэффициенты, определяемые по расчетным кривым.

Проведем расчет точки К2. Сопротивления питающей кабельной линии по формулам 22 и 23 для наиболее удаленного потребителя (300 м):  $x_{КЛ1} = 0,17$  о.е.,  $r_{КЛ1} = 8,34$  о.е.

ТКЗ в точке К2 равен:

$$I_{п0} = \frac{E_6}{\sqrt{x_{КЛ1}^2 + r_{КЛ1}^2}} \cdot I_6 \quad (31)$$
$$I_{п0} = \frac{1}{\sqrt{0,17^2 + 8,34^2}} \cdot 55 = 6,593 \text{ кА}$$

Определим ударный ток.

$$i_{уд} = \sqrt{2} I_{п0} K_{уд} \quad (32)$$
$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot 6,593 \cdot 1,4 = 13,053 \text{ кА}$$

Получаем ударный ток  $i_{уд} = 13,053$  кА.

### 5.1 Расчет ТКЗ ниже 1 кВ

На стороне ниже 1кВ для расчета ТКЗ важно учитывать индуктивные и активные сопротивления элементов системы электроснабжения. На стороне ниже 1кВ выберем расчетные точки короткого замыкания К-3, К-4. Точка К-3 расположена за кабельной линией, идущей от КТП-1 до РУ первого

потребителя. Расстояние 150 м. Точка К-4 расположена за кабельной линией, проходящей от РУ первого потребителя до насоса кислородной станции.

Выбор кабелей для расчета сопротивления проведем по аналогии с ранее проведенными расчетами.

Рассчитаем трехфазный ток короткого замыкания по методике ГОСТ 28249-93.

«Сопротивления катушек и контактов автоматических выключателей примем равными  $r_{кв}=0,25$  мОм,  $x_{кв}=0,1$  мОм. По данному ГОСТ п.2.7 активным и индуктивным сопротивлением трансформаторов тока можно пренебречь. Активное сопротивление контактов  $r_{к}=0,1$  мОм. Сопротивление автоматического выключателя  $r_{ав}=0,25$  мОм,  $x_{ав}=0,1$  мОм.» [15]

Сопротивление системы:

$$x_c = \frac{U_{нн}^2}{S_c} \quad (33)$$

$$x_c = \frac{400^2}{500} \cdot 10^{-3} = 0,32 \text{ мОм}$$

Сопротивления силового трансформатора определим, используя его паспортные данные:

$$r_{Тр} = \frac{P_{кном} \cdot U_{ннном}^2}{S_{Тном}^2} \cdot 10^6 \quad (34)$$

$$x_{Тр} = \sqrt{u_k^2 - \left(\frac{100 \cdot P_{кном}}{S_{Тном}}\right)^2} \cdot \frac{U_{ннном}^2}{S_{Тном}} \cdot 10^4 \quad (35)$$

$$r_{Тр} = \frac{10,8 \cdot 0,4^2}{1000^2} \cdot 10^6 = 1,73 \text{ мОм}$$

$$x_{Тр} = \sqrt{5,5^2 - \left(\frac{100 \cdot 10,8}{1000}\right)^2} \cdot \frac{0,4^2}{1000} \cdot 10^4 = 8,63 \text{ мОм}$$

Рассчитаем общее сопротивление цепи на примере точки К-3:

$$r_{сумм} = r_{кЛ2} + r_{Тр} + r_k + r_{ав} + r_{ТТ} \quad (35)$$

$$x_{\text{сумм}} = x_{\text{КЛ2}} + x_{\text{Тр}} + x_{\text{ав}} + x_{\text{ТТ}} + x_{\text{С}} \quad (36)$$

Подставляя вышеприведенные значения получаем:  $r_{\text{сумм}} = 28,33$  мОм,  
 $x_{\text{сумм}} = 20,75$  мОм

«Начальное действующее значение периодической составляющей трехфазного ТКЗ без учета подпитки от электродвигателей» [15]:

$$I_{\text{п0}} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3 \cdot (r_{\text{сумм}}^2 + x_{\text{сумм}}^2)}} \quad (37)$$

$$I_{\text{п0}} = \frac{400}{\sqrt{3 \cdot (4,59^2 + 9,39^2)}} = 6,576 \text{ кА}$$

«Угол сдвига по фазе напряжения (ЭДС источника) и периодической составляющей ТКЗ» [15]:

$$\varphi_{\text{с.ф}} = \arctg\left(\frac{x_{1\text{сумм}}}{r_{1\text{сумм}}}\right) \quad (38)$$

$$\varphi_{\text{с.ф}} = \arctg\left(\frac{28,33}{20,75}\right) = 0,939$$

Рассчитаем время от начала КЗ до появления ударного тока по выражению:

$$t_{\text{уд.т}} = 0,01 \cdot \frac{\frac{\pi}{2} + \varphi_{\text{с.ф}}}{\pi} \quad (39)$$

$$t_{\text{уд.т}} = 0,01 \cdot \frac{\frac{3,14}{2} + 0,939}{3,14} = 18,696 \cdot 10^{-3} \text{ с}$$

«Постоянная времени затухания апериодической составляющей ТКЗ» [15]:

$$T_{\text{а}} = \frac{x_{1\text{сумм}}}{r_{1\text{сумм}} \cdot \omega_{\text{с}}} \quad (40)$$



$$T_a = \frac{28,33}{20,75 \cdot 314} = 4,348 \cdot 10^{-3} \text{ с}$$

Ударный коэффициент:

$$K_{\text{удт}} = \left( 1 + \sin \varphi_{\text{с.ф}} \cdot e^{\frac{-t_{\text{уд.т}}}{T_a}} \right) \quad (41)$$

$$K_{\text{удт}} = \left( 1 + \sin(0,939) \cdot 2,71 \frac{-18,696 \cdot 10^{-3}}{4,348 \cdot 10^{-3}} \right) = 1,011$$

Ударный ток:

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot 6,576 \cdot 1,011 = 9,402 \text{ кА}$$

Расчет точки К-4 проведем по аналогии.

Полученные результаты занесем в таблицу 18.

Таблица 18 – Результаты расчетов трехфазного короткого замыкания

№	$U_{\text{срном}}$ , кВ	$r$ , МОм	$x$ , МОм	$\varphi_{\text{с.ф}}$	$T_a$ , $10^{-3}$ с	$I_{\text{п0}}$ , кА	$K_{\text{удт}}$	$i_{\text{уд}}$ , кА
К1	10,5	-	-	-	-	24,44 13,66	1,0 1,6	65,460
К2	10,5	-	-	-	-	6,593	1,4	13,053
К3	0,4	28,33	20,75	0,939	4,438	6,576	1,011	9,402
К4	0,4	123,28	24,25	1,377	16,19	1,838	1,284	3,337

Далее по полученным расчетам проведем выбор оборудования КТП.

### Выводы по разделу

В данном разделе были определены параметры ТКЗ для каждой из четырех точек трехфазного КЗ. Первая и вторая точка КЗ была задана на стороне выше 1 кВ. Первая точка КЗ имеет самый высокий ударный ток, а также обладает наибольшим начальным действующим значением периодической составляющей ТКЗ. По мере отдаления точек КЗ, ударный ток и начальное действующее значение периодической составляющей трехфазного ТКЗ снижается, поскольку полное сопротивление цепи становится выше.

Также в ходе проведения расчетов ТКЗ были составлены расчетные схемы и схемы замещения.

Полученные результаты расчетов необходимы для выбора оборудования КТП.

## 6 Выбор оборудования трансформаторных подстанций

Для выбора оборудования КТП воспользуемся каталожными данными.

[16]

Выберем для потребителей завода девять 2БКТП-1000/10/0,4-УХЛ1, состоящих из двух блоков (рисунок 7, 8).

Для проверки автоматических выключателей, разъединителей и трансформаторов тока БКТП нужно рассчитать ряд параметров.

Определим ток термической стойкости для точки К-3:

$$B_K = (I_{n0})^2 (T_a + t_{пво}) \quad (42)$$
$$B_K = 6,576^2 \cdot (4,438 + 30) \cdot 10^{-3} = 1,489 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

Время действия релейной защиты:

$$\tau = t_{рз} + t_{сво} \quad (43)$$
$$\tau = 0,01 + 0,04 = 0,05 \text{ с}$$

где  $t_{рз}$  – время срабатывания релейной защиты с;

$t_{сво}$  – время срабатывания выключателя на отключение, с.

Максимальное значение апериодической составляющей ТКЗ:

$$i_{a\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{n0} \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}} \quad (44)$$
$$i_{a\tau} = \sqrt{2} \cdot 6,576 \cdot 2,72^{\frac{-0,05}{4,438}} = 9,196 \text{ кА}$$

Номинальное значение апериодической составляющей:

$$i_{a\text{ном}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{ном.откл}} \cdot (1 + e^{-22,5\tau}) \quad (45)$$
$$i_{a\text{ном}} = \sqrt{2} \cdot 25 \cdot (1 + 2,72^{-22,5 \cdot 0,05}) = 46,833 \text{ кА}$$

где  $I_{\text{ном.откл}}$  – номинальный ток отключения выключателя, кА.

Полученные расчеты занесем в таблицу 19.

Таблица 19 – Расчетные и паспортные данные для оборудования ниже 1 кВ

Расчетные данные	С р а в н и в а е м ы й  П а р а м е т р	Автоматический выключатель	Трансформатор тока	Разъединитель
А	$I_n$	А	А	А
$I_{п0}=6,576$ кА	$I_{отк}$	кА	—	—
$i_{ат}=9,196$ кА	$i_{ан}$	833 кА	—	—
$i_{уд}=9,402$ кА	$i_{нрс}$	кА	кА	кА
$B_K=1,489$ кА <sup>2</sup> ·с	$B_K$	0 кА <sup>2</sup> ·с	0 кА <sup>2</sup> ·с	0 кА <sup>2</sup> ·с

Оборудование 2БКТП-1000/10/0,4-УХЛ1 прошло проверку по проведенным расчетам.

Проведем выбор оборудования для напряжения 10 кВ и занесем расчеты в таблицу 20. Расчет максимального рабочего тока будет рассчитывать исходя из мощности трансформаторов ГПП.

Таблица 20 – Расчетные и паспортные данные для оборудования 10 кВ

Расчетные данные	Автоматический выключатель	Трансформатор тока	Разъединитель
A	$I_{ном}$ А	$I_{ном}$ А	$I_{ном}$ А
кА	$I_{ном.откл}$ кА	–	–
$i_{от}=53,35$ кА	$i_{a.ном=7}$ кА	–	–
$i_{yd}=65,46$ кА	$i_{nрс}$ кА	$i_{nрс}$ кА	$i_{nрс}$ кА
$B_K=50,81$ кА <sup>2</sup> ·с	$B_K=0$ кА <sup>2</sup> ·с	$B_K=0$ кА <sup>2</sup> ·с	$B_K=0$ кА <sup>2</sup> ·с

В результате выбираем:

- Вакуумный выключатель: ВБЭ-10-31,5(40)/1600 [18];
- Разъединитель: РВЗ-10 1600 III УХЛ2 [19];
- Трансформаторы тока ТЛО-10 М1 [20].

Выбор остального оборудования подстанции осуществляется аналогично.

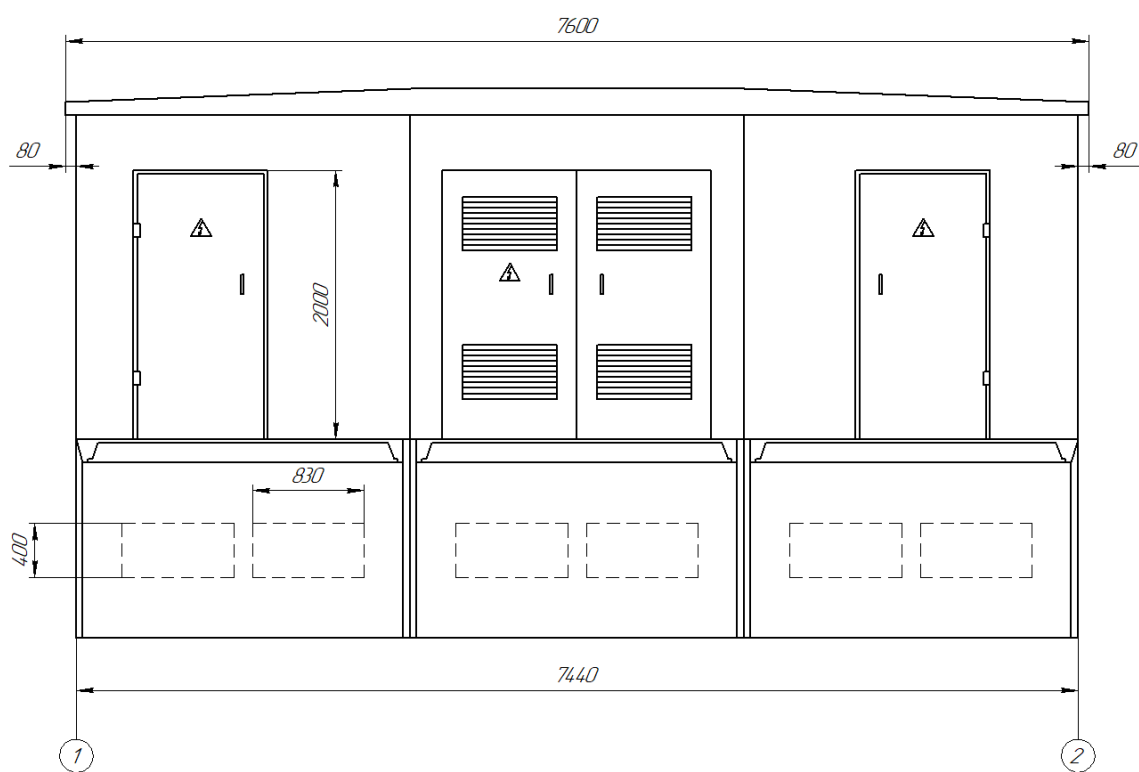
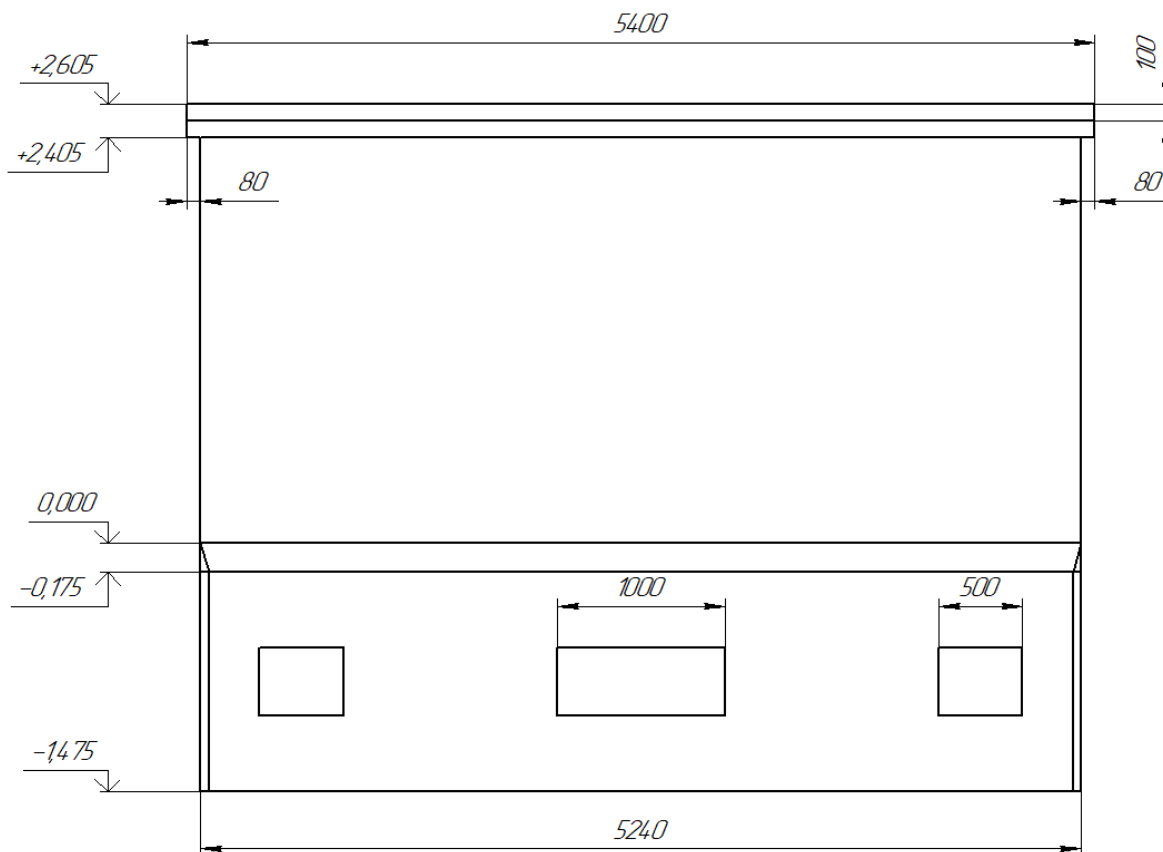


Рисунок 7 – План 2БКТП-1000/10/0,4-УХЛ1

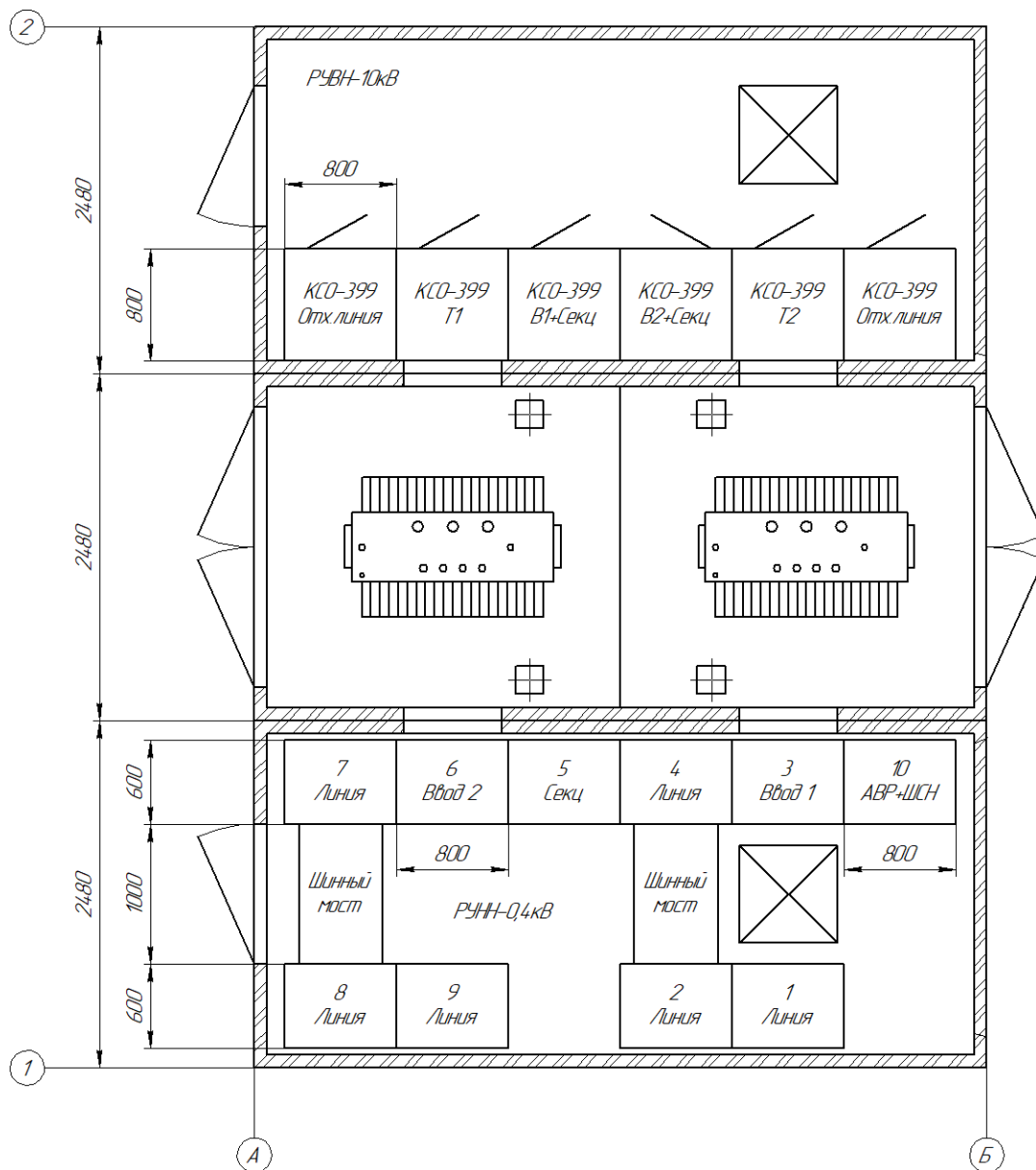


Рисунок 8 – Компоновка оборудования КТП №1

Теперь необходимо провести расчет заземления БКТП.

## 7 Расчет заземления и молниезащиты

Заземление необходимо для безопасной эксплуатации электроустановок. Расчет заземления проведем на примере БКТП.

Контур заземления необходимо выполнить непосредственно у всех БКТП, поскольку разрешается не использовать повторное заземление, если потребитель подключен к шинам по кабельным линиям. [17]

Сопротивление вертикального заземлителя:

$$R_{\text{вз}} = \frac{\rho_{\text{э}}}{2 \cdot \pi \cdot L_{\text{вз}}} \left( \ln \frac{2 \cdot L_{\text{вз}}}{d_{\text{вз}}} + 0,5 \cdot \ln \frac{4 \cdot T_{\text{вз}} + L_{\text{вз}}}{4 \cdot T_{\text{вз}} - L_{\text{вз}}} \right) \quad (46)$$
$$R_{\text{вз}} = \frac{100}{2 \cdot 3,14 \cdot 5} \left( \ln \frac{2 \cdot 5}{0,1} + 0,5 \cdot \ln \frac{4 \cdot 3 + 5}{4 \cdot 3 - 5} \right) = 16,07 \text{ Ом}$$

Сопротивление горизонтального заземлителя:

$$R_{\text{гз}} = \frac{\rho_{\text{э}}}{2 \cdot \pi \cdot L_{\text{гз}}} \cdot \ln \frac{2L_{\text{гз}}^2}{b_{\text{гз}} \cdot h_{\text{гз}}} \quad (47)$$
$$R_{\text{гз}} = \frac{100}{2\pi \cdot 5} \cdot \ln \frac{2 \cdot 5^2}{0,04 \cdot 0,5} = 24,9 \text{ Ом}$$

Полное сопротивление ЗУ:

$$R_{\text{зу}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\frac{k_{\text{испз.з.и}} \cdot n_{\text{з.и}}}{R_{\text{з.и}}}} \quad (48)$$
$$R_{\text{зу}} = \frac{1}{\frac{10 \cdot 0,69}{21,19} + \frac{1 \cdot 0,69}{24,9}} = 2,83 \text{ Ом}$$

В результате расчета получили, что сопротивление заземляющего устройства, состоящего из 10 вертикальных стержней, с расстоянием между ними 5 м, составляет 2,83 Ом.



В результате расчета получили, что сопротивление заземляющего устройства, состоящего из 10 вертикальных стержней, с расстоянием между ними 5 м, составляет 1,39 Ом.

Сопротивление заземляющего устройства составляет менее 4 Ом. [6]

Тип системы заземления на вводе в цеха – TN-C-S, а в распределительных и групповых сетях – TN-S. Данные системы заземления построены с применением глухозаземленной нейтрали. Характеризуются подключением нулевого проводника (N) к контуру заземления. При этом первый тип, на вводе в цех, характеризуется объединением защитного проводника PE и нулевого N в один комбинированный нуль (PEN) с подстанции, подключенного к глухозаземленной нейтрали. На вводе в цех PEN проводник разделяется на N и PE проводники. Система заземления в распределительных и групповых сетях является более безопасной, имеет разделенные защитные проводники PE и нулевые N.

Расчет заземления ГПП, цехов и потребителей завода осуществляется аналогично.

Проведем расчет молниезащиты для ГПП. Для защиты от прямых ударов молнии установим два молниеотвода. Молниеотводы установлены на анкерной опоре отходящей ЛЭП и на самой высокой точке ОРУ подстанции.

Активная высота молниеотвода:

$$h_A = h - h_x \quad (49)$$

$$h_A = 30 - 7 = 23$$

где  $h$  – высота молниеотвода, м;

$h_x$  – высота установки молниеотвода от уровня земли, м.

Зона защиты молниеотвода:

$$r_x = h_A \cdot \frac{1,6}{1+h_x/h_A} \cdot P \quad (50)$$

$$r_x = 23 \cdot \frac{1,6}{1+7/30} \cdot 1 = 29,84 \text{ м}$$

Наибольшая сторона зоны защиты:

$$h_0 = h - \frac{a}{7} \quad (51)$$

$$h_0 = 30 - \frac{52,8}{7} = 22,46 \text{ м}$$

где  $a$  – расстояние между молниеотводами, м.

Ширина зоны защиты:

$$b_x = 3 \cdot (h_0 - 1,25h_x) \quad (52)$$

$$b_x = 3 \cdot (22,46 - 1,25 \cdot 7) = 41,13 \text{ м}$$

На основании проведенных расчетов представим зону защиты на рисунке 9.

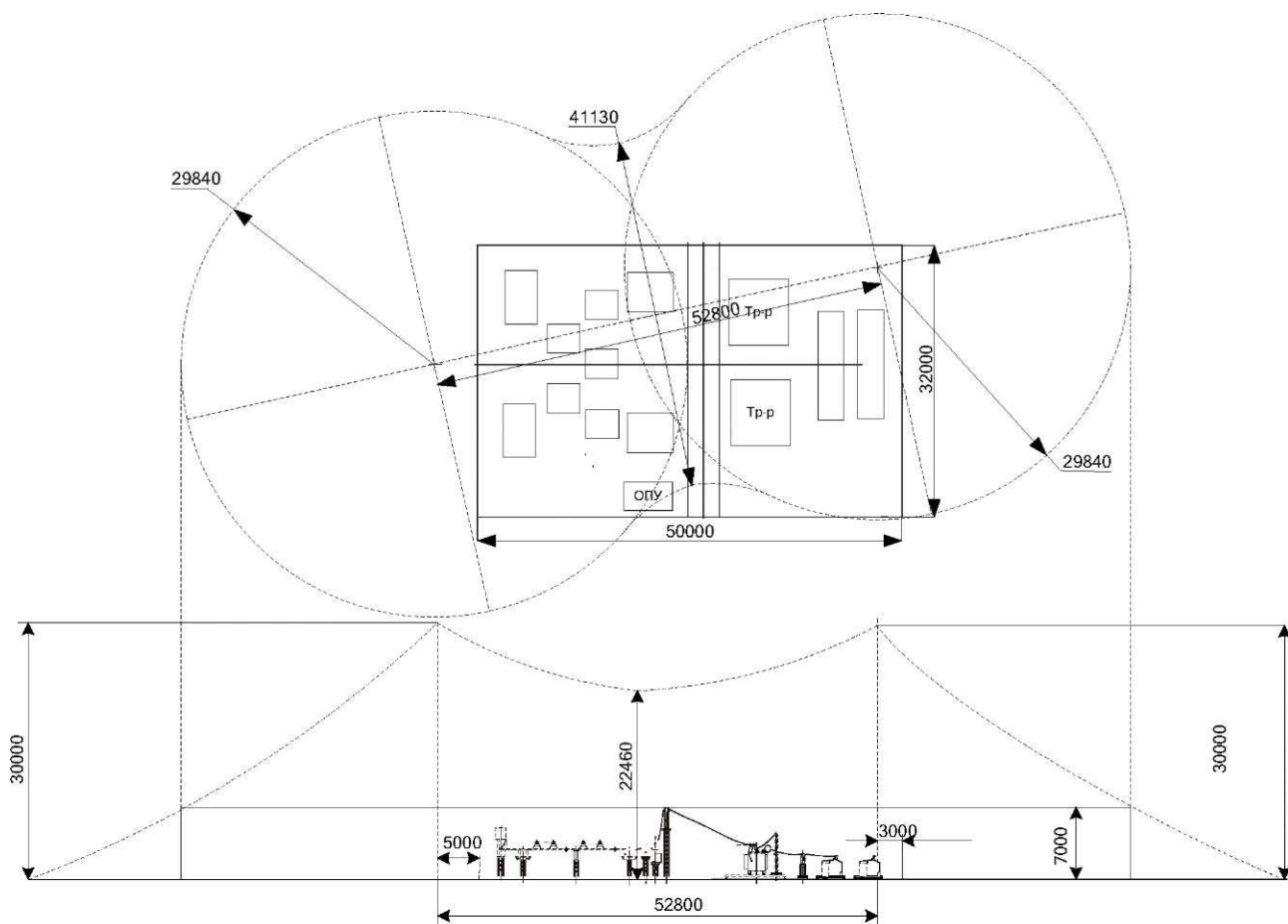


Рисунок 9 – Зона защиты молниеотводов

### Выводы по разделу

В ходе расчета заземляющего устройства, мы получили, что его сопротивление соответствует требованиям нормативно-технической документации.

Расчет молниезащиты проведенный на примере ГПП показал, что молниеотводы покрывают требуемую зону действия защиты от ударов молнии.

## Заключение

В данной ВКР было проведено проектирование системы электроснабжения группы цехов металлургического завода.

Процесс проектирования был начат с проведения расчета электрических нагрузок отдельных потребителей и цехов металлургического завода. Далее была рассчитана общая электрическая нагрузка потребителей с учетом нагрузки освещения.

Далее был проведен расчет мощности трансформаторов, количества КТП, определено их расположение на основании метода ЦЭН. В соответствии с полученными результатами и категориями надежности потребителей, было выбрано для сравнения 2 варианта электроснабжения потребителей и цехов завода: радиальная и магистральная схемы электроснабжения. Для данных вариантов были выбраны кабели и произведен расчет потерь напряжения при электроснабжении цехов. Потери напряжения являлись допустимыми для двух вариантов, но экономически выгодным являлся вариант с радиальной схемой электроснабжения цехов.

Далее были рассчитаны ТКЗ. Результаты расчетов были использованы для проверки защитного оборудования, обеспечивающего надежность электроснабжения. Выбор оборудования проводился в пункте 6. Проводилась проверка автоматических выключателей трансформаторных подстанций, трансформаторов тока, разъединителей. На стороне низкого напряжения были выбраны автоматические выключатели, обеспечивающие надежность и безопасность электроснабжения потребителей металлургического завода.

Затем проводился расчет заземления и молниезащиты потребителей завода. Проведенные расчеты приведены в пункте 7.

## Список используемых источников

1. Вакуумный выключатель [Электронный ресурс] : Официальный сайт НПП Контакт. URL: [http://www.kontakt-saratov.ru/vikl\\_vbe\\_10\\_31-5/konstrukciya\\_vbe\\_10\\_31-5/](http://www.kontakt-saratov.ru/vikl_vbe_10_31-5/konstrukciya_vbe_10_31-5/) (дата обращения: 28.02.2021).
2. ГОСТ 28249-93 Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением ниже 1 кВ [Электронный ресурс] : утв. приказом от 21.10.1993. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-28249-93> (дата обращения: 28.02.2021).
3. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения [Электронный ресурс] : введен в действие Приказом Росстандарта от 22.07.2013 N 400-ст. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301> (дата обращения: 28.02.2021).
4. ГОСТ 55706-2013 Освещение наружное утилитарное. Классификация и нормы (Переиздание) [Электронный ресурс] : утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 08.11.2013 N 1360-ст. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200105703> (дата обращения: 28.02.2021).
5. ГОСТ Р 52719-2007 Трансформаторы силовые. Общие технические условия [Электронный ресурс] : утв. приказом №60-ст от 09.04.2007. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200050072> (дата обращения: 28.02.2021).
6. ГОСТ Р 55710-2013 Освещение рабочих мест внутри зданий [Электронный ресурс]: утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 08.11.2013 N 1364-ст. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200105707> (дата обращения: 28.02.2021).
7. Защитные меры в электроустановках [Электронный ресурс] : Официальный сайт компании ООО «РесурсПромАльянс». URL: <https://www.ess-ltd.ru/elektrobezopasnost/zashchitnye-mery-v-elektrostanovkakh/> (дата обращения: 28.02.2021).
8. Каталог светильников GALAD [Электронный ресурс] :

Официальный сайт международной светотехнической корпорации GALAD.  
URL: <https://galad.ru/catalog/> (дата обращения: 02.01.2021).

9. Комплексные поставки кабельно-проводниковой и электротехнической продукции [Электронный ресурс] : Официальный сайт ЭлектроКомплект-Сервис. URL: <https://e-kc.ru/price/cable-apvbbshp> (дата обращения: 28.02.2021).

10. Номенклатурный каталог электрооборудования высокого, среднего и низкого напряжения [Электронный ресурс] : Каталог ПКФ «Автоматика». URL: <http://www.tulaavtomatika.ru/pdf/Nomenkl2014.pdf> (дата обращения: 28.02.2021).

11. НТП ЭПП-94 Проектирование электроснабжения промышленных предприятий [Электронный ресурс] : Нормы технологического проектирования (1 редакция) принятые Тяжпромэлектропроект от 01.01.1994. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200030085> (дата обращения: 02.01.2021).

12. ОРД 14.370-36-86 Указания по проектированию электрохозяйства металлургических заводов [Электронный ресурс] : Руководящий документ введен от 01.01.1987. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200062586> (дата обращения: 28.02.2021).

13. Правила устройства электроустановок. 7-е издание / Ред. Л.Л. Жданова, Н. В. Ольшанская. М.: НЦ ЭНАС, 2013. 104 с.

14. Разъединитель [Электронный ресурс] : Официальный сайт завода по производству высоковольтного оборудования «Высоковольтный союз». URL: <https://www.vsoyuz.com/ru/produkcija/razediniteli/razediniteli-10-kv/disconnectors-rvz.htm> (дата обращения: 28.02.2021).

15. Расчет сетей по потерям напряжения [Электронный ресурс] : интернет-сайт. URL: <http://electricalschool.info/main/elsnabg/905-raschet-setejj-po-poterjam-naprjazhenija.html> (дата обращения: 01.06.2021).

16. Расчет сетей по потерям напряжения [Электронный ресурс] : интернет-сайт. URL: <http://electricalschool.info/main/elsnabg/905-raschet-setejj-po-poterjam-naprjazhenija.html> (дата обращения: 28.02.2021).

17. РТМ 36.18.32.4-92 Указания по расчету электрических нагрузок [Электронный ресурс] : Руководящий технический материал утв. техническим циркуляром ВНИПИ Тяжпромэлектропроект от 30.07.1992 N 359-92. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200032239> (дата обращения: 28.02.2021).

18. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение [Электронный ресурс]: Свод правил. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95 утв. Приказом Минстроя России от 07.11.2016 N 777/пр. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456054197> (дата обращения: 28.02.2021).

19. Стоимость проведения электромонтажных работ [Электронный ресурс] : Официальный сайт группы компаний ЭнергоСнабСтрой. URL: <https://04-110kv.ru/nashi-tseny> (дата обращения: 28.02.2021).

20. Трансформаторы тока ТЛО-10 М1 [Электронный ресурс] : Официальный сайт ООО «Электрощит-Ко». URL: [http://www.kztt.ru/catalog/transformatori\\_toka/tlo-10\\_on\\_3-10\\_kv/1/](http://www.kztt.ru/catalog/transformatori_toka/tlo-10_on_3-10_kv/1/) (дата обращения: 28.02.2021).

21. Daza S.A. Electric Power System Fundamentals. London: Artech House, 2016. 388 p.

22. Fofana I., Hadjadj Y. Electrical-Based Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers. Power Transformer Diagnostics, Monitoring and Design Features, 2016. 256 p.

23. Khan S., Ahmed G. Industrial power systems. Boca Raton: CRC Press, 2016. 488 p.

24. Rexhepi V. An Analysis of Power Transformer Outages and Reliability Monitoring. Technical University of Sofia, Faculty of Electrical Engineering, Boulevard "Sveti Kliement Ohridski" 8, Sofia, 1000, Bulgaria, 2017. 418 p.

25. Surya S., Wayne Beaty H. Standard Handbook for Electrical Engineers, Seventeenth Edition. - McGraw Hill Professional, 2017. 368 p.