

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 Электроснабжение тракторостроительного завода

Обучающийся

Д. А. Мишин

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.п.н., доцент, М.Н. Третьякова

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Консультант

к.филол.н., доцент, О.В. Мурдускина

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2022

## Аннотация

Темой ВКР является «Электроснабжение тракторостроительного завода».

В данной работе проведен расчет нагрузок цехов завода и расчетные нагрузки в целом, определены число и мощность цеховых трансформаторов, рассчитаны и выбраны компенсирующие устройства, выбраны схемы внешнего и внутреннего электроснабжения, определены марки и сечение вводного и внутривозовских кабелей

Далее были определены токи КЗ в заданных точках схемы электроснабжения завода.

По рассчитанным токам КЗ были выбраны и проверены электрические аппараты. Аппараты были проверены по условию номинального напряжения, тока, термической и электродинамической стойкости. Автоматические выключатели также были проверены на отключающую способность, а трансформаторы тока и напряжения были проверены на условие полной мощности вторичной нагрузки приборов.

Рассчитана релейная защита цехового трансформатора; кабельных линий 10 кВ и устройство АВР.

ВКР содержит 57 страниц, 13 таблиц, 5 рисунков, шесть чертежей, выполненных на форматах листа А1

## **Abstract**

The title of the thesis is " Power supply of the tractor plant".

The initial data are the power receivers of the plant for the production of building materials, their rated power, utilization factors and power factors, the plan of the plant.

To improve the energy efficiency of a plant for the production of building materials, the calculation of electrical loads was carried out using the example of an aerated concrete block shop to assess the parameters of the power supply scheme, increase the power factor, and recalculate the lighting system. The energy efficiency of the power supply system of the plant for the production of building materials was checked. Next, the calculation and selection of compensating devices was carried out to reduce the reactive power in the network.

Then a feasibility study was carried out for the introduction of automation tools to reduce transformer losses.

With regard to the implementation of measures to improve the energy efficiency of the use of thermal energy, then the calculation of the thermal insulation of pipelines was carried out.

## Содержание

Введение .....	5
1 Расчет электрических нагрузок .....	6
2 Построение картограммы электрических нагрузок .....	12
3 Определение числа и мощности ТП и выбор компенсирующих устройств 0,4 кВ.....	14
4 Выбор схем электроснабжения .....	19
4.1 Выбор схемы внешнего электроснабжения .....	19
4.2 Выбор схемы внутреннего электроснабжения .....	21
5 Расчет токов КЗ .....	26
5.1 Составление схемы замещения и расчет её параметров .....	26
5.2 Определение токов КЗ.....	28
6 Выбор и проверка электрооборудования .....	31
6.1 Выбор и проверка шин .....	31
6.2 Выбор и проверка изоляторов .....	33
6.3 Выбор измерительных трансформаторов напряжения .....	34
6.4 Выбор и проверка трансформаторов тока.....	35
6.5 Выбор и проверка вакуумных выключателей.....	39
6.6 Выбор вводных автоматических выключателей 0,4 кВ .....	42
7 Выбор и расчет устройств релейной защиты и автоматики .....	43
7.1 Цепи оперативного тока.....	43
7.2 Выбор автоматических выключателей.....	44
7.3 Защита плавкими предохранителями .....	46
7.4 Защита кабельной линии КЛ 2 (А2) .....	47
7.5 Защита кабельной линии КЛ1 (А1) .....	50
7.6 Устройство автоматического включения резерва .....	53
Заключение .....	55
Список используемых источников.....	56

## Введение

Тракторный завод выпускает гусеничные трактора, и большой набор съёмного оборудования. По своей структуре завод имеет основные и вспомогательные цеха, а также административные и бытовые сооружения.

Системы электроснабжения промышленных предприятий создаются для обеспечения питания электроэнергией промышленных приёмников электрической энергии. Проектирование является заключительным этапом обучения и направлено на систематизацию и расширение теоретических знаний, развитие аналитического и творческого мышления, на закрепление навыков использования технической и нормативно-технической литературой и выполнение расчетно-графических работ.

Объектом проектирования является тракторостроительный завод, который состоит из 15 корпусов. Источником питания является двух трансформаторная подстанция 110/35/10 кВ, мощность каждого трансформатора 25000 кВА, она удалена от предприятия на 1,5 км. Мощность трехфазного короткого замыкания на стороне высшего напряжения подстанции энергосистемы 3200 МВА. Экономическое значение реактивной мощности, передаваемой предприятию от энергосистемы в режиме её максимальных нагрузок 2,34 Мвар.

Целью ВКР является обеспечение электроснабжения тракторостроительного завода.

Задачами данной работы являются:

- рассчитать расчетную мощность предприятия исходя из исходных данных;
- построить картограммы нагрузок для определения места расположения распределительного пункта высшего напряжения;
- рассмотреть вопрос о компенсации реактивной мощности;
- выбрать надежное оборудование и спроектировать защиту от ненормальных режимов работы электрооборудования.

## 1 Расчет электрических нагрузок

Расчет нагрузок проведем методом коэффициента спроса [12].  
Параметры электроприемников (ЭП) данного цеха приведены в таблице 1.

Ниже представлен алгоритм расчета нагрузок.

- Активная и реактивная расчетные силовые нагрузки цеха:

$$P_{\text{рсч}} = K_c \cdot P_{\text{уст}} \quad (1)$$

$$Q_{\text{рсч}} = P_{\text{рсч}} \cdot \text{tg}\varphi \quad (2)$$

где « $P_{\text{уст}}$  – суммарная установленная активная мощность всех приёмников цеха, принимаемая по исходным данным (кВт);

$K_c$  – коэффициент спроса, принимаемый по справочным данным;

$\text{tg}\varphi$  – характерное для приёмников данного цеха средневзвешенного значения коэффициента реактивной мощности» [20].

- Расчетная активная нагрузка осветительных приёмников цеха и территории завода:

$$P_{\text{рсч.о}} = K_{\text{с.о}} \cdot P_{\text{уст.о}} \quad (3)$$

где  $P_{\text{рсч.о}}$  – установленная мощность осветительных электроприёмников (кВт);

$K_{\text{с.о}}$  – коэффициент осветительных нагрузки, принимаемой по справочным данным.

Таблица 1 – Сводная ведомость электрооборудования ремонтно-механического цеха (РМЦ)

Участок	Технологическое оборудование		№ по плану	Тип электрооборудования	Номинальные Параметры электрооборудования			
	Тип	Р <sub>уст</sub> , кВт			Р <sub>ном</sub> , кВт	cos φ	η (%)	Ip/Inо м
Электроремонтный	Универсальные электроремонтные стенды	4×3,5	1-4	-	-	-	-	-
		6×5,2	5-10	-	-	-	-	-
		5×7	11-15	-	-	-	-	-
		2×10	16,17	-	-	-	-	-
	Универсальные металлорежущие станки	2×10	18,19	АИР 132 М2	11	0,9	88	7,5
		1×14,5	20	АИР 180 М8	15	0,82	89	5,5
		3×18	21-23	АИР180 М6	18	0,85	89,5	6,5
	Вентиляторы	3×5,5	24-26	АИР 100 L2	5.5	0.89	88	7.5
	Печь сопротивления	1×35	27	-	-	-	-	-
	Сварочный	Станки металлорежущие	2×1,2	28,29	АИР 71 В2	1,1	0,83	79
2×2,5			30,31	АИР 80 В2	2,2	0,85	83	7
3×5			32-34	АИР 100 L2	5,5	0,89	88	7,5
Машины дуговой сварки		4×9	35-38	ТДП-1	11,4	0,5	-	-
		1×18	39	ТД-306 У2	17,5	0,8	-	-
		1×24	40	ТД-502 У2	26,6	0,6	-	-
Вентилятор		5×7,5	41-45	АИР 112 М2	7,5	0,88	87,5	7,5
		3×11	46-48	АИР 132 М2	11	0,9	88	7,5
Кран-балки		2×30	49,50	АИР 180 М2	30	0,9	91,5	7,5

- Номинальная осветительная нагрузка:

$$P_{\text{ном.о}} = S \cdot P_{\text{уд.о}} \quad (4)$$

где  $P_{\text{уд.о}}$  – удельная осветительная нагрузка (0,015 кВт/м<sup>2</sup>) [13];

$S$  – площадь цеха (м<sup>2</sup>).

- Расчетная реактивная нагрузка осветительных приёмников [4]:

$$Q_{\text{рсч.о}} = Q_{\text{рсч.о}} \cdot \text{tg}\varphi \quad (5)$$

где  $\text{tg}\varphi = 0,53$  принимают для ламп ДРЛ с учетом компенсации реактивной нагрузки в осветительной сети [6].

- Расчетная полная мощность силовых и осветительных приёмников цеха:

$$S_{\text{рсч.з}} = \sqrt{(P_{\text{рсч}} + P_{\text{рсч.о}})^2 + (Q_{\text{рсч}} + Q_{\text{рсч.о}})^2} \quad (6)$$

- Максимальный расчетный ток

$$I_{\text{р}} = \frac{S_{\text{р}}}{\sqrt{3}U_{\text{н}}} \quad (7)$$

Расчеты, проведенные по данному алгоритму приведены в таблице 2.



Таблица 2 – Расчет электрических нагрузок цехов завода

№ цеха по плану	Наименование цеха	Силовая нагрузка					Осветительная нагрузка					Суммарная нагрузка		
		$P_{уст}$	$K_c$	$\cos\varphi / \text{tg}\varphi$	$P_{р\text{сч}}$	$Q_{р\text{сч}}$	$S$	$P_{уст.ос}$	$K_{с.о}$	$Q_{р\text{сч.о}}$	$P_{р\text{сч.о}}$	$P_{р\text{сч}} + P_{р\text{сч.о}}$	$Q_{р\text{сч}} + Q_{р\text{сч.о}}$	$S_{р\text{сч.з}}$
		кВт			кВт	квар	$\text{м}^2$	кВт		квар	кВт	кВт	квар	кВА
1	Проходная	20	0,85	0,9/ 0,48	17	8,16	324	4,86	0,85	1,36	4,13	21,13	9,52	23,2
2	Механический цех №1	3712	0,68	0,5/ 1,73	2524,2	4366,8	4140	62,1	0,85	17,42	52,79	2577	4384	5085,3
3	Литейная цветного литья	1350	0,6	0,6/ 1,33	810	1077,3	6876	103,14	0,85	28,93	87,67	897,7	1106	1424,5
4	Кузнечный цех	2560	0,6	0,55/ 1,52	1536	2934,7	2484	37,26	0,85	10,45	31,67	1567,7	2345	2820,8
5	Склад готовой продукции	80	0,45	0,75/ 0,88	36	31,68	6534	98,02	0,6	19,41	58,81	94,81	51,1	107,7
6	Управление завода	100	0,9	0,95/ 0,33	90	29,7	2034	30,51	0,9	9,06	27,46	117,46	39	123,8
7	Столовая	300	0,8	0,9/ 0,48	240	115,2	2772	41,58	0,9	12,35	37,42	277,42	127,6	305,4
8	ЦЗЛ и КБ	420	0,9	0,95/ 0,33	378	124,7	4212	63,18	0,9	18,76	56,86	434,86	143,5	458

Продолжение таблицы 2

№ цеха по плану	Наименование цеха	Силовая нагрузка					Осветительная нагрузка					Суммарная нагрузка		
		$P_{уст}$	$K_c$	$\cos\varphi / \text{tg}\varphi$	$P_{р\text{сч}}$	$Q_{р\text{сч}}$	$S$	$P_{уст.ос}$	$K_{с.о}$	$Q_{р\text{сч.о}}$	$P_{р\text{сч.о}}$	$P_{р\text{сч}} + P_{р\text{сч.о}}$	$Q_{р\text{сч}} + Q_{р\text{сч.о}}$	$S_{р\text{сч.з}}$
		кВт			кВт	квар	$\text{м}^2$	кВт		квар	кВт	кВт	квар	кВА
9	РМЦ	471	0,5	0,65/ 1,17	235,5	275,5	2574	38,61	0,85	10,83	32,82	268,32	268	392,2
10	Гараж	150	0,4	0,6/ 1,33	60	79,8	2700	40,5	0,85	11,36	34,43	94,43	91,2	131,3
11	Механический цех №2	3712	0,68	0,5/ 1,73	2524,2	4366,8	4077	61,16	0,85	17,16	51,99	2576,2	4384	5085
12	Литейная черного литья	1420	0,6	0,65/ 1,17	852	996,8	7722	115,83	0,85	32,49	98,46	950,46	1029,3	1401
13	Цех термической обработки	3220	0,62	0,7/ 1,02	1996,4	2036,3	4455	66,83	0,85	18,75	56,81	2053,21	2055	2905
14	Компрессорная	250	0,75	0,85/ 0,62	187,5	116,25	1440	21,6	0,85	6,06	18,36	205,86	122,3	239,5
15	Насосная	600	0,75	0,8/ 0,75	450	337,5	1440	21,6	0,85	6,06	18,36	468,36	343,6	580,9
Итого:					11937	16297	—			220,39	668,04	12605	16517,6	20777,7

Вывод по разделу.

При расчете электрических нагрузок цехов тракторостроительного завода применен метод коэффициента спроса. Помимо метода коэффициента спроса, расчет освещения проводился также методом удельной мощности.

В нагрузку освещения входит:

- Рабочее и аварийное освещение цехов тракторостроительного завода;
- Уличное освещение прилегающих территорий к цехам, а также к тракторостроительному заводу в целом.

Потребителями тракторостроительного завода, обладающими самой большой нагрузкой, являются:

- Кузнечный цех;
- Цех термической обработки;
- Механические цеха.

Полная мощность тракторостроительного завода в результате расчетов составляет 20778 МВА.

## 2 Построение картограммы электрических нагрузок

«С целью определения места расположения ГРП строим картограмму электрических нагрузок. Картограмма представляет собой размещение на генплане завода окружностей, являющиеся расчетными активными нагрузками цехов». [11] Радиусы окружности для каждого круга:

$$r_i = \sqrt{\frac{P_{рсчi} + P_{рсчoi}}{\pi t}} \quad (8)$$

«Центр нагрузок принимается совпадающим с центром тяжести цеха, нагрузка – равномерно распределенной по площади цеха. Доля осветительной нагрузки показывается в виде сектора». [11] Угол сектора:

$$\alpha_{\tau} = \frac{P_{рсч.о}}{P_{\Sigmaрсч}} \cdot 360^{\circ} \quad (9)$$

Площадь окружностей соответствует масштабу:  $t = 0,7$  кВт/мм<sup>2</sup>.  
Результаты расчета сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Расчетные данные для построения картограммы нагрузок

№ цеха по плану	$P_{рсчi} + P_{рсчoi}$	$P_{рсчoi}$	$r_i$	$\alpha_{\tau}$
	кВт	кВт	мм	%
1	21.13	4.13	3	70
2	2577	52.79	34	7
3	897.7	87.67	20.2	35
4	1567.7	31.67	26.7	7
5	94.81	58.81	6.6	223
6	117.46	27.46	7.3	84
7	277.42	37.42	11.2	48,5
8	424,86	56,86	14	47
9	268,32	32,82	11	44
10	94,43	34,43	6,5	131
11	2576,2	51,99	34	7
12	950,46	98,46	20,8	37
13	2053,21	56,81	30,6	10
14	205,86	18,36	9,7	32
15	468,36	18,36	14,6	14

На основании координат и нагрузок цехов находим координаты ЦЭН:

$$x_0 = \frac{S_{рсчi} \cdot x_i}{S_{рсчi}} \quad (10)$$

$$y_0 = \frac{S_{рсчi} \cdot y_i}{S_{рсчi}} \quad (11)$$

где  $x_0, y_0$  – координаты центра нагрузок завода, м;

$y_i$  и  $x_i$  – координаты центра нагрузок  $i$  цеха, м;

$S_{рсчi}$  – расчетная нагрузка  $i$  цеха, кВА.

Результаты расчета приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Расчетные данные для определения координат ЦЭН завода

№ цеха по плану	$S_{рсчi}$	$x_i$	$y_i$	$S_{рсчi} \cdot x_i$	$S_{рсчi} \cdot y_i$
	кВА	м	м	кВА·м	кВА·м
1	23,2	10	330	232	7656
2	5085,3	85	270	432250,5	1373031
3	1424,5	245	285	349002,5	405982,5
4	2820,8	340	290	959072	818032
5	107,7	445	305	47926,5	32848,5
6	123,8	10	210	1238	25998
7	305,4	130	195	39702	59553
8	458	260	195	119080	89310
9	392,2	440	175	172568	68635
10	131,1	15	75	1969,5	9847,5
11	5085	100	10	508500	50850
12	1401	260	110	364260	154110
13	2905	360	75	1045800	217875
14	239,5	440	110	105380	26345
15	580,9	440	50	255596	29045
Итого	20777,7	–		4402577	3369118,5

Вывод по разделу

Расчет ЦЭН позволяет построить картограмму нагрузок и разместить оборудование для электроснабжения потребителя наиболее оптимально, снизить потери в электросетях.

### 3 Определение числа и мощности ТП и выбор компенсирующих устройств 0,4 кВ

Завод располагается в г. Самара. Данной климатической зоне характерна скорость ветра 32 м/с, толщиной гололеда 25 мм, с грозовой активностью 40-60 часов [10]. Завод относится к среднему по величине мощности предприятию. Рациональное напряжение определяем по формуле:

$$U = 3\sqrt{S_k} + 0,5l \quad (12)$$

$$U = 3\sqrt{6,8} + 0,5 \cdot 1,5 = 8,5 \text{ кВ},$$

где  $l$  – расстояние от подстанции энергосистемы до предприятия, км.

Принимаем к использованию напряжение питания завода 10 кВ. Это позволяет обойтись без заводской понизительной подстанции, т.к. на подстанции энергосистемы низшим напряжением является 10 кВ [17].

«Выбор числа и мощности силовых трансформаторов промышленных предприятий должен быть технически и экономически обусловлен, т.к. он оказывает существенное влияние на рациональное построение схем промышленного электроснабжения» [9].

При сооружении ЦТП предпочтение следует отдавать комплектным трансформаторным подстанциям КТП. Для нашего завода используем двух трансформаторные КТП. При выборе мощности трансформаторов учитываем, что их коэффициент загрузки находится в пределах 0,6-0,8. Произведем выбор трансформаторов для ТП-1. ТП-1 питает: часть механического цеха №1, проходную, заводоуправление, столовую:

$$S_{\text{срч ТП-1}} = 1691,6 + 23,2 + 123,8 + 305,4 = 2144 \text{ кВА}.$$

Выбираем мощность трансформаторов:

$$S_{T \text{ ном}} = \frac{S_{\text{рсч}i}}{k_3 n} \quad (13)$$

$$S_{T \text{ ном}} = \frac{2144}{2 \cdot 0,7} = 1531 \text{ кВА},$$

где  $k_3$  – коэффициент загрузки трансформатора;

$n$  – количество трансформаторов на подстанции.

Выбираем два трансформатора с  $S_{T \text{ ном}} = 1600$  кВА.

Проверяем по коэффициенту экономической загрузки:

$$k_3 = \frac{S_{\text{рсч}i}}{2S_{T \text{ ном}}} \quad (14)$$

$$k_3 = \frac{2144}{2 \cdot 1600} = 0,67$$

Проверяем по условию послеаварийного режима:

$$k_{\text{пер}} S_{T \text{ ном}} \geq S_{\text{рсч}} \quad (15)$$

$$1,4 \cdot 1600 = 2240 > 2144 \text{ кВА},$$

где  $k_{\text{пер}}$  – коэффициент перегрузки.

Проверим выбор КУ для ТП -1:

$$Q_{\text{ку}} = Q_p + Q_c, \quad (16)$$

где  $Q_p$  – реактивная мощность, получившаяся в результате расчета нагрузок, квар;

$Q_c$  – реактивная мощность, потребляемая из системы, квар.

$$Q_c = P_p \text{tg} \varphi_{\text{ку}}, \quad (17)$$

где  $P_p$  – активная мощность, получившаяся в результате расчета нагрузок, кВт;

$tg\varphi_{ky} = 0,33$  – коэффициент мощности КУ.

$$Q_c = 0,33(893,5+17+90+240) = 391,5 \text{ квар,}$$

$$Q_p = 1452,4+8,16+29,7+115,2 = 1605,5 \text{ квар,}$$

$$Q_{ky} = 1605,5-391,5 = 1214 \text{ квар.}$$

Принимаем КУ: УКЛ(П)Н – 0,38 – 600 – 150У3 – 2шт [7].

Расчетная мощность с учетом КУ:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + (Q_p - Q_{ky})^2}, \quad (18)$$

где  $Q_{ky}$  – номинальная мощность КУ, квар.

$$S_{p1} = \sqrt{1186,5^2 + (1605,5 - 1200)^2} = 1254 \text{ кВА.}$$

Теперь произведем выбор трансформаторов с учетом мощности КУ:

$$S_{T \text{ ном}} = \frac{1254}{2 \cdot 0,7} = 896 \text{ кВА.}$$

Принимаем трансформаторы с  $S_{T \text{ ном}} = 1000$  кВА [5].

$$K_{з \text{ фак}} = \frac{1254}{2 \cdot 1000} = 0,63.$$

$$1,4 \cdot 1000 = 1400 > 1254 \text{ кВА.}$$

Итак, для ТП-1 окончательно принимаем трансформаторы  $2 \times S_{T \text{ ном}} = 1000$  кВА. Для других ТП выбор трансформаторов ведем, аналогично, и результаты заносим в таблицу 5 и таблицу 6.

Полная мощность завода с учетом компенсации реактивной мощности:

$$Q_{ky} = Q_3 - Q_э, \quad (19)$$



где  $Q_3$  – экономическое значение реактивной мощности, передаваемой предприятию от энергосистемы в режиме её максимальных нагрузок, квар.

$$Q_{ку} = 19485,8 - 2340 = 17145,8 \text{ квар.}$$

$$S_3 = \sqrt{P_3^2 + (Q_3 - Q_{ку})^2}. \quad (20)$$

$$S_3 = \sqrt{13198,6^2 + (19485,8 - 17145,8)^2} = 13404,6 \text{ кВА.}$$

Таблица 5 – Выбор числа и мощности трансформаторов

№ ТП	Потребители	$S_{рчТПi}$	$Q_{ку n}$	$S_{рТПi}$ с учетом КУ	$n \times S_{Т ном}$	кЗ
		кВА	квар	кВА	шт кВА	
ТП-1	Часть механического цеха №1 Проходная Заводоуправление Столовая	2144	1200	1254	2×1000	0,63
ТП-2	Часть механического цеха №1	2144	1480	1117,5	2×1000	0,58
ТП-3	Часть механического цеха №1	1250	849	660	2×400	0,58
ТП-4	Литейная цветного Литья	1424,5	798	857	2×630	0,68
ТП-5	Часть кузнечного цеха ЦЗЛ и КБ	2240	1122	1431	2×1000	0,715
ТП-6	Часть кузнечного цеха Склад готовой продукции Ремонтный цех	1538,7	880	884	2×630	0,7
ТП-7	Часть механического цеха №2 Гараж	2000	1350	1041	2×630	0,8
ТП-8	Часть механического цеха №2	2000	1371	1020	2×630	0,8
ТП-9	Часть механического цеха №2	1216,3	831	644	2×400	0,8
ТП-10	Литейная черного литья	1401	712	898	2×630	0,71
ТП-11	Часть цеха термической обработки	2240	1050	1625	2×1000	0,8
ТП-12	Часть цеха термической обработки Компрессорная Насосная	1485,4	540	159	2×1000	0,6
Итого				12560	–	

Таблица 6 – Количество и мощность конденсаторных батарей [7]

№ ТП	$Q_{pкy}$	Тип ККУ	Кол-во	$Q_{\Sigma кy н}$
	квар			квар
ТП-1	1214	УКЛ(П)Н – 0,38 – 600 – 150У3	2	1200
ТП-2	1484	УКЛ(П)Н – 0,38 – 600 – 150У3	2	1480
		ККУ – 0,38 – 280 – Vc – ИО2	1	
ТП-3	869	УКЛ(П)Н – 0,38 – 450 – 108У3	1	849
		УКЛ(П)Н – 0,38 – 324 – 108У3	1	
		УКН – 0,38 – 75 – У3	1	
ТП-4	810	УКЛ(П)Н – 0,38 – 324 – 108У3	2	798
		УКН – 0,38 – 150У3	1	
ТП-5	1155	УКЛ(П)Н – 0,38 – 324 – 108У3	3	1122
		УКН – 0,38 – 150У3	1	
ТП-6	890	УКЛ(П)Н – 0,38 – 600 – 150У3	1	880
		ККУ – 0,38 – 280 – Vc – ИО2	1	
ТП-7	1357	УКЛ(П)Н – 0,38 – 600 – 150У3	2	1350
		УКН – 0,38 – 150У3	1	
ТП-8	1389	УКЛ(П)Н – 0,38 – 324 – 108У3	4	1371
		УКН – 0,38 – 75 – У3	1	
ТП-9	848	УКЛ(П)Н – 0,38 – 432 – 108У3	1	831
		УКЛ(П)Н – 0,38 – 324 – 108У3	1	
		УКН – 0,38 – 75 – У3	1	
ТП-10	716	УКЛ(П)Н – 0,38 – 432 – 108У3	1	712
		ККУ – 0,38 – 280 – Vc – ИО2	1	
ТП-11	1062	УКЛ(П)Н – 0,38 – 600 – 108У3	1	1050
		УКЛ(П)Н – 0,38 – 450 – 108У3	1	
ТП-12	559	УКЛ(П)Н – 0,38 – 432 – 108У3	1	540
		УКЛ – 0,38 – 108 – У3	1	

Параметры выбранных силовых трансформаторов представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Паспортные данные выбранных трансформаторов

Тип	$S_{ном}$	$U_{вн}$	$U_{нн}$	$\Delta P_{хх}$	$\Delta P_{кз}$	$I_{хх}$	$U_k$
	кВА	кВ	кВ	кВт	кВт	%	%
ТМЗ – 1000/10	1000	10	0,4	1,9	12,2	1,7	5,5
ТМЗ – 630/10	630	10	0,4	1,25	7,9	1,7	5,5
ТМЗ – 400/10	400	10	0,4	0,9	5,5	1,8	4,5

Вывод по разделу.

Для электроснабжения тракторостроительного завода принято 12 ТП с двумя трансформаторами, и конденсаторными батареями для компенсации реактивной мощности.

## 4 Выбор схем электроснабжения

### 4.1 Выбор схемы внешнего электроснабжения

В связи с небольшой удаленностью предприятия от районной подстанции и наличием на ней низшего напряжения 10кВ, то осуществляем питание с помощью кабельных линий. Далее проводим выбор сечения вводного кабеля для главного распределительного пункта (ГРП).

Выбор сечения производим по экономической плотности тока. Исходя из всей потребляемой мощности завода  $S_3 = 13404,6$  кВА рассчитаем нагрузку на одну секцию:

$$I_{\text{рсч кл}} = \frac{0,5 \cdot S_3}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{сном}}} \quad (21)$$
$$I_{\text{рсч кл}} = \frac{0,5 \cdot 13406,6}{\sqrt{3} \cdot 10} = 363 \text{ А}$$

Экономическое сечение определяется:

$$F = \frac{I_{\text{ркл}}}{j_3} \quad (22)$$
$$F = \frac{363}{1,4} = 259 \text{ мм}^2$$

где  $j_3 = 1,4$  А/мм<sup>2</sup> – экономическая плотность тока.

Предварительно принимаем кабель 2×ААБ – 10 (3×120).

Проверку ведем по утяжеленному режиму. При выходе из строя одной питающей линии, другая может быть перегружена не более, чем на 30%.

$$I_{\text{дл.доп}} \geq 1,3 I_{\text{рсчкл}} \quad (23)$$
$$480 > 1,3 \cdot 363;$$
$$480 > 471,9 \text{ А.}$$

Загрузка кабеля:  $k_3 = \frac{363}{2 \cdot 240} = 0,76$ .

При выборе сечения учитываем термическую стойкость при КЗ

$$F_{T \min} = \frac{\sqrt{B_K}}{c} = \frac{\sqrt{(I_{K3}^{(3)})^2 \cdot t_{K3}}}{c}. \quad (24)$$

Для определения  $I_{K3}^{(3)}$  на шинах районной подстанции необходимо знать сопротивление и ЭДС системы и сопротивление трансформатора 110/10. Точка КЗ на шинах районной ТП-К1; на шинах ГРП-К2.

Так как расчеты по КЗ на стороне ВН не велись, то принимаем:

$$E_c = \frac{10,5}{\sqrt{3}} = 6,06 \text{ кВ.}$$

Так как известна мощность трехфазного короткого замыкания на стороне ВН подстанции энергосистемы, то:

$$Z'_{1C} = \frac{U_{\text{ср.В}}^2}{S_K^2} \left( \frac{U_{\text{НОМ.Н}}}{U_{\text{НОМ.В}}} \right)^2 \quad (25)$$

$$Z'_{1C} = \frac{115^2}{5200} \left( \frac{10,5}{115} \right)^2 = 0,021 \text{ Ом.}$$

Так как не задан ударный ток, то принимаем  $R_{1C} = 0$ , тогда  $X_{1C} \approx Z_{1C}$   
Паспортные данные трансформатора 25 МВА:

$P_{\text{ХХ}} = 28,5 \text{ кВт}; P_K = 140 \text{ кВт}; I_X = 0,7 \% ; U_{\text{К ВН-СН}} = 10,5 \% ; U_{\text{К В-НН}} = 17,5 \% ;$

$U_{\text{К СН-НН}} = 6,5 \%$

$$Z_{1Т,В} = \frac{1}{200} (U_{\text{К В-С}} + U_{\text{К В-Н}} - U_{\text{К С-Н}}) \cdot \frac{U_{\text{НОМ.Н}}^2}{S_{\text{ТНОМ}}} \cdot 10^{-3}. \quad (26)$$

$$Z_{1Т,Н} = \frac{1}{200} (U_{\text{К В-Н}} + U_{\text{К С-Н}} - U_{\text{К В-С}}) \cdot \frac{U_{\text{НОМ.Н}}^2}{S_{\text{ТНОМ}}} \cdot 10^{-3}. \quad (27)$$

$$Z_{1Т,В} = \frac{1}{200} (10,5 + 17,5 - 6,5) \cdot \frac{115000^2}{25000} \cdot 10^{-3} = 0,43 \text{ Ом,}$$

$$Z_{1T,H} = \frac{1}{200} (17,5 + 6,5 - 10,5) \cdot \frac{115000^2}{25000} \cdot 10^{-3} = 0,27 \text{ Ом.}$$

Т.к.  $r_{1T}$  мало, то  $x_{1T,B} = Z_{1T,B} = 0,43 \text{ Ом.}$

$$I_{K1}^{(3)} = \frac{6,06}{0,021+0,43+0,27} = 8,4 \text{ А,}$$

$$F_{T \min} = \frac{\sqrt{B_K}}{c} = \frac{8400\sqrt{1,25}}{90} = 98,8 \text{ мм}^2.$$

Окончательно принимаем к установке кабель ААБ – 10 (3×120) ×2.

## 4.2 Выбор схемы внутреннего электроснабжения

«При построении общей схемы внутреннего электроснабжения принимаем вариант, обеспечивающий рациональное использование ячеек распределительных устройств, минимальную длину распределительной сети, максимум экономии коммутационно-защитной аппаратуры» [3].

Рассмотрим два варианта схемы внутреннего электроснабжения на рисунках 1 и 2.

Произведем выбор внутризаводских кабелей напряжением 10 кВ. Выберем из двух вариантов самый загруженный кабель и выберем для него сечение. Это кабель в варианте №2 питающей ТП-4; ТП-5; ТП-6; ТП-11; ТП-12.

$$I_{T\Sigma\text{НОМ}} = \frac{S_{T\Sigma\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} \quad (28)$$

$$I_{T\Sigma\text{НОМ}} = \frac{1000+1000+630+1000+630}{\sqrt{3} \cdot 10} = 246 \text{ А.}$$

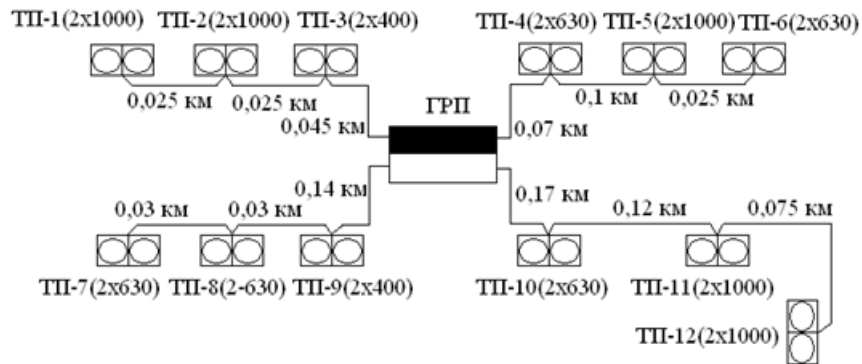


Рисунок 1 – Вариант №1 схемы внутреннего электроснабжения

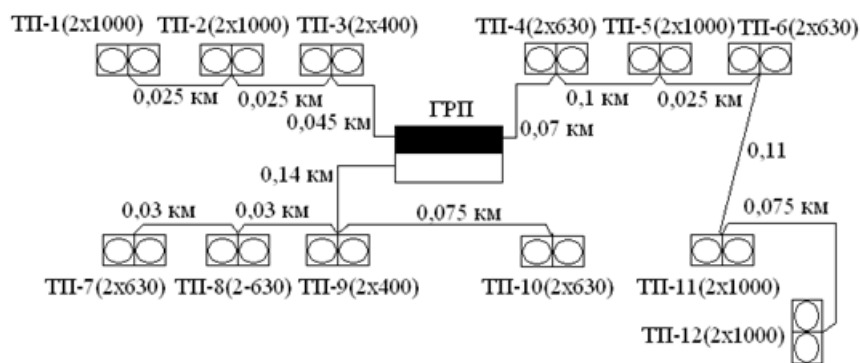


Рисунок 2 – Вариант №2 схемы внутреннего электроснабжения

Предварительно принимаем кабель ААБ – 10 (3×70) ×2.

По утяжеленному режиму:

$$I_{\text{дл.доп}} \geq 1,4 I_{T\Sigma\text{ном}} \quad (29)$$

$$I_{\text{дл.доп}} = 330 \text{ А,}$$

$$330 < 1,4 \cdot 246 = 345 \text{ А.}$$

По условию термической стойкости: необходимо, рассчитать  $I_{K2}^{(3)}$ , для этого надо учесть сопротивление вводного кабеля:

Для ААБ – 10 (3×120) ×2:

-  $R_{1П} = 0,258 \text{ Ом/км}$ ;  $X_{1П} = 0,081 \text{ Ом/км}$ , длина кабеля  $l = 200 \times 2 = 400 \text{ м}$ ;

-  $R_{1\text{кЛ}} = 0,258 \cdot 0,2/2 = 0,026 \text{ Ом}$ ;

-  $X_{1\text{кЛ}} = 0,061 \cdot 0,2/2 = 0,01 \text{ Ом}$ .

$$I_{K1}^{(3)} = \frac{6,06}{\sqrt{(0,021+56,87+35,71+0,01)^2+0,026^2}} = 65,43 \text{ А.}$$

Несмотря на невыполнения условия №2, к установке принимается кабель ААБ – 10 (3×70) ×2, т.к. при выборе сечения самого загруженного условие выбора по термической стойкости при коротких замыканиях является решающим.

Теперь рассмотрим самый загруженный кабель из варианта №1.

Этот кабель питающий ТП-10; ТП-11; ТП-12.

$$I_{T\Sigma\text{НОМ}} = \frac{1000+1000+630}{\sqrt{3}\cdot 10} = 152 \text{ А,}$$

$$F = \frac{152}{1,4} = 109 \text{ мм}^2.$$

Предварительно принимаем кабель: ААБ – 10 (3×95) с  $I_{\text{дл.доп}} = 205 \text{ А}$ .

Проверим по утяжеленному режиму:

$$205 > 1,3 \cdot 152 = 197,6 \text{ А,}$$

$$F_{T\text{min}} = 76 \text{ мм}^2.$$

Окончательно принимаем кабель ААБ – 10 (3×95) для всей схемы внутреннего электроснабжения.

Произведем сравнение двух вариантов схем внутреннего электроснабжения с помощью технико-экономического расчета, который сводится к расчету минимальных приведенных затрат:

$$Z = E_n k + I_3 \tag{30}$$

где  $E_n$  – нормативный коэффициент экономической эффективности, принимается 0,165;

$k$  – единовременные капитальные вложения, руб;

$I_3$  – стоимость потерь электроэнергии, руб/год.

$$K = l_{\Sigma} C_0 \quad (31)$$

где  $l_{\Sigma}$  – сумма длин всех кабелей 10 кВ внутри завода, км;

$C_0$  – стоимость 1км кабельной линии при прокладке в трассе, тыс. руб (для ААБ – 10 (3×70)  $C_0 = 17$  тыс. руб.; для ААБ – 10 (3×95)  $C_0 = 20$  тыс. руб).

$$I_3 = m \Delta P_{m\Sigma} \quad (32)$$

где  $m$  – стоимость 1кВт максимальных активных нагрузочных потерь, руб/кВт год;

$\Delta P_{m\Sigma}$  – максимальная суммарная мощность в кабельных линиях, кВт:

$$m = \left( \frac{\alpha}{T_M} + \beta \cdot 10^{-3} \right) \cdot \tau_M \quad (33)$$

$$m = \left( \frac{170}{5000} + 0,8 \right) \cdot 3410 = 2844 \text{ руб/кВт} \cdot \text{год},$$

где  $\alpha$  – основная ставка двухставочного тарифа, руб,

$T_M$  – число часов использования нагрузки предприятия за год, ч;

$\beta$  – дополнительная плата за 1кВт ч, руб;

$\tau_M$  – число часов использования максимальных потерь, ч.

$$\Delta P_{m\Sigma} = 3R_0 \cdot I^2 \cdot 10^{-6} \quad (34)$$

где  $R_0$  – удельное сопротивление 1 км кабельной линии,

для ААБ – 10 (3×70)  $R_0 = 0,443$  Ом/км;

ААБ – 10 (3×95)  $R_0 = 0,326$  Ом/км.

Произведем расчет для варианта №1:

$$l_{\Sigma} = 0,855 \text{ км},$$

$$K = 0,855 \cdot 20000 = 17100 \text{ руб.}$$

Результаты расчета поместим в таблицу 8.



Таблица 8 – Потери в линиях

Линия	$R_0$ , Ом/км	$S_{T\text{ ном}}$ , кВА	$l$ , км	$\Delta P_{TП}$ , кВт
ТП 1,2	0,326	1000	0,025+0,0025	0,163
ТП 3	0,326	400	0,045	0,023
ТП 4,6	0,326	630	0,07+0,025	0,12
ТП 5	0,326	1000	0,1	0,326
ТП 7,8	0,326	630	0,03+0,03	0,078
ТП 9	0,326	400	0,14	0,073
ТП 10	0,326	630	0,17	0,22
ТП 11	0,326	1000	0,12	0,392
ТП 12	0,326	1000	0,075	0,245
–	–	–	Итого:	1,64

$$И_3 = 2844 \cdot 1,64 = 4664,16 \text{ руб/год,}$$

$$E_H = 0,165,$$

$$З_1 = 0,165 \cdot 17100 + 4664,16 = 7486 \text{ руб.}$$

Для варианта №2 расчет ведем аналогично. Тогда:

$$K = 29 \text{ тыс. руб.};$$

$$m = 2844 \text{ руб/кВт год};$$

$$\Delta P_{\Sigma} = 1,002 \text{ кВт};$$

$$И_3 = 2850 \text{ руб/год};$$

$$З_2 = 7635 \text{ руб.}$$

Вывод по разделу.

Из технико-экономического расчета видно, что по затратам вариант №1 предпочтительнее чем вариант №2. Отсюда выбираем схему внутреннего электроснабжения по варианту №1.

## 5 Расчет токов КЗ

### 5.1 Составление схемы замещения и расчет её параметров

Расчет токов КЗ выполняется с целью выбора электрических аппаратов и проводников, так же для проверки чувствительности и селективности действия защиты. Для достижения этой цели рассмотрим определение в точках следующих токов: «начального действующего значения периодической составляющей и ударного тока при металлических трехфазных КЗ без учета влияния электроприёмников; действующее значение периодической составляющей тока при двухфазном КЗ без учета влияния электроприёмников» [19]. Необходимо учитывать активное и индуктивное сопротивление всех элементов цепи КЗ (система, силовые трансформаторы, электрические линии). На рисунке 3 представлена схема системы электроснабжения с точками КЗ и её схема замещения.

Параметры системы и трансформатора рассчитаны ранее:  $E_c = 6,06$  кВ;  $X_{1c} = 0,021$  Ом,  $Z_{1Т,В} = 0,43$  Ом,  $Z_{1Т,Н} = 0,27$  Ом,  $r_{1Т} = 0,002$  Ом,  $x_{1Т,В} = 0,43$  Ом,  $x_{1Т,Н} = 0,27$  Ом. Рассчитаем параметры схемы замещения:

$$x_{1Т} = x_{1Т,В} + x_{1Т,Н} = 0,43 + 0,27 = 0,7 \text{ Ом},$$

$$r_{1Т} = 2 \cdot 0,002 = 0,004 \text{ Ом}.$$

Параметры схемы замещения вводного кабеля рассчитаны в п. 4.2:  $r_{1кл} = 0,026$  Ом;  $x_{1кл} = 0,01$  Ом.

Рассчитаем сопротивление кабельных линий.

КЛ 2:  $l = 0,17$  км, для кабеля ААБ – 10 (3×95):  $r_{1л} = 0,326$  Ом/км;  $x_{1л} = 0,083$  Ом/км. Отсюда:

$$r_{кл2} = 0,17 \cdot 0,326 = 0,055 \text{ Ом/км},$$

$$x_{кл2} = 0,17 \cdot 0,083 = 0,014 \text{ Ом/км},$$

КЛЗ:  $l = 0,12$  км,  $r_{кЛЗ} = 0,39$ ,  $x_{кЛЗ} = 0,01$  Ом/км.

КЛ4:  $l = 0,075$  км,  $r_{кЛ4} = 0,024$  Ом/км,  $x_{кЛ4} = 0,006$  Ом/км.

Рассчитаем сопротивление трансформаторов КТП в соответствии с расчетной схемой, приведенной на рисунке 3.

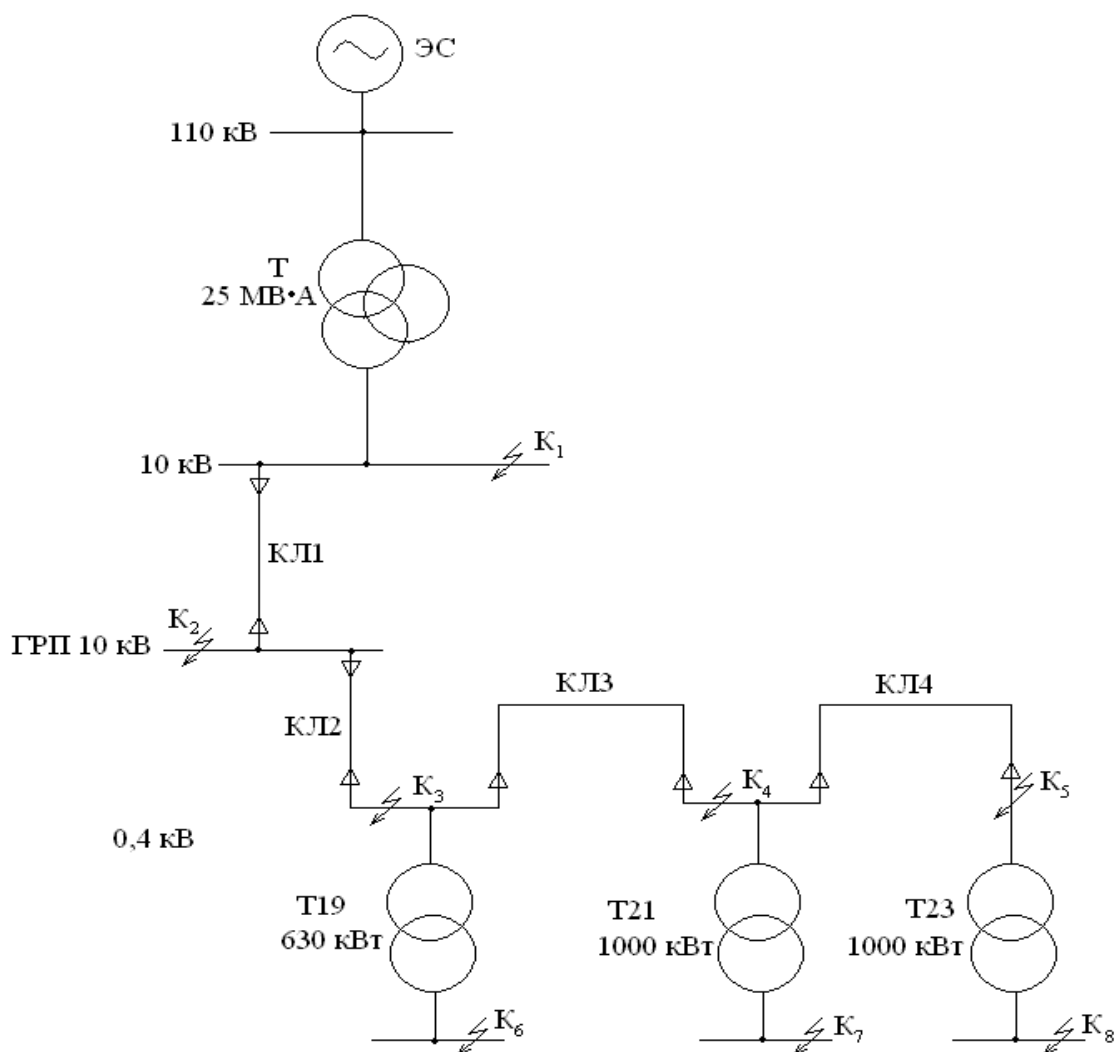


Рисунок 3 – Расчетная схема СЭС

$$Z_{1T} = \frac{u_k}{100 \frac{U_{НОМ.В}^2}{S_{НОМ}}} \quad (35)$$

Для трансформатора Т19:

$$Z_{1T1} = 8,73 \text{ Ом},$$

$$r_{1T19} = \frac{7,3 \cdot 10^2}{0,63} \cdot 10^{-3} = 1,16 \text{ Ом},$$

$$x_{1T19} = \sqrt{8,73^2 - 1,16^2} = 8,65 \text{ Ом}.$$

Для трансформаторов T21 и T23:

$$Z_{1T21} = \frac{5,5}{100} \cdot \frac{10^2}{0,1} = 5,5 \text{ Ом},$$

$$r_{1T21} = \frac{11 \cdot 10^2}{1} \cdot 10^{-3} = 1,1 \text{ Ом},$$

$$x_{1T21} = \sqrt{5,5^2 - 1,1^2} = 5,39 \text{ Ом}.$$

## 5.2 Определение токов КЗ

При расчете металлических трехфазных КЗ без учета влияния электроприёмников начальное действующее значение периодической составляющей КЗ от системы равно:

$$I_{п0}^{(3)} = \frac{E_c}{Z_\Sigma} \quad (36)$$

где  $Z_\Sigma$  – суммарное сопротивление цепи КЗ, Ом.

Ударный ток [2]:

$$i_{уд,к}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot k_{уд}^{(3)} \cdot I_{(пок)}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot (1 + e^{-\pi \cdot r_\Sigma / x_\Sigma}) \cdot I_{(пок)}^{(3)} \quad (37)$$

где  $k_{уд}^{(3)}$  – ударный коэффициент.

Так как суммарные сопротивление прямой и обратной последовательности равны, тогда периодическая составляющая при металлическом двухфазном КЗ определяется:

$$I_{\text{п01}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\text{п0}}^{(3)} \quad (38)$$

$$I_{\text{п01}}^{(3)} = \frac{6,06}{\sqrt{0,721^2 + 0,004^2}} = 8,4 \text{ кА},$$

$$i_{\text{уд.к1}}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot \left(1 + e^{-3,14 \cdot \frac{0,004}{0,721}}\right) \cdot 8,4 = 23,48 \text{ кА},$$

$$I_{\text{п01}}^{(2)} = 0,866 \cdot 8,4 = 7,27 \text{ кА}.$$

Расчет для остальных точек ведем аналогично, результаты заносим в таблицу 9.

Таблица 9 – Расчет точек КЗ

Точка КЗ	$I_{\text{п0}}^{(3)}$ кА	$k_{\text{уд}}^{(3)}$	$i_{\text{уд.к}}^{(3)}$ кА	$I_{\text{п0}}^{(2)}$ кА	Суммарное сопр. цепи КЗ		
					$Z_{\Sigma}$ Ом	$x_{\Sigma}$ Ом	$r_{\Sigma}$ Ом
К1	8,4	1,98	23,48	7,27	0,721	0,721	0,004
К2	8,28	1,88	21,9	7,17	0,732	0,731	0,03
К3	7,7	1,84	20	6,67	0,787	0,786	0,044
К4	6,7	1,18	11,15	5,8	0,9	0,796	0,434
К5	6,56	1,17	10,8	5,7	0,92	0,802	0,458
К6	0,64	1,67	1,5	0,56	9,42	9,35	1,204
К7	0,95	1,46	1,95	0,82	6,37	6,186	1,534
К8	0,95	1,45	1,947	0,82	6,385	6,192	1,558

Схема замещения рассчитываемой системы электроснабжения (СЭС) представлена на рисунке 4.

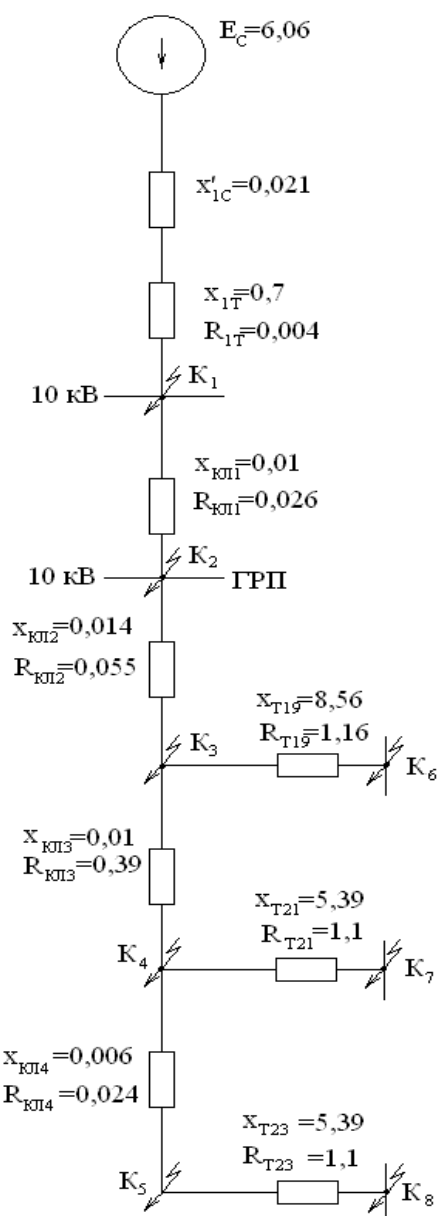


Рисунок 4 – Схема замещения СЭС

Вывод по разделу

Самый большой ударный ток  $K_3$ , который составляет 23,48 кА, возникает в точке  $K_1$ . Чем дальше точка  $K_3$  от системы, тем ниже ударный ток  $K_3$ .

## 6 Выбор и проверка электрооборудования

### 6.1 Выбор и проверка шин

Сечение шин выбираем по длительно допустимому току:

$$I_{\text{доп}} = k_1 k_2 k_3 I_{\text{доп.о}} \quad (39)$$

$$I_{\text{доп}} = 0,95 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 471,9 = 448 \text{ А}$$

где  $I_{\text{доп.о}}$  – длительно допустимый ток полосы при температуре шины;

$\Theta_{\text{ш}} = 700^\circ\text{С}$ , температура окружающей среды  $\Theta_{\text{о.с}} = 250^\circ\text{С}$  и расположение шин на ребро;

$k_1$  – поправочный коэффициент при расположении шин плашмя ( $k_1 = 0,95$ );

$k_2$  – поправочный коэффициент для многополюсных шин ( $k_2 = 1$ );

$k_3$  – поправочный коэффициент для шин при температуре окружающей среды отличной от  $250^\circ\text{С}$  ( $k_3 = 1$ ).

Максимальный ток, проходящий через шины: это  $I_{\text{доп.о}} = 471,9 \text{ А}$ .

Из справочника [10] принимаем алюминиевые однополюсные шины сечением  $60 \times 6 \text{ мм}$  с  $I_{\text{дл.доп}} = 870 \text{ А}$ .

Проверяем на динамическую стойкость.

Расстояние между изоляторами крепления шины:

$$l = \sqrt{\frac{48 \cdot 10^2 h}{200}}, \quad (40)$$

$$l = \sqrt{\frac{48 \cdot 10^2 \cdot 0,06}{200}} = 1,2 \text{ м,}$$

где  $h$  – ширина шины, м.

«Определяем наибольшее удельное усилие при трехфазном КЗ» [18]:

$$f = \frac{\sqrt{3} \cdot i_{\text{уд}}^{(3)2}}{a} k_{\phi} \cdot 10^{-7}, \quad (41)$$

$$f = \frac{\sqrt{3} \cdot (21900)^2}{0,6} 1 \cdot 10^{-7} = 138,3 \text{ Н/м},$$

где  $a$  – расстояние между шинами фаз,  $a = 0,6$  м;

$k_{\phi}$  – коэффициент формы шин,  $k_{\phi} = 1$ ;

$i_{\text{уд}}^{(3)}$  – ударный ток трехфазного КЗ, в месте КЗ на шинах,

$I_{\text{уд}}^{(3)} = 21900$  А.

Сила взаимодействия двух проводников (шин):

$$f = \frac{\sqrt{3} \cdot i_{\text{уд}}^{(3)2} \cdot l}{a} \cdot 10^{-7}, \quad (42)$$

$$f = \frac{\sqrt{3} \cdot 21900^2 \cdot 1,2}{0,6} \cdot 10^{-7} = 166 \text{ Н}.$$

Изгибающий момент от воздействия на шину:

$$M = \frac{f \cdot l^2}{12}, \quad (43)$$

$$M = 138,3 \cdot \frac{1,2^2}{12} = 16,6 \text{ Нм}.$$

Момент сопротивления шин:

$$W = bh^2/6, \quad (44)$$

$$W = 0,006 \cdot \frac{0,06^2}{6} = 3,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

где  $b$  – высота шины, м.



Рассчитываем механическое напряжение в шине по условию сохранению упругости:

$$\sigma_{max} = \frac{M}{W}, \quad (45)$$

$$\sigma \geq \sigma_{max}. \quad (46)$$

где  $\sigma$  – допустимое напряжение для сплава алюминия шин,  $\sigma = 137 \cdot 10^7$  Па;

$$\sigma_{max} = 16,6/3,6 \cdot 10^{-6} = 4,61 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Проверка шин на термическую стойкость при КЗ:

$$F_{min} = \frac{\sqrt{B_k} \cdot 10^3}{c}, \quad (47)$$

$$F_{min} = \frac{7177}{91} = 78,9 \text{ мм}^2.$$

где « $c$  – коэффициент характеризующий допустимый нагрев материала шин, для алюминия  $c = 91$ » [18].

Проверка шин по экономической плотности:

$$F_{э} = \frac{I_{нmax}}{j_{э}} = \frac{471,9}{2} = 235,95 \text{ мм}^2.$$

Окончательно принимаем к установке шины сечением  $F = 360 \text{ мм}^2$ .

## 6.2 Выбор и проверка изоляторов

По напряжению:

$$U_{ном} \geq U_{ном.сети} \quad (48)$$

«Проверка по допустимой нагрузке на голову изолятора – по динамической стойкости:

$$\tau < \tau_{\text{доп.}}, \quad (49)$$

$$166 < 2250 \text{ Н,}$$

где  $\tau_{\text{доп}}$  – допустимая нагрузка (сила) на голову изолятора, Н.

$$\tau_{\text{доп}} = 0,6 \tau_{\text{разр.}}, \quad (50)$$

$$\tau_{\text{доп}} = 0,6 \cdot 3,75 = 2250 \text{ Н.}$$

где  $\tau_{\text{разр}}$  – разрушающая нагрузка (сила) на изгиб изолятора, Н [18].

Принимаем к установке изолятор типа: ИО – 10 – 375 УЗ. По номинальному напряжению: 10 кВ = 10 кВ.

### 6.3 Выбор измерительных трансформаторов напряжения

Трансформаторы напряжения выбираются по напряжению:

$$U_{\text{ном}TV} \geq U_{\text{ном.сети}}. \quad (51)$$

Выбираем трансформатор НТМИ – 10 – 66 УЗ – по вторичной нагрузке в требуемом классе точности подключенных к нему приборов:

$$S_{\text{ном} TV} \geq \sum S_{\text{приб.}} \quad (52)$$

«Для определения суммарной мощности всех приборов  $\sum S_{\text{приб}}$ , подключенных к трансформатору напряжения, составляем таблицу с указанием в ней наименования прибора, количества приборов и их потребляемой мощности» [16].

Результаты расчета суммарной мощности приборов помещаем в таблицу 10.

Таблица 10 – Потребляемая мощность приборов, подключенных к трансформатору напряжения НТМИ – 10 – 66 УЗ

Прибор	Тип прибора	cosφ	Число катушек в приборе	Число приборов	Потребляемая мощность		
					Полная мощность одной катушки	активная	реактивная
					кВА	Вт	вар
Вольтметр	Э-377	1	1	3	2	6	-
Ваттметр	Д-365	1	2	1	2	4	-
Варметр	Н-395	1	2	1	2	4	-
Счетчик активной энергии	СА -4У-И- 672М	0,38	2	1	2	4	9,7
Счетчик реактивной энергии	СР-4У-И- 676М	0,38	2	1	2	4	9,7
Итого:	–	–	–	–	–	22	19,4

$$\Sigma S_{\text{приб}} = \sqrt{\Sigma P^2_{\text{приб}} + \Sigma Q^2_{\text{приб}}}, \quad (53)$$

$$\Sigma S_{\text{приб}} = \sqrt{22^2 + 19,4^2} = 29,3 \text{ ВА},$$

$$S_{\text{ном TV}} = 120 \text{ ВА}.$$

Итак,  $120 > 29,3 \text{ ВА}$  – условие выполняется. Вторичная нагрузка не выходит за пределы установленные классом точности 0,5 для НТМИ – 10 – 66 УЗ.

#### 6.4 Выбор и проверка трансформаторов тока

Выбор трансформатора на вводе 10 кВ

Выбор и проверку осуществляем:

– по напряжению

$$U_{\text{ном}TV} \geq U_{\text{ном.сети}}. \quad (54)$$

– по максимальному рабочему току:

$$I_{\text{ном} TA} \geq I_{\text{н макс}}. \quad (55)$$

– по мощности

$$S_{2 \text{ ном} TA} \geq S_{\text{рсч}} \quad (56)$$

где  $S_{\text{рсч}}$  – расчетная нагрузка вторичной обмотки трансформатора тока в рабочем режиме, ВА.

$$r_{2 \text{ ном} TA} \geq r_{\text{рсч}}. \quad (57)$$

где  $r_{\text{рсч}}$  – расчетное сопротивление, Ом.

$$r_{\text{рсч}} = r_{\text{приб}} + r_{\text{пров}} + r_{\text{к}}. \quad (58)$$

где  $r_{\text{к}}$  – сопротивление контактов,  $r_{\text{к}} = 0,05$  Ом;

$r_{\text{приб}}$  – сопротивление приборов, Ом;

$r_{\text{пров}}$  – сопротивление проводов, Ом.

Для определения сопротивления приборов составляется таблица:

$$r_{\text{приб}} = \frac{\Sigma S_{\text{приб}}}{I_{2 \text{ ном} TA}^2}. \quad (59)$$

где  $I_{2 \text{ ном} TA}$  – номинальный ток вторичной обмотки трансформатора тока,  $I_{2 \text{ ном} TA} = 5$  А.

Сопротивление вторичной обмотки трансформатора тока:

$$r_{2 \text{ ном} TA} = \frac{S_{2 \text{ ном} TA}}{I_{2 \text{ ном} TA}^2}. \quad (60)$$

где  $S_{2 \text{ ном ТА}}$  – номинальная мощность вторичной обмотки трансформатора тока,  $S_{2 \text{ ном ТА}} = 20 - 50 \text{ ВА}$ .

$$r_{\text{пров}} = r_{2 \text{ ном ТА}} - r_{\text{приб}} - r_{\text{к}}. \quad (61)$$

На вводе 10 кВ устанавливаем трансформатор тока ТЛК – 10У3 с двумя вторичными обмотками при:  $r_{\text{ном2}} = 0,4 \text{ Ом}$ ,  $I_{\text{н.дл}} = 600$ .

Сведения о подключенных приборах представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Расчет приборов

Наименование	Тип прибора	Потребляемая мощность одного прибора, ВА	Количество приборов в фазе	Потребляемая мощность, ВА
Амперметр	Э-377	0,5	2	1
Варметр	Д-305	0,5	1	0,5
Ваттметр	Д-305	0,5	1	0,5
Счетчик активной энергии	Ц36805 ВС	2,5	1	2,5
Счетчик реактивной энергии	Ц3680 1/2	2,5	1	2,5

$$r_{\text{приб}} = \frac{7}{5^2} = 0,28 \text{ Ом},$$

$$\Sigma S_{\text{приб}} = 7 \text{ ВА},$$

$$r_{\text{пров}} = 0,4 - 0,28 - 0,05 = 0,07 \text{ Ом}.$$

Диаметр сечения провода цепи вторичной коммутации:

$$F = \frac{\rho_a l}{r_{\text{пров}}}, \quad (62)$$

$$F = \frac{0,0285 \cdot 20}{0,07} = 8 \text{ мм}^2.$$

где  $\rho_a$  – удельное сопротивление провода,  $\rho_a = 0,0285 \text{ Ом/м}$ ;

$l$  – длина провода цепи вторичной коммутации,  $l = 20 \text{ м}$ .

Принимаем провод АПВ сечением  $10 \text{ мм}^2$ , тогда:

$$r_{\text{пров}} = \frac{0,0285 \cdot 20}{0,07} = 8 \text{ мм}^2, \quad (63)$$

$$r_{\text{рсч}} = 0,28 + 0,057 + 0,05 = 0,39 \text{ Ом} \quad (64)$$

где  $0,4 > 0,39 \text{ Ом}$  – условие выполняется.

Проверка трансформатора на термическую стойкость:

$$I_{\text{терм}}^2 t_{\text{терм}} \geq B_{\text{к}}, \quad (65)$$

$$B_{\text{к}} = \left( I_{\text{п0}}^{(3)} \right)^2 (t_{\text{р.з}} + t_{\text{выд.}} + T_{\text{а}}), \quad (66)$$

$$B_{\text{к}} = 8,28^2 \cdot (1,25 + 0,15 + 0,06) = 100 \text{ кА}^2\text{с.}$$

Сравниваем:  $2976 > 100 \text{ кА}^2\text{с.}$

Выбираем трансформатор тока ТЛК – 10У3 [14].

Проведем выбор трансформатора тока на отходящих линиях.

Выбираем трансформатор тока ТЛК – 10У3 с  $r_{2 \text{ ном}} = 0,4 \text{ Ом.}$

По условию:  $10 = 10 \text{ кВ;}$

По условию:  $200 > 197,6 \text{ А.}$

Проверяем на динамическую стойкость:  $74,5 > 21,9 \text{ кА.}$

Термическая стойкость:  $B_{\text{к}} = (8,28)^2 (1,25 + 0,1 + 0,05) = 96 \text{ кА}^2\text{с.}$

$268 > 113 \text{ кА}^2\text{с.}$

В таблицу 12 помещаем сведения о нагрузке трансформаторов тока.

Таблица 12 – Электрическая нагрузка на трансформаторы тока от измерительных приборов

Прибор	Тип приборов	Кол-во	Номинальная мощность
Амперметр	Э-377	1	0,1
Счетчик активной энергии	Ц36405 ВС	1	0,2
Счетчик реактивной энергии	Ц3680 1/2	1	0,3
		Итого:	0,6

$$r_{\text{приб}} = \frac{0,6}{5^2} = 0,024 \text{ Ом},$$

$$r_{\text{пров}} = 0,4 - 0,024 - 0,05 = 0,326 \text{ Ом},$$

$$F_{\text{пров}} = \frac{0,0285 \cdot 10 \cdot \sqrt{3}}{0,326} = 1,5 \text{ мм}^2.$$

По условию механической прочности сечение должно быть не менее 2,5 мм<sup>2</sup>.

$$r_{\text{пров}} = (0,0285 \cdot 10 \cdot \sqrt{3}) / 2,5 = 0,194 \text{ Ом},$$

$$r = 0,024 + 0,194 + 0,05 = 0,268 \text{ Ом},$$

$$0,4 > 0,268 \text{ Ом}.$$

Отсюда трансформатор тока соответствует классу точности 0,5.

Выберем трансформатора тока на секционный выключатель.

Установка ТПЛК – 10У3 с  $I_{\text{ном}} = 300 \text{ А}$  и  $r_{2 \text{ ном}} = 0,4 \text{ Ом}$  [15]. Нагрузка, проходящая через секционный выключатель равна половине нагрузке завода, т.е. 236 А. Данные выбранных трансформаторов тока показаны в таблице 13.

Таблица 13 – Технические данные трансформаторов тока

Тип трансформатора	Номинальное напряжение	Номинальный ток	Термическая стойкость	Электродинамическая стойкость	Сопротивление
	кВ	А	кА	кА	Ом
ТЛК-10У3	10	600	31,5	81	0,4
ТПЛК-10У3	10	200	9,45	74,5	0,4
ТПЛК-10У3	10	300	14,1	74,5	0,4

## 6.5 Выбор и проверка вакуумных выключателей

Выбор аппаратов производим:

– по напряжению:  $U_{\text{ном ап}} \geq U_{\text{ном.сети}}$ ;

– по максимальному току нагрузки в сети расчетного присоединения:

$$I_{\text{ном ап}} \geq I_{\text{н max}};$$

- по максимальному току КЗ:  $I_{\text{дин ап}} \geq I_{\text{к}}^{(3)}$ ;
- по максимальному току КЗ, сравнивая его с ударным током:  
 $I_{\text{дин.мах.ап}} \geq i_{\text{уд}}^{(3)}$ ;
- по термической стойкости:

$$I_{2\text{терм.ап}} t_{\text{терм.ап}} \geq B_{\text{к}} \quad (67)$$

где  $t_{\text{терм.ап}} = 3 - 5$  с;

$B_{\text{к}}$  – импульс квадратичного тока (тепловой импульс).

Выберем выключатели на отходящих линиях.

Рассчитываем максимальный ток через выключатель:

$$I_{\text{н.мах}} = \frac{1,4 \cdot \Sigma S_{\text{T}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{с}}} \quad (68)$$

$$I_{\text{н.мах}} = \frac{1,4 \cdot (1000 + 1000 + 630)}{\sqrt{3} \cdot 10} = 213 \text{ А.}$$

Выбираем выключатель ВВ/TEL-10-12,5/1000(630) -У2 [1].

10 кВ = 10 кВ.

630 А > 213 А.

Проверяем на электродинамическую и термическую стойкость:

12,5 кА > 8,28 кА.

32 кА > 21,9 кА.

$B_{\text{к}} = (8,28)^2 (0,25 + 0,1 + 0,05) = 27,4 \text{ кА}^2\text{с}$

$12,52 \cdot 3 = 468,75 > 27,4 \text{ кА}^2\text{с.}$

Выберем и проверти выключатели нагрузки QW19, QW21, QW23.

Произведем выбор выключателя QW19:

$$I_{\text{н.мах}} = \frac{1,4 \cdot 630}{\sqrt{3} \cdot 10} = 51 \text{ А.}$$

Выбираем ВНА – 10/400 – 10У2.



$$10 \text{ кВ} = 10 \text{ кВ},$$

$$400 \text{ А} > 51 \text{ А}.$$

На термическую стойкость выключатель нагрузки не проверяется, т.к. установлен за плавкой вставкой предохранителя.

Выбираем предохранитель ПКТ – 103 – 10 – 100 – 20У3.

$$10 \text{ кВ} = 10 \text{ кВ},$$

$$100 \text{ А} > 51 \text{ А}.$$

Проверяем на электродинамическую и термическую стойкость:

$$I_{\text{дин}} > i^{(3)}_{\text{уд.}},$$

$$25 \text{ кА} > 20 \text{ кА},$$

$$I_{\text{откл. ном}} > I^{(3)}_{\text{кз.}},$$

$$102 \cdot 1 = 100 > 23,7 \text{ кА}^2\text{с},$$

$$B_{\text{к}} = (7,7)^2 (0,25 + 0,1 + 0,05) = 23,7 \text{ кА}^2\text{с}.$$

Выключатели нагрузки QW21; QW23 так же как и QW19, т.к. для него параметры  $I_{\text{р.мах}}$  и  $I^{(3)}_{\text{к}}$  имеют более высокое значение чем для QW21 и QW23; соответственно по выбору и проверке они подойдут.

$$I_{\text{н.мах.QW21}} = \frac{1,4 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 10} = 80,9 \text{ А}.$$

Предохранитель ПКТ – 103 – 10 – 160 – 20У3.

$$10 \text{ кВ} = 10 \text{ кВ},$$

$$160 \text{ А} > 80,9 \text{ А},$$

$$20 \text{ кА} > 7,7 \text{ кА}.$$

Номинальный ток плавкой вставки выбираем в разделе 7.

## 6.6 Выбор вводных автоматических выключателей 0,4 кВ

Для QF19:

$$I_{\text{рц.ном}} \geq k I_{\text{раб. max}} \quad (69)$$

где  $k$  – коэффициент отстройки  $k = 1,1$ ;

$I_{\text{раб. max}}$  – максимальный рабочий ток, проходящий через выключатель, А.

$$I_{\text{раб. max}} = \frac{1,4 \cdot 630 \cdot 10}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,4} = 1273 \text{ А,}$$

$$I_{\text{рц.ном}} = 1,1 \cdot 1273 = 1400,3 \text{ А.}$$

Принимаем к установке автоматический выключатель ВА 55 – ЧЗ.

$I_{\text{рц.ном}} = 1600$  А. Выбираем QF21 и QF23:

$$I_{\text{раб. max. QF21}} = \frac{1,4 \cdot 1000 \cdot 10}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,4} = 2023 \text{ А,}$$

$$I_{\text{рц.ном}} = 1,1 \cdot 2023 = 2225 \text{ А.}$$

Выбираем ВА 75 – 45 с  $I_{\text{рц.ном}} = 2500$  А.

Вывод по разделу.

Выбор и проверка шин, изоляторов, измерительных трансформаторов напряжения и тока, вакуумных выключателей, а также вводных автоматических выключателей 0,4 кВ был проведена с использованием данных каталогов производителей, а также с помощью расчетов.

Выбранное оборудование для цехов тракторостроительного завода соответствует требованиям надежности электроснабжения.

## **7 Выбор и расчет устройств релейной защиты и автоматики**

### **7.1 Цепи оперативного тока**

«Питание цепей управления и сигнализации защиты и автоматики, а также включающих устройств различных коммутационных аппаратов главных цепей и отключающих устройств осуществляется от специальных источников питания, переключающих устройств и других элементов оперативной цепи, составляющих систему оперативного тока данной электроустановки» [17].

Источники оперативного тока должны обеспечивать надежность действия защиты при коротких замыканиях, когда напряжение в сети у места включения защиты может сильно снижаться или полностью отсутствовать.

Источники оперативного выпрямленного тока на проектируемом предприятии являются специальные блоки питания, подключаемые к измерительным трансформаторам. Блоки питания позволяют получить выпрямленное при всех видах КЗ. Блоки питания делятся на токовые и блоки напряжения. При использовании блоков питания для питания оперативных цепей сохраняются преимущества постоянного тока, заключающиеся в применении более совершенной в конструктивном отношении релейной и другой аппаратуры, и отпадает потребность в аккумуляторной батарее как в источнике постоянного тока.

Далее проведем расчет релейной защиты. За основу берем расчетную схему замещения системы электроснабжения, внешний вид которой представлен на рисунке 5.

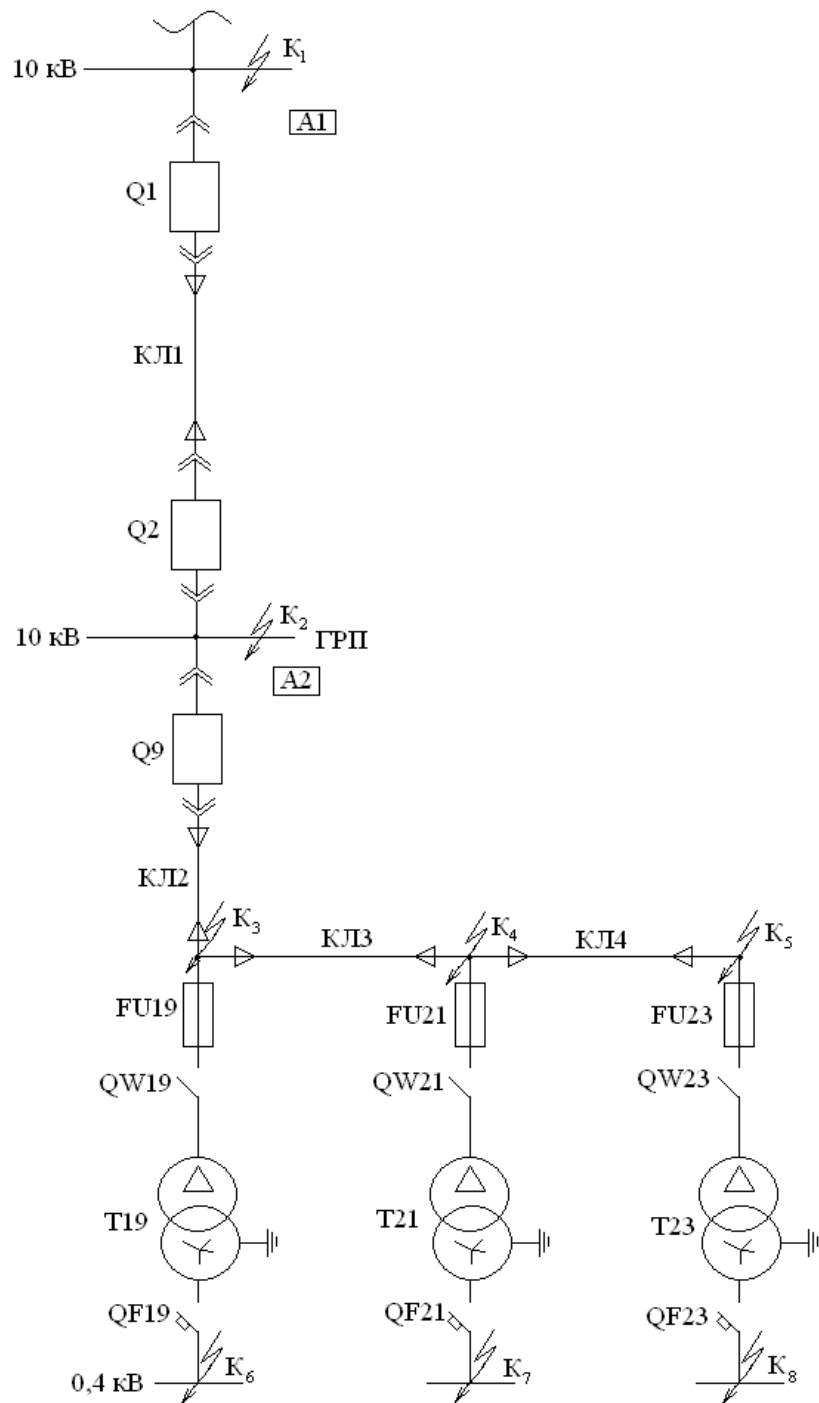


Рисунок 5 – Расчетная схема СЭС

## 7.2 Выбор автоматических выключателей

Защита QF19.

Выбран ВА 55 – 43 с  $I_{рц,ном} = 1600$  А.

Устанавливаем токовую отсечку с выдержкой времени:

$$I''_{сз} \geq k''_{отс} I_{пер} \quad (70)$$

где  $k''_{отс}$  – коэффициент отстройки второй ступени ВА,  $k''_{отс} = 1,5$ ;  
 $I_{пер}$  – ток перегрузки, А.

$$I_{пер} = k' I_{раб.мах} + k_{сзп} I_{раб.мах}, \quad (71)$$

$$I_{пер} = 1 \cdot 1273 + 2 \cdot 1273 = 3819 \text{ А},$$

где  $k_{сзп}$  – коэффициент самозапуска электрических двигателей;

$I_{раб.мах}$  – максимальный ток в трансформаторе в нормальном режиме,  
 А.

Рассчитываем кратность тока срабатывания защиты к номинальному току расцепителя:

$$I''_{сзQF19} \geq k''_{сзQF19} I_{рц.ном}. \quad (72)$$

$I''_{сзQF19} = 5 \cdot 1600 = 8000 \text{ А} > 5728,5 \text{ А}$ . Условие выполняется.

$$k''_{ч} = \frac{I_{kmin}}{I''_{сзQF19}} \geq 1,25,$$

$$I_{kmin} = I^{(2)} k_6 = 0,56 \cdot \frac{10}{0,4} = 14 \text{ кА},$$

$$k''_{ч} = \frac{14000}{800} = 1,75.$$

Чувствительность достаточная.  $t''_{сз} = 0,1 \text{ с}$ .

Ток срабатывания защиты третьей ступени:

$$I'''_{сз} \geq k'''_{сз} I_{рц.ном} \quad (73)$$

где  $k'''_{сз} = 1,25$  – коэффициент отстройки третьей ступени,

$$I'''_{сз} = 1,25 \cdot 1600 = 2000 \text{ А},$$

$$t'''_{сзQF19} = 4 \text{ с при } 6 I_{рц.ном..}$$

Чувствительность МТЗ:

$$k_{\text{ч}}''' = \frac{I_{\text{кmin}}}{I_{\text{сз}}'''_{\text{QF19}}} \geq 1,5,$$

$$k_{\text{ч}}''' = \frac{14000}{2000} = 7 > 1,5.$$

Чувствительность достаточная.

Для автоматического выключателя ВА 55 – 43  $I'_{\text{сз}} = 31$  кА, т.к. на месте установке нашей защиты таких токов нет, токовая отсечка работать не будет.

Защита QF21; QF23:

Выбран ВА 75 – 45 [8].

$$I_{\text{Q ном}} = 2500 \text{ А}; I_{\text{рц.ном}} = 2500 \text{ А}$$

$$I''_{\text{сзQF23}} = 5 \cdot 2500 = 12500 \text{ А} > 2500 \text{ А. Условие выполняется.}$$

Проверка чувствительности:

$$k_{\text{ч}} = \frac{20500}{12500} = 1,64 > 1,25.$$

Чувствительность достаточная.

Для ВА 75 – 45  $I'_{\text{сз}} = 36$  кА.

### 7.3 Защита плавкими предохранителями

Защита плавкими предохранителями FU 19:

$$I_{\text{вс ном}} = (1,5 - 2) I_{\text{Т ном.}}, \quad (74)$$

$$I_{\text{Т ном}} = \frac{630}{\sqrt{3} \cdot 10} = 36,4 \text{ А},$$

$$I_{\text{вс ном}} = 1,4 \cdot 36,4 = 50,96 \text{ А}.$$

Для согласования характеристик на карте селективности выбираем ПКТ – 103 – 10 – 100 – 20У3.

Обеспечение термической стойкости:

$$k = \frac{I^{(3)}_{\text{квн.мах}}}{I_{\text{ТНОМ}}}, \quad (75)$$

$$k = \frac{640}{36,6},$$

$$t_{\text{доп}} = \frac{1500}{k^2}, \quad (76)$$

$$t_{\text{доп}} = \frac{1500}{17,6^2} = 4,8 \text{ с.}$$

Для FU19:  $I^{(3)}_{\text{к6}} = 640 \text{ А}$

Полное время отключения трансформатора  $t_{\text{пр}} = 0,9 < 4 \text{ с}$  (согласно ПУЭ).

Защита предохранителями FU21; FU23:

$$I_{\text{ТНОМ}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10} = 57,5 \text{ А,}$$

$$I_{\text{ВСНОМ}} = 2 \cdot 57,5 = 115,4 \text{ А,}$$

$$I_{\text{ВСНОМ}} \geq 1,4 \cdot 57,5 = 80,78 \text{ А.}$$

Выбираем ПКТ – 103 – 10 – 160 – 20У3.

Для FU21:  $I^{(3)}_{\text{к7}} = 950 \text{ А}$  и для FU23:  $k = \frac{950}{57,7} = 16,4$ ;  $t_{\text{доп}} = \frac{1500}{16,4^2} = 5,6 \text{ с.}$

#### 7.4 Защита кабельной линии КЛ 2 (А2)

Защита А2 включает в себя токовую отсечку, максимальную токовую защиту от замыканий на землю.

Токовая отсечка.

Для выполнения защиты используется реле РТ – 40, соединенные по двухфазной двух релейной схеме с коэффициентом схемы  $k^{(3)}_{\text{сх}} = 1$ ,  $k^{(2)}_{\text{сх}} = 1$ .

Селективность отсечки обеспечивается выбором ее тока срабатывания:

$$I'_{сз} = k'_{отс} I^{(3)}_{к\text{ внmax}}, \quad (77)$$

где  $I^{(3)}_{к\text{ внmax}}$  – ток трехфазного короткого замыкания в точке К8, А;  
 $k'_{отс}$  – коэффициент отстройки первой ступени.

$$I'_{сз\Lambda 2} = 1,2 \cdot 950 = 1140 \text{ А.}$$

Ток срабатывания реле:

$$I'_{ср} = \frac{k'_{отс} \cdot k^{(3)}_{сх} \cdot I^{(3)}_{кз}}{K_I}, \quad (78)$$

$$I'_{ср} = \frac{1,2 \cdot 1 \cdot 1140}{42,6} = 32 \text{ А.}$$

где  $K' = 212,8/5 = 42,6$  – коэффициент трансформации тока.

Проверим выбранную защиту по чувствительности:

$$k'_{ч} = \frac{k^{(2)}_{сх} \cdot I^{(2)}_{кmin}}{k^{(3)}_{сх} \cdot I'_{кmin}} > 2.$$

$$\text{В точке К2: } k'_{ч} = \frac{1 \cdot 7170}{1 \cdot 1140} = 6,3 > 2.$$

$$\text{В точке К3: } k'_{ч} = \frac{1 \cdot 6670}{1 \cdot 1140} = 5,8 > 2.$$

$$\text{В точке К5: } k'_{ч} = \frac{1 \cdot 5700}{1 \cdot 1140} = 5 > 2.$$

Чувствительность достаточная.

Максимальная токовая защита выполняется с использованием реле РТ – 40, соединенных по двухфазной двух релейной схеме  $k^{(3)}_{сх} = 1$ ,  $k^{(2)}_{сх} = 1$ .

Ток срабатывания защиты:

$$I''_{сз} = \frac{k'''_{отс} \cdot k_{сзп}}{k_B} \cdot I_{\text{раб.мах}}, \quad (79)$$



$$I_{сз}^{///} = \frac{1,2 \cdot 1,5}{0,8} \cdot 212,8 = 478,8 \text{ А.}$$

где  $k_{отс}^{///}$  – коэффициент отстройки 3-й ступени,  $k_{отс}^{///} = 1,2$ ;

$k_{в}$  – коэффициент возврата,  $k_{в} = 0,8$ ;

$k_{сзп}$  – коэффициент самозапуска,  $k_{сзп} = 1,5$ .

Ток срабатывания реле:

$$I_{ср}^{///} = \frac{k_{отс}^{///} \cdot k_{сзп}}{k_{в}} \cdot \frac{k^{(3)}_{сх} \cdot I_{раб.мах}}{k'}, \quad (80)$$

$$I_{ср}^{///} = \frac{1,2 \cdot 1,5}{0,8} \cdot \frac{1 \cdot 478,8}{42,6} = 25,3 \text{ А.}$$

Проверка чувствительности защиты в зоне ближнего резервирования в точке КЗ:

$$k_{ч} = \frac{1 \cdot 6670}{1 \cdot 478,8} = 13,9 > 2.$$

Защита от замыканий на землю выполняется на основе ЗЗП – 1.

Удельный емкостной ток линии:

Для ААБ – 10(3×95) –  $I_{снг} = 1,1 \text{ А/км}$ ;

$$I_{сз} = k_{отс} k_{бр} I_{с}, \quad (81)$$

где  $k_{отс}$  – коэффициент отстройки,  $k_{отс} = 1,2$ ;

$k_{бр}$  – коэффициент, учитывающий бросок емкостного тока,  $k_{бр} = 3$ ;

$I_{с}$  – собственный емкостной ток линии:

$$I_{с} = I_{снг} l, \quad (82)$$

$$I_{с} = 1,1(0,17+0,12+0,075) = 0,4 \text{ А,}$$

$$I_{сз} = 1,2 \cdot 3 \cdot 0,4 = 1,44 \text{ А.}$$

Суммарный емкостной ток всей электрически связанной сети для нашего завода:

$$I_{c\Sigma} = 1,1(0,095+0,2+0,195+0,365) + 1,23 \cdot 2 \cdot 0,2 = 1,43 \text{ А.}$$

Принимаем  $I_{c3} = 0,5 \text{ А.}$

Тогда чувствительность:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{c\Sigma}}{I_{c3}}, \quad (83)$$

$$k_{\text{ч}} = \frac{1,43}{0,5} = 2,86 > 1,25.$$

Чувствительность достаточная.

## 7.5 Защита кабельной линии КЛ1 (А1)

Токовая отсечка:

Ток срабатывания защиты:

$$I'_{\text{сзА1}} = k'_{\text{отс}} I_{\text{к внмах}}^{(3)}, \quad (84)$$

$$I'_{\text{сзА1}} = 1,2 \cdot 8210 = 9936 \text{ А.}$$

Для выполнения защиты используется реле РТ – 40, соединенные по двухфазной двух релейной схеме с коэффициентом схемы  $k_{\text{сх}}^{(3)} = 1$ ,  $k_{\text{сх}}^{(2)} = 1$ .

Коэффициент чувствительности:

$$k'_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{ПК1}}^{(2)}}{I'_{\text{сзА1}}}, \quad (85)$$

$$k'_{\text{ч}} = \frac{8400}{9936} = 0,85 < 2.$$

Чувствительность недостаточна, поэтому защиту выполняем при помощи токовой отсечки с выдержкой времени, тогда:

$$I''_{сзА1} = k''_{отс} I'_{сзА2}, \quad (86)$$

$$I''_{сзА1} = 1,1 \cdot 1140 = 1254 \text{ А.}$$

где  $I'_{сзА2}$  – ток срабатывания защиты А2 отсечки без выдержки времени, А;

$k''_{отс}$  – коэффициент отстройки,  $k''_{отс} = 1,1$ .

Проверяем чувствительность:

$$k''_{ч} = \frac{I^{(2)}_{пк2}}{I''_{сзА1}}, \quad (87)$$

$$k''_{ч} = \frac{7170}{1254} = 5,7 < 2.$$

Время срабатывания защиты:

$$t''_{сзА1} = t'_{сзА2} + \Delta t, \quad (88)$$

$$t''_{сзА1} = 0,75 + 0,5 = 1,25 \text{ с.}$$

где  $\Delta t$  – ступень селективности, принимаем  $\Delta t = 0,5$  с.

Ток срабатывания реле:

$$I'''_{сз} = \frac{k'''_{отс} \cdot k_{сзп}}{k_{в}} \cdot I_{\text{раб.мах}}, \quad (89)$$

$$I'''_{сз} = \frac{1,2 \cdot 1,5}{0,8} \cdot 1084,7 = 2286 \text{ А.}$$

Коэффициент чувствительности для двухфазной двух релейной схемы на базе РТ – 40 :

– при дальнем резервировании:

$$k_{\text{ч}}^{///} = \frac{I_{\text{к5}}^{(2)}}{I_{\text{с3}}^{///}} = \frac{5700}{2286} = 2,5 > 1,2 .$$

– при ближнем резервировании:

$$k_{\text{ч}}^{///} = \frac{I_{\text{к2}}^{(2)}}{I_{\text{с3}}^{///}} = \frac{7170}{2286} = 3,1 > 1,5.$$

Чувствительность удовлетворяет требованиям

Ток срабатывания реле:

$$I_{\text{ср}}^{///} = \frac{I_{\text{с3}}^{///}}{k'} \quad (90)$$

$$I_{\text{ср}}^{///} = 2286/200 = 11,43 \text{ А.}$$

Время срабатывания защиты  $I_{\text{ср}}^{///}$  выбираем по ступенчатому принципу и уточняется по карте селективности.

Защита от замыканий на землю. Неселективная сигнализация от замыканий на землю выполняется в виде максимальной защиты напряжения нулевой последовательности. Реле напряжения подключается к трансформатору напряжения, установленного на шинах ГРП предприятия. Для этой цели используется его дополнительная обмотка, соединенная в разомкнутый треугольник. При отсутствии замыкания на землю на выводах разомкнутого треугольника имеется напряжение небаланса порядка 4 В. Поэтому напряжение срабатывания реле  $U_{\text{ср}}$  принимается равным 6 В. При замыкании на землю в любой точке электрически связанной сети напряжение на реле достигает 100 В и реле срабатывает.

## 7.6 Устройство автоматического включения резерва

«В системе электроснабжения при наличии двух и более источников питания целесообразно работать по разомкнутой схеме. При этом электроснабжение потребителей, потерявших питание, можно восстановить автоматическим подключением к другому источнику питания с помощью устройства автоматического включения резервного источника (УАВР)» [16].

Признаком потери питания является исчезновение напряжения, поэтому в качестве пусковых органов УАВР используют минимальное реле напряжения.

Время срабатывания УАВР:

$$t''_{\text{АВР1}} \geq t'''_{\text{сзмах}} + \Delta t, \quad (91)$$

$$t''_{\text{АВР1}} \geq 0,75 + 0,5 = 1,25 \text{ с}$$

где  $t'''_{\text{сзмах}}$  – максимальная выдержка времени максимальной токовой защиты линий, отходящих от шин ГРП;

$\Delta t$  – ступень селективности, с.

Напряжение срабатывания минимального пускового органа:

$$U_{\text{ср1}} = 0,25 \frac{U_{\text{ном}}}{K_u}, \quad (92)$$

где  $K_u$  – коэффициент трансформации трансформатора напряжения:

$$K_u = \frac{U_{1\text{ном}}}{U_{2\text{ном}}} = \frac{U_{\text{ном.сети}}}{U_{2\text{ном.TV}}}, \quad (93)$$

$$K_u = \frac{10000}{100} = 100,$$

$$U_{\text{ср1}} = 0,25 \frac{10000}{100} = 25 \text{ В.}$$

Напряжение срабатывания максимального реле напряжения:

$$U_{\text{ср2}} = 0,65 \frac{U_{\text{НОМ}}}{K_u}, \quad (94)$$

$$U_{\text{ср2}} = 0,65 \frac{10000}{100} = 65 \text{ В.}$$

Требование однократного действия УАВР выполняется, если принять продолжительность воздействия на включение секционного выключателя:

$$t_{\text{АВР2}} = t_{\text{вв}} + t_{\text{зап}}, \quad (95).$$

$$t_{\text{АВР2}} = 0,1 + 0,5 = 0,6 \text{ с.}$$

где  $t_{\text{вв}}$  – время включения выключателя, с;

$t_{\text{зап}}$  – время запаса, с.

Вывод по разделу.

В данном разделе выбраны и рассчитаны цепи оперативного тока, плавкие предохранители, автоматические выключатели, УАВР, а также спроектирована защита КЛ1 и КЛ2.

Релейная защита и автоматика позволила повысить надежность электроснабжения цехов тракторостроительного завода.

## Заключение

В ходе работы над ВКР по теме «Электроснабжение тракторостроительного завода» были определены:

- Расчетные нагрузки объектов (цехов) завода и расчетные нагрузки в целом. Полная мощность тракторостроительного завода в результате расчетов составляет 20778 МВА;
- Определены мощность цеховых трансформаторов. В составе каждой из 12 КТП используется по два силовых трансформатора;
- Рассчитаны и выбраны компенсирующие устройства. В качестве компенсирующих устройств выбраны конденсаторные установки. Компенсация реактивной мощности позволила снизить нагрузку на силовое оборудование;
- Выбраны схемы внешнего и внутреннего электроснабжения. Выбор схемы проводился на основании технико-экономического расчета;
- Определены марки и сечение вводного и внутризаводских кабелей;
- Определены токи КЗ в заданных точках схемы электроснабжения завода. Самым большим ударным током обладает КЗ в точке К1 на стороне 10 кВ;
- По рассчитанным токам КЗ были выбраны и проверены с использованием данных каталогов производителей и расчетов вакуумные выключатели, измерительные трансформаторы напряжения и тока, шины, изоляторы, а также вводные автоматические выключатели 0,4 кВ.
- Рассчитана релейная защита цехового трансформатора; кабельных линий 10 кВ и УАВР, цепи оперативного тока, выбраны плавкие предохранители, автоматические выключатели, а также спроектирована защита КЛ1 и КЛ2

## 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: 08.02.2022).
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: 08.02.2022).
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: 08.02.2022).
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: 08.02.2022).
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: 08.02.2022).
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: 08.02.2022).
7. Нерегулируемые конденсаторные установки типа УКЛ(П) [Электронный ресурс]: Официальный сайт ТОО «Усть-Каменогорский конденсаторный завод». URL: <https://www.ukkz.com/ru/catalog/u-k/visokogo-napryazheniya/modernizirovannye.html> (дата обращения: 08.02.2022).



8. Номенклатурный каталог электрооборудования высокого, среднего и низкого напряжения [Электронный ресурс] : Каталог ПКФ «Автоматика». URL: <http://www.tulaavtomatika.ru/pdf/Nomenkl2014.pdf> (дата обращения: 08.02.2022).

9. 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: 08.02.2022).

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

11. Расчет сетей по потерям напряжения [Электронный ресурс] : интернет-сайт. URL: <http://electricalschool.info/main/elsnabg/905-raschet-setejj-po-poterjam-naprzazhenija.html> (дата обращения: 08.02.2022).

12. 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: 08.02.2022).

13. 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: 08.02.2022).

14. Трансформатор тока ТЛК-10 [Электронный ресурс] : Официальный сайт ООО «Новочебоксарский электромеханический завод». URL: [https://nemz.ru/transformator\\_tlk-10](https://nemz.ru/transformator_tlk-10) (дата обращения: 08.02.2022).

15. Трансформаторы тока ТПЛК-10 [Электронный ресурс] : Официальный сайт ОАО «Свердловский завод трансформаторов тока». URL: [https://www.cztt.ru/tplk\\_10.html](https://www.cztt.ru/tplk_10.html) (дата обращения: 08.02.2022).

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

17. 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.

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

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

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