

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
Образовательное учреждение высшего образования  
**«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВО  
«Сибирский федеральный университет»  
институт

«Электроэнергетика, машиностроение и автомобильный транспорт»  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ А.С. Торопов  
подпись                      инициалы, фамилия  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

код – наименование направления

Электроснабжение завода по выпуску древесностружечных плит г. Иркутск

тема

Руководитель	_____	<u>доцент, к.т.н.</u>	<u>Г.Н. Чистяков</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		<u>А.А. Дмитриев</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Нормоконтролер	_____		<u>И.А. Кычакова</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия

Абакан 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. Теоретическая часть.....	4
1.1 Общая характеристика завода по выпуску древесностружечных плит.....	4
1.2 Особенности проектирования систем электроснабжения завода по выпуску древесностружечных плит .....	6
2. Аналитическая часть.....	7
2.1 Обзор методов проектирования систем электроснабжения завода по выпуску древесностружечных плит.....	7
2.2 Схемы электроснабжения завода .....	7
3. Практическая часть .....	9
3.1 Расчет нагрузок завода .....	9
3.2 Выбор и расчет системы электроснабжения завода по выпуску древесностружечных плит .....	12
3.3 Расчет токов КЗ .....	27
3.4 Выбор защитного оборудования системы электроснабжения завода...	35
3.5 Выбор и расчет систем заземления и молниезащиты .....	38
3.6 Выбор системы учета электрической энергии завода по выпуску древесностружечных плит .....	45
3.7 Расчет стоимости схемы электроснабжения завода.....	46
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	49
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	51
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Генеральный план завода .....	52
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. План прокладки кабельных линий.....	53

## ВВЕДЕНИЕ

В ВКР проводится разработки системы электроснабжения (СЭС) предприятия.

Актуальность разработки заключается в том, что электроснабжение завода необходимо для обеспечения технологических процессов работы предприятия. Производственное оборудование завода включает в себя большое число электроприемников (асинхронные электроприводы, станки, преобразователи, технологические линии и т.д.), эксплуатация которых требует качественного и надежного питания от электрической сети.

Объект исследования: завод по выпуску древесностружечных плит (ДСП) г. Иркутск.

Предмет исследования: электроснабжение завода.

Цель работы: разработка надежного и энергоэффективного электроснабжения предприятия.

Задачи работы:

- рассмотреть особенности и методы проектирования СЭС завода;
- определить электрические нагрузки;
- выбрать силовые трансформаторы цеховых трансформаторных подстанций (ТП) и главного распределительного пункта (ГРП);
- рассчитать внешнее и внутреннее электроснабжение;
- определить токи КЗ;
- выбрать электрооборудование ГРП;
- выбрать защитное оборудование СЭС завода;
- провести выбор и расчет систем заземления и молниезащиты;
- провести расчет стоимости схемы электроснабжения завода.

Практическая значимость работы состоит в возможности реализации электроснабжения завода ДСП согласно разработанной СЭС. Также результаты работы могут быть использованы при разработке СЭС других предприятий и подобных объектов.

## 1. Теоретическая часть

### 1.1 Общая характеристика завода по выпуску древесностружечных плит

Рассматриваемое предприятие – планируемый к постройке завод по выпуску древесностружечных плит, г. Иркутск [10].

Ведомость нагрузок завода – в таблице 1.

Таблица 1 – Ведомость нагрузок завода

№	Цеха	$\Sigma P_{ном}$ , кВт	cosφ	Kс
1	Сырьевой цех	2690	0,74	0,56
2	Деревообрабатывающий цех	2895	0,74	0,73
3	Склад	400	0,92	0,39
4	Цех ДСП №1	1290	0,74	0,6
5	Цех ДСП №2	710	0,74	0,55
6	Цех ДСП №3	1100	0,74	0,48
7	Цех смол	1120	0,85	0,54
8	Заводоуправление	180	0,9	0,3
9	Прессовочный цех	495	0,81	0,3
10	Компрессорная 0,38 кВ	240	0,8	0,6
	10 кВ	2000	0,8	0,6
11	Сушильный цех №1	1610	0,82	0,7
12	Сушильный цех №2	200	0,82	0,7
13	Гараж	410	0,92	0,25
14	Насосная	930	0,75	0,58
15	Покрасочная	300	0,74	0,3

Технологический процесс производства ДСП включает первичную переработку древесного сырья в сырьевом цехе, изготовление плит ДСП в специализированных цехах, их финишную прессовку, сушку и покраску. Готовая

продукция поставляется на склад, отгрузка продукции осуществляется грузовым автотранспортом.

На территории предприятия расположено 15 производственных участков (ПУ). Генплан завода – в Приложении А.

Категории надёжности электроснабжения ПУ – в таблице 2.

Таблица 2 – Категории надёжности электроснабжения участков

Цеха	Категория
Сырьевой цех	2
Деревообрабатывающий цех	
Склад	3
Цех ДСП №1	2
Цех ДСП №2	
Цех ДСП №3	
Цех смол	
Заводуправление	3
Прессовочный цех	2
Компрессорная	1
Сушильный цех №1	2
Сушильный цех №2	
Гараж	3
Насосная	1
Покрасочная	2

Источником питания может служить подстанция (ПС) энергосистемы с напряжением 10 кВ на сборных шинах низкого напряжения (НН), ток трехфазного КЗ на шинах 10 кВ ПС составляет 3,74 кА. ПС расположена на расстоянии 2,3 км до предприятия. Питание завода будет выполнено по кабельной линии (КЛ) 10 кВ [10]. Необходимо разработать надежную и энергоэффективную систему электроснабжения (СЭС) завода.

## **1.2 Особенности проектирования систем электроснабжения завода по выпуску древесностружечных плит**

Данный завод является типовым средним промышленным предприятием. Согласно исходным данным и специфике производства, можно выделить следующие особенности проектирования СЭС:

- внешнее питания по КЛ 10 кВ предполагает питание предприятия от главного распределительного пункта (ГРП) 10 кВ;

- наличие ПУ 1 и 2 категорий надёжности электроснабжения предполагает общие требования к электроснабжению завода как к потребителю первой категории, электроснабжение ПУ первой категории должно обеспечиваться бесперебойно, для чего на шинах 10 кВ ГРП будет обеспечен автоматический ввод резерва (АВР) питания;

- необходимо учитывать пожароопасную специфику производства и принимать соответствующие технические решения (устанавливать противопожарные устройства защитного отключения (УЗО) и т.д.).

Наиболее значимыми вопросами проектирования СЭС предприятия являются обеспечение максимальной надёжности и энергоэффективности электроснабжения.

**Выводы.**

Приведена общая характеристика предприятия, систематизированы исходные данные для разработки СЭС. Проведен анализ исходных данных и специфики производства, особенностей проектирования СЭС данного предприятия, эти условия будут учтены при разработке СЭС рассматриваемого завода по выпуску ДСП.

## **2. Аналитическая часть**

### **2.1 Обзор методов проектирования систем электроснабжения завода по выпуску древесностружечных плит**

По результатам анализа литературы и иных источников информации, определены методы проектирования СЭС, которые будут использоваться при проектировании СЭС рассматриваемого завода:

- метод коэффициента спроса активных нагрузок: для расчетов электрических нагрузок участков и завода в целом;
- метод расчета нагрузки освещения по удельной мощности: для расчетов осветительных нагрузок;
- метод определения местоположения ГРП по центру электрических нагрузок и картограмме нагрузок: для выбора места расположения ГРП;
- метод расчета стоимости схемы СЭС по суммарным капиталовложениям: для определения стоимости схемы электроснабжения завода .

### **2.2 Схемы электроснабжения завода**

Внутреннее электроснабжение (по КЛ 10 кВ) завода выполняется по смешанной схеме электроснабжения. Это обусловлено экономией электротехнических материалов и оборудования. При дальнейшей эксплуатации СЭС смешанная схема также обеспечит снижение амортизационных и эксплуатационных расходов [6]. В целом, использование смешанной схемы рекомендовано для большинства случаев проектирования СЭС предприятий.

Электрическая часть ГРП включает электрооборудование, соединенное токоведущими частями по определенным схемам, регламентированными нормативными и техническими документами и правилами [9]. Правильный выбор и применение определенных типов схем обеспечат надежную длительную работу ГРП в течение всего расчетного эксплуатационного срока, а также минимальные капитальные и эксплуатационно-ремонтные затраты.

Схема ввода ГРП показана на рисунке 1.

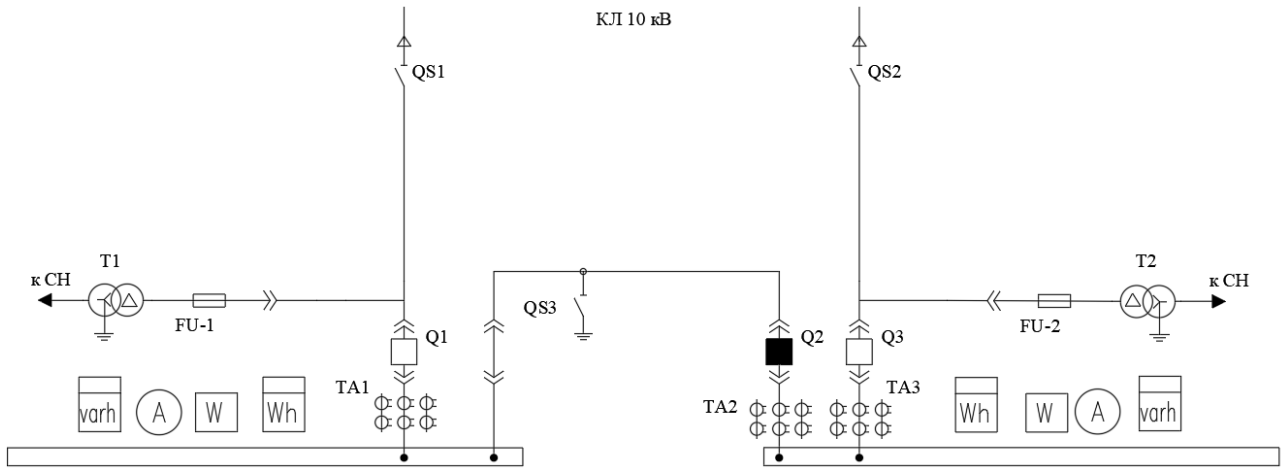


Рисунок 1 – Схема ввода ГРП

Схема одной секции шин ГРП показана на рисунке 2.

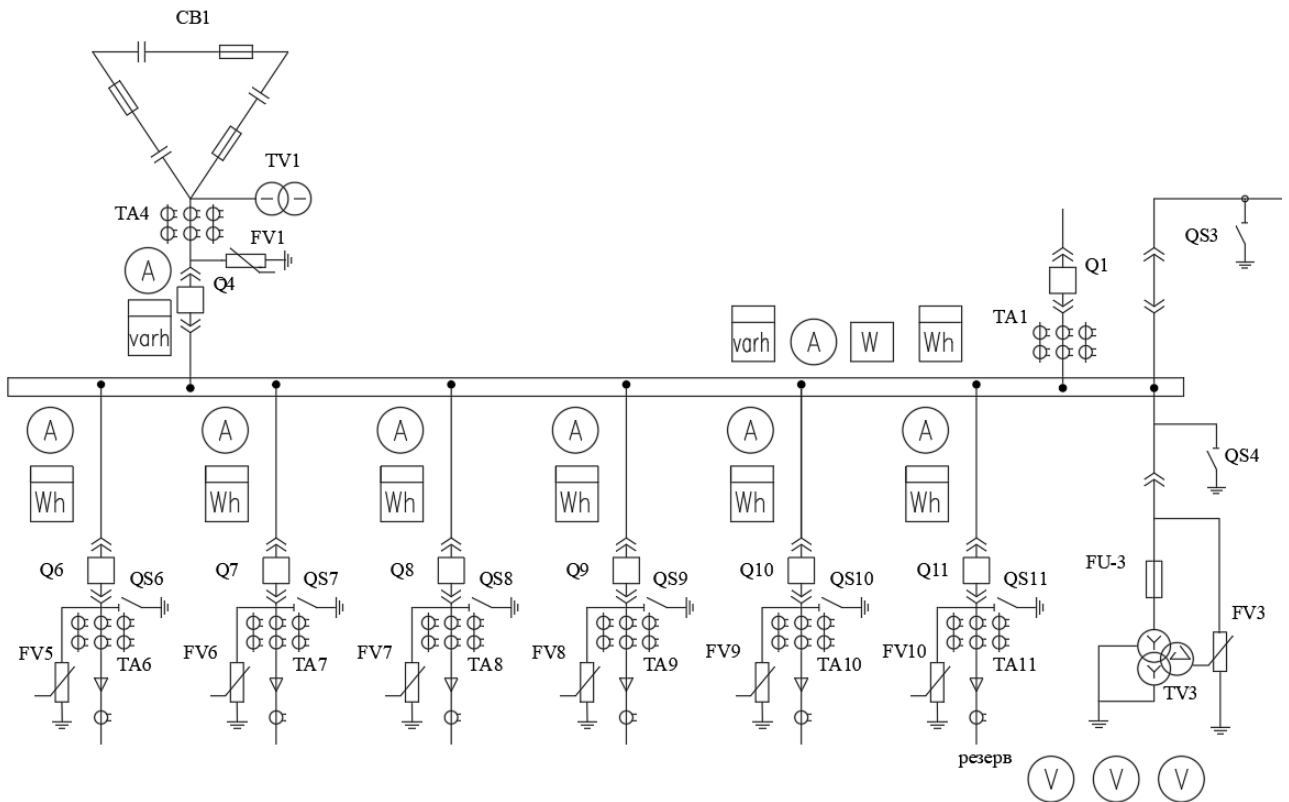


Рисунок 2 – Схема секции шин ГРП

Вывод: выбраны основные методы проектирования СЭС. Выбраны схемы электроснабжения завода. Внутреннее электроснабжение будет выполнено по смешанной схеме.



### 3. Практическая часть

#### 3.1 Расчет нагрузок завода

Нагрузки по участкам определяются методом коэффициентов спроса активной мощности [9].

Среднесменные нагрузки участков:

$$P_{cp} = K_c \cdot P_{уст}, \quad (1)$$

где  $K_c$  – коэффициент спроса нагрузки [10];

$P_{уст}$  – установленная нагрузка, кВт [10].

$$Q_{cp} = P_{cp} \cdot tg\varphi; \quad (2)$$

$$S_{cp} = \sqrt{P_{cp}^2 + Q_{cp}^2}. \quad (3)$$

Для сырьевого цеха (участок №1), параметры электропотребления по электрическим нагрузкам:

$$K_c = 0,56;$$

$$\cos\varphi = 0,74 \text{ (соответствует } tg\varphi = 0,91).$$

Согласно (1-3):

$$P_{cp} = 0,56 \cdot 2690 = 1506,4 \text{ кВт};$$

$$Q_{cp} = 1506,4 \cdot 0,91 = 1369,21 \text{ квар};$$

$$S_{cp} = \sqrt{1506,4^2 + 1369,21^2} = 2035,68 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Расчеты нагрузок сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Расчет нагрузок предприятия

№	Цеха	tgφ	Kc	Среднесменные нагрузки		
				Pc, кВт	Qc, квар	Sc, кВА
1	Сырьевой цех	0,91	0,56	1506,4	1369,21	2035,68
2	Деревообрабатывающий цех	0,91	0,73	2113,35	1920,88	2855,88
3	Склад	0,43	0,39	156	66,46	169,57
4	Цех ДСП №1	0,91	0,6	774	703,51	1045,95
5	Цех ДСП №2	0,91	0,55	390,5	354,94	527,70
6	Цех ДСП №3	0,91	0,48	528	479,91	713,51
7	Цех смол	0,62	0,54	604,8	374,82	711,53
8	Заводоуправление	0,48	0,3	54	26,15	60,00
9	Прессовочный цех	0,72	0,3	148,5	107,51	183,33
10	Компрессорная 0,38 кВ	0,75	0,6	144	108,00	180,00
	10 кВ	0,75	0,6	1200	0	1200
11	Сушильный цех №1	0,7	0,7	1127	786,65	1374,39
12	Сушильный цех №2	0,7	0,7	140	97,72	170,73
13	Гараж	0,43	0,25	102,5	43,66	111,41
14	Насосная	0,88	0,58	539,4	475,71	719,20
15	Покрасочная	0,91	0,3	90	81,80	121,62
Σ				9618,45	6996,94	11894,19

Осветительные нагрузки по участкам:

$$P_{po} = P_0 \cdot K_{co} \cdot F, \quad (4)$$

где  $P_0$  – удельная мощность (светодиодное освещение), Вт/м<sup>2</sup>;

$K_{co}$  – коэффициент спроса освещения [2];

$F$  – площадь здания, м<sup>2</sup>.

$$Q_{po} = P_{po} \cdot tg\varphi. \quad (5)$$

Для участка №1, по (4,5):

$$P_{po} = 3,8 \cdot 0,95 \cdot 2991 = 10,8 \text{ кВт};$$

$$Q_{po} = 10,8 \cdot 0,88 = 9,503 \text{ квар.}$$

С освещением нагрузки участка №1:

$$P_p' = 1506,4 + 10,8 = 1517,2 \text{ кВт};$$

$$Q_p' = 1369,21 + 9,503 = 1378,71 \text{ квар};$$

$$S_p' = \sqrt{1517,2^2 + 1378,71^2} = 2050,06 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Нагрузки по всем ПУ сведены в таблице 4.

Таблица 4 – Нагрузки участков (с учетом освещения)

№	Цеха	F, м <sup>2</sup>	P <sub>po</sub> , кВт	Q <sub>po</sub> , квар	P <sub>p</sub> +P <sub>po</sub> , кВт	Q <sub>p</sub> +Q <sub>po</sub> , квар	S <sub>p</sub> ', кВА
1	Сырьевой цех	2991	10,80	9,50	1517,20	1378,71	2050,06
2	Деревообрабатывающий цех	2846	10,27	9,04	2123,62	1929,92	2869,56
3	Склад	2907	3,84	3,38	159,84	69,83	174,43
4	Цех ДСП №1	3215	11,61	10,21	785,61	713,72	1061,40
5	Цех ДСП №2	3744	13,52	11,89	404,02	366,83	545,71
6	Цех ДСП №3	4744	15,32	13,48	543,32	493,40	733,92
7	Цех смол	4250	15,34	13,50	620,14	388,32	731,69
8	Заводоуправление	1674	5,89	5,19	59,89	31,34	67,60
9	Прессовочный цех	2485	8,97	7,90	157,47	115,41	195,23
10	Компрессорная 0,38 кВ	1070	3,66	3,22	147,66	111,22	184,86
	10 кВ	1070	0	0	1200	0	1200
11	Сушильный цех №1	3297	10,65	9,37	1137,65	796,02	1388,49
12	Сушильный цех №2	3358	10,84	9,54	150,84	107,26	185,09
13	Гараж	3785	12,94	11,39	115,44	55,06	127,90
14	Насосная	2233	7,64	6,72	547,04	482,43	729,37
15	Покрасочная	3541	11,44	10,06	101,44	91,87	136,85
	∑ по цехам	47209	152,73	134,40	9771,18	7131,35	12096,78
	Территория	130591	26,12		26,12	22,98	
∑					9797,30	7154,33	12131,43

### 3.2 Выбор и расчет системы электроснабжения завода по выпуску древесностружечных плит

Нагрузки ПУ распределяются по ТП 10/0,4 кВ с учетом оптимальной мощности трансформаторов. ПУ с нагрузкой менее 250 кВ·А следует питать от РП 0,4 кВ [1].

Оптимальная мощность трансформаторов ТП:

$$S_o = \frac{S_{см}}{\beta \cdot n}, \quad (6)$$

где  $S_{см}$  – нагрузка, кВ·А;

$\beta$  – нормативный коэффициент загрузки [8];

$n$  – число трансформаторов, шт.

Потери мощности в КЛ до ТП:

$$\Delta P_{Л} \approx 0,03 \cdot S_p. \quad (7)$$

Расчетная мощность компенсирующих устройств (КУ):

$$Q_{пк.у.} = \sum P_p \cdot (tg \varphi_p - tg \varphi_{ЭК}); \quad (8)$$

$$\sum P_p = P_p + \Delta P_{Л}, \quad (9)$$

где  $P_p$  – активная нагрузка, кВт;

$tg \varphi_p$  – расчетный тангенс угла  $\varphi$  нагрузки;

$tg \varphi_{ЭК} = 0,35$  – оптимальный тангенс угла  $\varphi$  нагрузки [8].

$$tg \varphi_p = \frac{\sum Q_p}{\sum P_p}. \quad (10)$$

После выбора КУ:

$$Q_p' = Q_p - Q_{к.у.} \quad (11)$$

Пример выбора трансформаторов.

ТП-1 (сырьевой цех), нагрузки:  $P_p = 1517,2$  кВт,  $Q_p = 1378,7$  квар,  
 $S_p = 2050,1$  кВ·А.

Оптимальная мощность трансформаторов, по (6):

$$S_o = \frac{2050,1}{0,7 \cdot 2} = 1464,3 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Выбираю трансформаторы ТМГ35-1600/10, внешний вид энергоэффективного трансформатора серии ТМГ35 показан на рисунке 3.



Рисунок 3 – Силовой трансформатор серии ТМГ35

Для всех ТП расчеты сведены в таблице 5.

Таблица 5 – Выбор силовых трансформаторов ТП

№ ТП	Нагрузка, № ПУ	Распол. на генплане, № здания	Pr, кВт	Qp, квар	Sp, кВА	So, кВА	Sn.т, кВА
ТП-1	1	Здание №1	1517,2	1378,7	2050,1	1464,3	1600
ТП-2	2	Здание №2	2123,6	1929,9	2869,6	2049,7	2500
ТП-4	4,3,8	Здание №4	1005,3	814,9	1294,1	924,4	1000
ТП-5	5,13, освещ. терр.	Здание №5	545,6	444,9	704,0	502,8	630
ТП-6	6	Здание №6	543,3	493,4	733,9	524,2	630
ТП-7	7	Здание №7	620,1	388,3	731,7	522,6	630
ТП-9	9,12,15	Здание №9	409,8	314,5	516,6	369,0	400
ТП-11	11,10	Здание №11	1285,3	907,2	1573,2	1123,7	1250
ТП-14	14	Здание №14	547,0	482,4	729,4	521,0	630

Расчет КРМ на ТП-1.

Потери мощности в линии до ТП, по (7):

$$\Delta P_{л} = 0,03 \cdot 2050,1 = 61,5 \text{ кВт.}$$

Расчетная мощность КУ, по (8-10):

$$\sum P_p = 1517,2 + 61,5 = 1578,7 \text{ кВт.};$$

$$\operatorname{tg} \varphi_p = \frac{1378,7}{1578,7} = 0,87;$$

$$Q_{pк.у.} = 1578,7 \cdot (0,87 - 0,35) = 826,2 \text{ квар.}$$

Принимаем две АУКРМ-0,4-415 по 415 квар, внешний вид показан на рисунке 4.



Рисунок 4 – Компенсирующая установка АУКРМ

Нагрузки ТП после КРМ, по (11,3):

$$Q_p' = 1378,71 - 2 \cdot 415 = 548,71 \text{ квар.}$$

$$S_p' = \sqrt{1578,1^2 + 548,71^2} = 1671,34 \text{ кВ} \cdot \text{А.}$$

Коэффициент загрузки трансформатора в послеаварийном режиме:

$$K_n = \frac{S_p}{S_{н.т.}}, \quad (12)$$

где  $S_{н.т.}$  – номинальная мощность, кВА.

$$K_n = \frac{2050,1}{1600} = 1,28 \leq 1,4.$$

Расчет КРМ на ТП сведен в таблице 6.

Таблица 6 – Расчет КРМ на ТП

№ ТП	$\Delta P_{л}, \text{кВт}$	$\sum P_{р}, \text{кВт}$	$\text{tg}\varphi_{р}$	$Q_{р.к.у.}, \text{квар}$	Число и мощность АУКРМ, шт·квар	$Q_{р'}, \text{квар}$	$S_{р'}, \text{кВА}$	Кп
ТП-1	61,50	1578,70	0,87	826,2	2·415	548,71	1671,34	1,28
ТП-2	86,09	2209,71	0,87	1156,5	2·580	769,92	2340,00	1,15
ТП-4	38,82	1044,16	0,78	449,4	2·225	364,90	1106,08	1,29
ТП-5	21,12	566,70	0,79	246,5	2·125	194,87	599,27	1,12
ТП-6	22,02	565,34	0,87	295,5	2·150	193,40	597,51	1,16
ТП-7	21,95	642,09	0,60	163,6	2·85	218,32	678,20	1,16
ТП-9	15,50	425,25	0,74	165,7	2·85	144,54	449,14	1,29
ТП-11	47,20	1332,50	0,68	440,9	2·220	467,24	1412,05	1,26
ТП-14	21,88	568,92	0,85	283,3	2·145	192,43	600,58	1,16

Итого выбраны комплектные КТПН-10/0,4 с трансформаторами марок ТМГ35-400...1600 кВ·А и ТМГ12-2500 кВ·А. КРМ на ТП будет обеспечиваться автоматическими установками АУКРМ.

Потери мощности в трансформаторах ТП:

$$\Delta P_m = \frac{\Delta P_{\kappa}}{n} \cdot \frac{P_p^2 + Q_p^2}{S_n^2} + n \cdot \Delta P_{xx}, \quad (13)$$

где  $\Delta P_{\kappa}$  – потери КЗ, кВт;

$\Delta P_{xx}$  – потери ХХ, кВт.

$$\Delta Q_m = \frac{U_{\kappa}}{n \cdot 100} \cdot \frac{P_p^2 + Q_p^2}{S_n^2} + \frac{n \cdot I_{xx}}{100} \cdot S_n, \quad (14)$$

где  $U_{\kappa}$  – напряжение КЗ, %;

$I_{xx}$  – ток ХХ, %.

Потери мощности в ТП-1, по (13,14):



$$\Delta P_m = \frac{16}{2} \cdot \frac{1578,7^2 + 548,7^2}{1600^2} + 2 \cdot 1,7 = 12,13 \text{ кВт};$$

$$\Delta Q_m = \frac{6}{2 \cdot 100} \cdot \frac{1578,7^2 + 548,7^2}{1600^2} + \frac{2 \cdot 0,5}{100} \cdot 1600 = 68,38 \text{ квар}.$$

Расчет потерь мощности на ТП сведен в таблицу 7.

Таблица 7 – Расчет потерь мощности на ТП

№	$\Delta P$ , кВт	$\Delta Q$ , квар	$P_p + \Delta P$ , кВт	$Q_p + \Delta Q$ , квар
ТП-1	12,13	68,38	1590,83	617,09
ТП-2	14,46	85,23	2224,17	855,16
ТП-4	8,62	45,64	1052,78	410,54
ТП-5	4,65	24,50	571,35	219,37
ТП-6	4,64	24,40	569,98	217,80
ТП-7	5,51	28,90	647,60	247,22
ТП-9	2,90	18,55	428,15	163,09
ТП-11	11,32	60,35	1343,83	527,59
ТП-14	4,67	24,56	573,58	216,99
$\Sigma$	68,90	380,51	9866,20	4927,48

Нагрузки ГРП:

$$Q_{10} = \Sigma Q_{HH} + \Sigma \Delta Q_m; \quad (15)$$

$$P_{сумм} = \Sigma P_p + \Sigma \Delta P_m, \quad (16)$$

где  $\Sigma Q_{HH}$ ,  $\Sigma P_p$  – нагрузки ТП и РУ, квар (кВт);

$\Sigma \Delta Q_m$ ,  $\Sigma \Delta P_m$  – потери мощности в ТП, квар (кВт).

$$Q_{10} = 4546,96 + 380,51 = 4927,48 \text{ квар};$$

$$P_{\text{сумм}} = 9797,3 + 68,9 = 9866,2 \text{ кВт.}$$

Подлежащая компенсации на каждой шине 10 кВ РМ:

$$Q_{\text{ку}} / 2 = \frac{Q_{10} - Q_{\text{сист}} - Q_c}{2}, \quad (17)$$

где  $Q_{\text{сист}}$ ,  $Q_c$  – РМ, получаемая из энергосистемы и от СД, квар.

$$Q_c = \frac{\alpha_m \cdot P_n \cdot \text{tg}\varphi_n}{\eta_n}, \quad (18)$$

где  $\alpha_m$  – допустимая перегрузка СД по РМ;

$P_n$  – номинальная мощность СД, кВт;

$\text{tg}\varphi_n$  – соответствующий номинальному  $\cos\varphi$ ;

$\eta_n$  – КПД, о.е.

Для СД 1000 кВт:

$$P_n = 2 \cdot 1000 = 2000 \text{ кВт};$$

$$Q_c = \frac{0,92 \cdot 2000 \cdot 0,75}{0,95} = 1452,63 \text{ квар.}$$

$$Q_{\text{сист}} = \alpha \cdot \sum P_p, \quad (19)$$

где  $\alpha$  – эквивалент нормативного  $\text{tg}\varphi=0,33$ .

$$Q_{\text{ку}} / 2 = \frac{4927,48 - 0,33 \cdot 9797,3 - 1452,63}{2} = 120,9 \text{ квар.}$$

Принимается к установке две батареи УК56-10,5-125 по 125 квар, внешний вид показан на рисунке 5.



Рисунок 5 – Конденсаторные батареи УК56-10,5

Итого нагрузки ГРП:

$$Q_{pk} = 4927,48 - 2 \cdot 125 = 4677,48 \text{ квар};$$

$$P_{pk} = P_{сумм} = 9866,2 \text{ кВт}.$$

С учетом разновременности нагрузок:

$$S_p = \sqrt{(k_{pма} \cdot P_{pk})^2 + (k_{pмр} \cdot Q_{pk})^2}, \quad (20)$$

где  $k_{pма}$  и  $k_{pмр}$  – коэффициенты разновременности [1].

$$S_p = \sqrt{(0,9 \cdot 9866,2)^2 + (0,9 \cdot 4677,48)^2} = 9826,94 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

ГРП целесообразно располагать в центре электрических нагрузок (ЦЭН). Это обеспечит минимальную общую протяженность КЛ распределительной се-

ти, траншей под прокладку кабелей и минимальные потери электроэнергии в линиях [7]. Для определения координат ЦЭН и наглядности показа электрических нагрузок далее производится построение картограммы нагрузок.

Радиус окружностей, показывающих нагрузки цехов:

$$R = \sqrt{\frac{S_p}{\pi \cdot m}}, \quad (21)$$

где  $S_p$  – нагрузка, кВ·А;

$m$  – масштаб.

Сектор нагрузки освещения:

$$\alpha = 360 \cdot S_{oc} / S_p, \quad (22)$$

где  $S_{oc}$  – нагрузка освещения, кВ·А.

Координаты ЦЭН:

$$x_0 = \frac{\sum_1^n (S_p \cdot x_i)}{\sum_1^n S_p}; \quad y_0 = \frac{\sum_1^n (S_p \cdot y_i)}{\sum_1^n S_p}, \quad (23)$$

где  $x_i, y_i$  – координаты центра ПУ, м;

$n$  – число ПУ, шт.

Расчёт координат ЦЭН сведен в таблицу 8.

Таблица 8 – Расчет координат ЦЭН

Цеха	$X_i$ , м	$Y_i$ , м	$S_p$ , кВА	$S_p \cdot X_i$ , кВА	$S_p \cdot Y_i$ , кВА
Сырьевой цех	62	326	2050	127400	668849

Окончание таблицы 8

Цеха	X <sub>i</sub> , м	Y <sub>i</sub> , м	Sp, кВА	Sp·X <sub>i</sub> , кВА	Sp·Y <sub>i</sub> , кВА
Деревообрабатывающий цех	210	326	2870	601855	936219
Склад	326	318	174	56908	55553
Цех ДСП №1	470	318	1061	498826	338047
Цех ДСП №2	35	206	546	19076	112335
Цех ДСП №3	155	202	734	114023	148230
Цех смол	299	206	732	218827	150621
Заводоуправление	435	225	68	29406	15228
Прессовочный цех	540	194	195	105403	37915
Компрессорная 0,38 кВ	132	113	185	24412	20822
10 кВ	132	113	1200	158468	135164
Сушильный цех №1	284	105	1388	393683	145609
Сушильный цех №2	388	105	185	71891	19411
Гараж	31	54	128	3974	6955
Насосная	284	23	729	206801	16997
Покрасочная	552	43	137	75479	5847
Σ			12131	2706432	2813801
Координаты ЦЭН	X, м	Y, м			
	223	202			

Участок №1 (сырьевой цех). Радиус окружности и доля сектора освещения, по (21,22):

$$R = \sqrt{\frac{2050}{0,4 \cdot 3,14}} = 40,4 \text{ м};$$

$$\alpha = 360 \cdot 14,4 / 2050 = 2,5^\circ.$$

Расчёты сведены в таблице 9.

Таблица 9 – Расчет картограммы нагрузок

Цеха	R, м	$\alpha$	S <sub>ос</sub> , кВА
Сырьевой цех	40,40	0,4	2,5
Деревообрабатывающий цех	47,80	0,4	1,7
Склад	11,78	0,4	10,6
Цех ДСП №1	29,07	0,4	5,2
Цех ДСП №2	20,84	0,4	11,9
Цех ДСП №3	24,17	0,4	10,0
Цех смол	24,14	0,4	10,1
Заводуправление	7,34	0,4	41,9
Прессовочный цех	12,47	0,4	22,1
Компрессорная 0,38 кВ	12,13	0,4	9,5
10 кВ	30,91	0,4	0,0
Сушильный цех №1	33,25	0,4	3,7
Сушильный цех №2	12,14	0,4	28,1
Гараж	10,09	0,4	48,6
Насосная	24,10	0,4	5,0
Покрасочная	10,44	0,4	40,1

С учетом расположения зданий и места подхода питающей ЛЭП, ГРП размещается за цехом №7, к северо-востоку от него.

Картограмма нагрузок показана на рисунке 6.

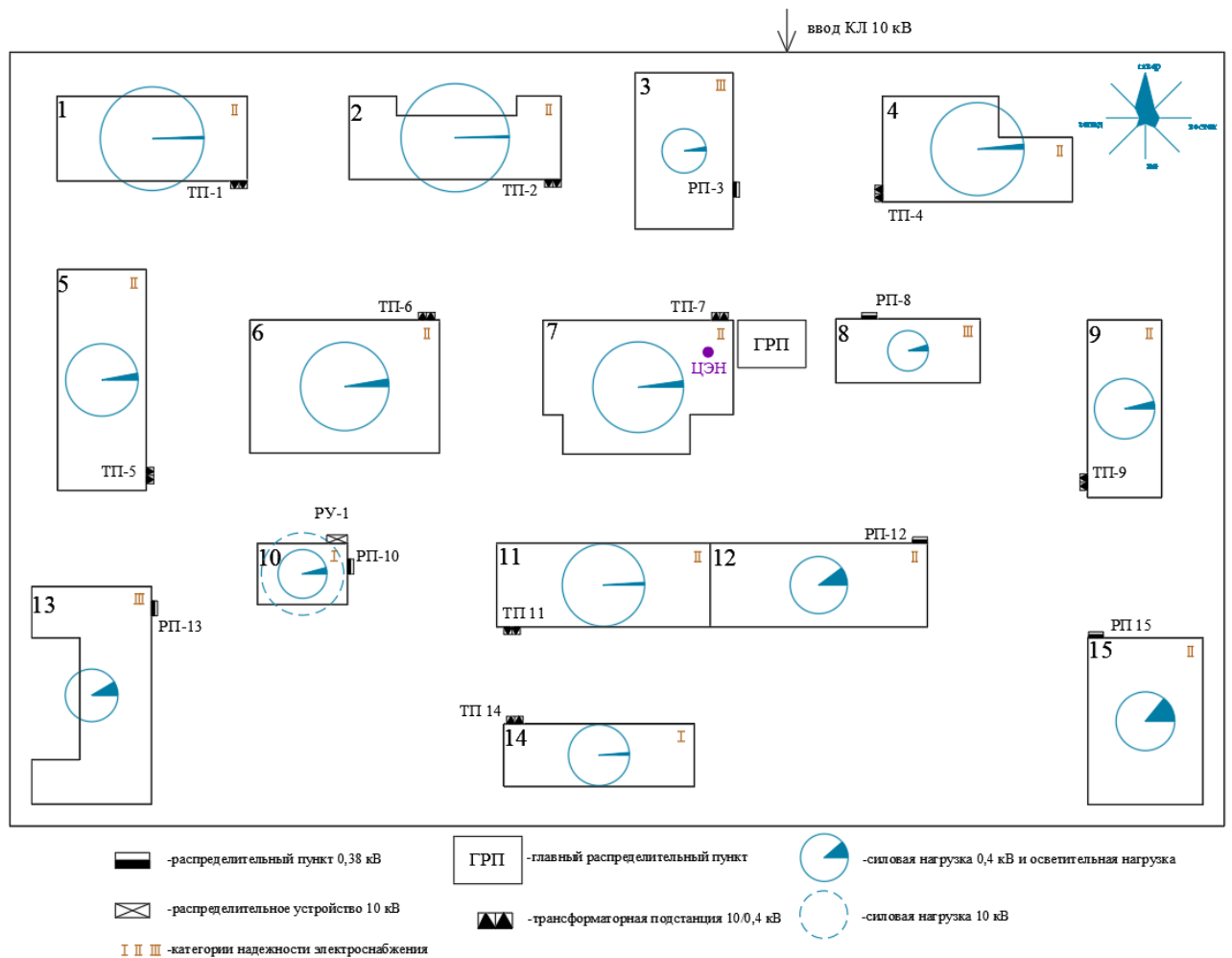


Рисунок 6 – Картограмма нагрузок

Источником питания будет служить ПС энергосистемы с напряжением НН 10 кВ [10]. Рабочий ток КЛ:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot n}, \quad (24)$$

где  $S_p$  – нагрузка, кВ·А;

$U_n$  – номинальное напряжение, кВ;

$n$  – число цепей, шт.

$$I_p = \frac{9826,9}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 2} = 270,2 \text{ А.}$$

Экономическое сечение жил:

$$F_{\text{эк}} = \frac{I_p}{j_{\text{эк}}}, \quad (25)$$

где  $j_{\text{эк}}$  – экономическая плотность тока, А/мм<sup>2</sup>.

$$F_{\text{эк}} = \frac{270,2}{1,4} = 193 \text{ мм}^2.$$

С учетом удвоенного аварийного тока КЛ, принимаются провода АПВП-1х400.

Ток аварийного режима, по (24):

$$I_{\text{ав}} = \frac{9826,9}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 1} = 540,3 \text{ А} < I_{\text{дон}} = 570 \text{ А}.$$

Потери напряжения в КЛ:

$$\Delta U_n = \frac{\sqrt{3} \cdot I_p \cdot L \cdot 100}{U_n} (r_0 \cdot \cos \varphi + x_0 \cdot \sin \varphi), \quad (26)$$

где  $I_p$  – расчетный ток, А;

$L$  – длина КЛ, км;

$r_0$  и  $x_0$  – удельные сопротивления провода, Ом/км.

$$\Delta U_n = \frac{\sqrt{3} \cdot 540,3 \cdot 2,3 \cdot 100}{10500} (0,07 \cdot 0,904 + 0,056 \cdot 0,428) = 1,79 \% \leq 10 \%.$$

Распределительная сеть 10 кВ внутри предприятия выполняется по смешанной схеме электроснабжения (часть ТП запитывается по стороне



10 кВ от других ТП в соответствии с расположением ТП, ГРП и требованиям к категориям надежности электроснабжения цехов) как наиболее дешевой и выгодной в реализации и эксплуатации [2].

Для участка сети ГРП-ТП2, рабочий и послеаварийный (при отключении одной цепи) ток КЛ, по (24):

$$I_p = \frac{4089,2}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 2} = 118 \text{ A};$$

$$I_{ав} = \frac{4089,2}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 1} = 236,1 \text{ A}.$$

Экономическая плотность тока, по (25):

$$F_{эк} = \frac{118}{1,4} = 84 \text{ мм}^2.$$

С поправкой на аварийный ток, принимаем кабель АПвП 3х185,  $I_{доп}=264 \text{ A}$  (с учетом групповой прокладки) [12].

Потери напряжения в КЛ, по (26)

$$\Delta U_{л} = \frac{\sqrt{3} \cdot 236,1 \cdot 0,165 \cdot 100}{10500} (0,167 \cdot 0,932 + 0,08 \cdot 0,361) = 0,2 \% \leq 5 \%.$$

Выбранное сечение подходит. Кабель не будет перегреваться при полной загрузке КЛ и будет обеспечен достаточный уровень напряжения на вводе цеховой ТП.

Для КЛ 10 кВ расчеты сведены в таблицу 10.

Таблица 10 – Выбор кабелей 10 кВ

КЛ	Iав, А	Fст, мм <sup>2</sup>	I"доп,А	L,км	ΔU,%
ГРП-ТП-2	236,1	185	264	0,165	0,2
ТП-2-ТП-1	98,5	50	119	0,204	0,6
ГРП-ТП-4	91,7	35	98	0,101	0,3
ТП-4-ТП-9	26,5	16	64	0,402	0,8
ГРП-ТП-7	108,4	50	119	0,011	0,9
ТП-7-ТП-6	70,6	35	98	0,159	0,5
ТП-6-ТП-5	35,3	16	64	0,148	0,5
ГРП-ТП-14	130,6	70	140	0,659	0,7
ТП-14-ТП-11	83,4	35	98	0,071	0,3
ГРП--РУ-1	108,8	50	119	0,498	0,7

КЛ 0,4 кВ будут питать распределительные пункты маломощных цехов.

Пример выбора кабеля ТП4-РПЗ, ток КЛ, по (24):

$$I_p = \frac{174,4}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 244,2 \text{ А.}$$

Принимаем кабель АВБШв 4х150, I<sub>доп</sub>=260 А (с учетом условий прокладки) [8].

Потери напряжения в КЛ, по (26):

$$\Delta U_{л} = \frac{\sqrt{3} \cdot 244,2 \cdot 0,09 \cdot 100}{380} (0,326 \cdot 0,74) = 1,5 \% \leq 5 \%.$$

Выбранное сечение подходит, выбор кабелей сведен в таблице 11.

Таблица 11 – Выбор кабелей 0,4 кВ

КЛ	$I_p$ , А	Кабель АВБШв, сечение	$I_{доп}$ , А	$\Delta U$ , %
ТП4-РП3	244,2	4x95	260	1,5
ТП4-РП8	97,6	4x16	95	1,8
ТП11-РП10	133,4	4x95	251	0,7
ТП9-РП12	133,6	4x120	279	0,6
ТП9-РП15	98,8	4x70	205	1,4
ТП5-РП13	184,6	4x70	220	1,9

План прокладки кабельных линий показан в Приложении А.

### 3.3 Расчет токов КЗ

Токи КЗ определяются для выбора электрооборудования ГРП по допустимым параметрам.

Схема замещения электрической сети – на рисунке 7.

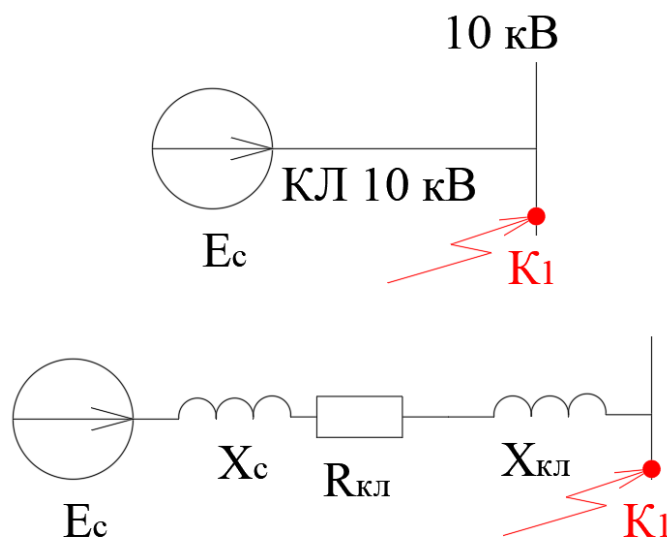


Рисунок 7 – Схема замещения электрической сети

Полное сопротивление цепи КЗ:

$$z = \sqrt{(\Sigma r)^2 + (\Sigma x)^2}, \quad (27)$$

где  $\Sigma r$ ,  $\Sigma x$  – активное и индуктивное сопротивления, Ом.

Сопротивление энергосистемы (ЭС):

$$X_c = U_c / I_\kappa, \quad (28)$$

где  $U_c$  – напряжение ЭС, кВ.

$I_\kappa$  – ток трехфазного КЗ на шинах 10 кВ ПС энергосистемы, кА [10].

$$X_c = \frac{10,5}{3,74} = 2,807 \text{ Ом.}$$

Токи трехфазного и двухфазного КЗ:

$$I_\kappa = \frac{U_c}{\sqrt{3} \cdot z}; \quad (29)$$

$$I_{\text{кз}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_\kappa. \quad (30)$$

Ударные токи КЗ:

$$i_y = \sqrt{2} \cdot \kappa_y \cdot I_\kappa, \quad (31)$$

где  $\kappa_y$  – ударный коэффициент.

$$\kappa_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}, \quad (32)$$

где  $T_a$  – постоянная апериодической слагающей, с.

$$T_a = \sum X / 314 \sum R. \quad (33)$$

Расчет токов КЗ на шинах 10 кВ ГРП (точка К1).

Сопротивления КЛ 10 кВ:

$$R_{КЛ} = r_0 \cdot L; \quad (34)$$

$$X_{КЛ} = x_0 \cdot L. \quad (35)$$

$$R_{КЛ} = 0,07 \cdot 2,3 = 0,161 \text{ Ом};$$

$$X_{КЛ} = 0,056 \cdot 2,3 = 0,129 \text{ Ом}.$$

Эквивалентные сопротивления цепи:

$$\sum r = R_{КЛ}; \quad (36)$$

$$\sum r = 0,161 \text{ Ом};$$

$$\sum x = X_c + X_{КЛ}; \quad (37)$$

$$\sum x = 2,807 + 0,129 = 2,936 \text{ Ом};$$

$$z = \sqrt{0,161^2 + 2,936^2} = 2,941 \text{ Ом}.$$

Токи КЗ, согласно (29-32):

$$I_{\kappa} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 2,941} = 2,06 \text{ кА};$$

$$\kappa_y = 1 + e^{\frac{0,01}{0,02}} = 1,81;$$

$$i_y = \sqrt{2} \cdot 1,81 \cdot 2,06 = 5,28 \text{ кА};$$

$$I_{\kappa 3}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 2,06 = 1,79 \text{ кА}.$$

Результаты расчетов представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Результаты расчетов токов КЗ на ГРП

место КЗ	$I''$ , кА	$I_y$ , кА	$I^{(2)}$ кз, кА
Точка К1	2,06	5,28	1,79

Выбор электрооборудования ГРП.

Выбор коммутационных аппаратов.

Высоковольтные выключатели обеспечивают коммутацию силовых цепей под нагрузкой и гашения электрической дуги при разрыве токопроводящих контактов. Условия выбора выключателей [9]:

$$U_{ном} \geq U_{раб}; \quad (38)$$

$$I_{ном} \geq I_{раб}; \quad (39)$$

$$I_{ном.откл} \geq I_k; \quad (40)$$

$$i_{пр.с} \geq i_y; \quad (41)$$

$$I_{тер.}^2 \cdot t_{тер.} \geq B_k, \quad (42)$$

где  $I_{ном.откл}$  – ток отключения, кА;

$I_k$  – ток трехфазного КЗ, кА;

$i_{пр.с}$  – сквозной ток КЗ, кА;

$i_y$  – ударный ток КЗ, кА;

$I_m$  – ток термической стойкости, кА;

$t_m$  – время действия тока, с;

$B_k$  – тепловой импульс, кА<sup>2</sup>/с.

$$B_k = I_k^2 \cdot t_{откл}, \quad (43)$$

где  $t_{откл}$  – время КЗ, с.

$$t_{откл} = t_{р.з.} + t_{откл.В} , \quad (44)$$

где  $t_{р.з.}$  – время срабатывания защиты, с [1];

$t_{откл.В}$  – время отключения выключателя, с [12].

На стороне 10 кВ, тепловой импульс КЗ, по (43,44):

$$t_{откл} = 0,025 + 0,06 = 0,085 \text{ с};$$

$$B_{\kappa} = 2,06^2 \cdot 0,085 = 0,36 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Выбираются вакуумные выключатели ВВ/TEL-10, проверка по (43-47):

$$U_{ном} = 10 \text{ кВ} \geq U_{раб} = 10 \text{ кВ};$$

$$I_{ном} = 630 \text{ А} \geq I_{раб} = 574 \text{ А};$$

$$I_{ном.откл} = 20 \text{ кА} \geq I_{\kappa} = 2,06 \text{ кА};$$

$$i_{пр.с} = 40 \text{ кА} \geq i_{y} = 5,28 \text{ кА};$$

$$I_{тер.}^2 \cdot t_{тер.} = 1200 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \geq B_{\kappa} = 0,36 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Выключатели проходят проверку.

Условия выбора разъединителей:

$$U_{н.ап.} \geq U_{н.уст.}; \quad (45)$$

$$I_{н.ап.} \geq I_{раб.макс.}; \quad (46)$$

$$I_{тер.}^2 \cdot t_{тер.} \geq B_{\kappa}; \quad (47)$$

$$i_{дин} \geq i_{y}. \quad (48)$$

Выбираются разъединители РВ-10/630, проверка по (43-47):

$$U_{ном} = 10 \text{ кВ} \geq U_{раб} = 10 \text{ кВ};$$

$$I_{ном} = 630 \text{ А} \geq I_{раб} = 574 \text{ А};$$

$$i_{нр.с} = 40 \text{ кА} \geq i_y = 5,28 \text{ кА};$$

$$I_{мер.}^2 \cdot t_{мер.} = 3600 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \geq B_k = 0,36 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Выбор трансформаторов тока и напряжения.

На фидерах ГРП устанавливаем ТПЛК-10/30...300 (в зависимости от токов КЛ), на вводах ГРП: ТПЛК-10/600.

Проверка выбранных ТТ:

- по динамической и термической стойкости:

$$i_{дин} = 52 \text{ кА} \geq i_y = 5,28 \text{ кА};$$

$$I_{мер.}^2 \cdot t_{мер.} = 1200 \text{ кА}^2 / \text{с} \geq B_k = 0,36 \text{ кА}^2 / \text{с};$$

- по погрешности. Сопротивление нагрузки:

$$Z_{2\Sigma} = Z_{приб.} + Z_{пров.} + Z_{конт.}, \quad (49)$$

где  $Z_{приб.}$ ,  $Z_{пров.}$ ,  $Z_{конт.}$  – сопротивления приборов, проводов, контактов, Ом.

$$Z_{пров.} = \frac{l_{пров.} \cdot \rho}{S_{пров.}}, \quad (50)$$

где  $l_{пров.}$  – длина проводов, м;

$\rho$  – удельное сопротивление жил, Ом·мм<sup>2</sup>/м;

$S_{пров.}$  – сечение жил, мм<sup>2</sup>.



$$Z_{\text{приб.}} = \frac{S_{\text{приб.}}}{I_{\text{н.приб.}}^2}, \quad (51)$$

где  $S_{\text{приб.}}$ ,  $I_{\text{н.приб.}}$  – мощность, В·А и номинальный ток прибора, А.

$$Z_{\text{приб.}} = \frac{1}{5^2} = 0,04 \text{ Ом};$$

$$Z_{\text{пров.}} = \frac{7,2 \cdot 0,0175}{4} = 0,0315 \text{ Ом};$$

$$Z_{2\Sigma} = 0,04 + 0,0315 + 0,1 = 0,1715 \text{ Ом}.$$

Погрешности ТТ будут менее 10% [1]. Выбранные ТТ подходят.

Условия выбора ТН [1]:

$$U_{\text{ном}} \geq U_{\text{уст}}; \quad (52)$$

$$S_{\text{ном}} \geq S_{2\Sigma}. \quad (53)$$

Принимаем ТН типа НАМИ-10-95.

$$U_{\text{н.атл.}} = 10 \text{ кВ} \geq U_{\text{н.уст.}} = 10 \text{ кВ}.$$

Нагрузка ТН – в таблице 13.

Таблица 13 – Нагрузка ТН

Приборы	Кол-во	Нагрузка, Вт	cosφ	∑ нагрузка		
				Р, Вт	Q, вар	S, ВА
sm-963e	10	0,15	0,67	1,50	1,66	2,24
Счетчик СЕ 301	9	2	0,38	18,00	43,82	47,37
∑				19,50	45,48	49,61

Суммарная нагрузка меньше допустимой для ТН 200 В·А.

Выбор ТСН.

ТСН будут обеспечить питание собственных нужд (СН) ГРП.

Расчет нагрузки СН – в таблице 14.

Таблица 14 – Расчет нагрузки СН

Потребитель	Установленная мощность			cosφ	tgφ	Нагрузка	
	На ед.	Число приёмников	Σ, кВт			P, кВт	Q, квар
Отопление, освещение, вентиляция РУ-10 кВ	7	1	7	0,97	0,25	7	1,75
Аппаратура связи и телемеханики	8,7	1	8,7	0,85	0,62	8,7	5,39
Маслохозяйство	16,2	1	16,2	1	0	16,2	0
Итого						31,9	7,15

Нагрузка СН для двух ТСН:

$$S_{РАСЧ} = \sqrt{P_{РАСЧ}^2 + Q_{РАСЧ}^2} / 2; \quad (54)$$

$$S_{РАСЧ} = \sqrt{31,9^2 + 7,15^2} / 2 = 16,35 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Выбираем ТСН марки ТМГ-25/10, аварийный коэффициент загрузки:

$$K_3 = \frac{2 \cdot 16,35}{25} = 1,31 < 1,4.$$

Мощности ТСН будет достаточно в аварийном режиме.

Выбор комплектных распределительных устройств.

В ГРП будут установлены КРУ марки К-204ЭП на номинальный ток 630 А, разрез и компоновка показаны на рисунке 8.

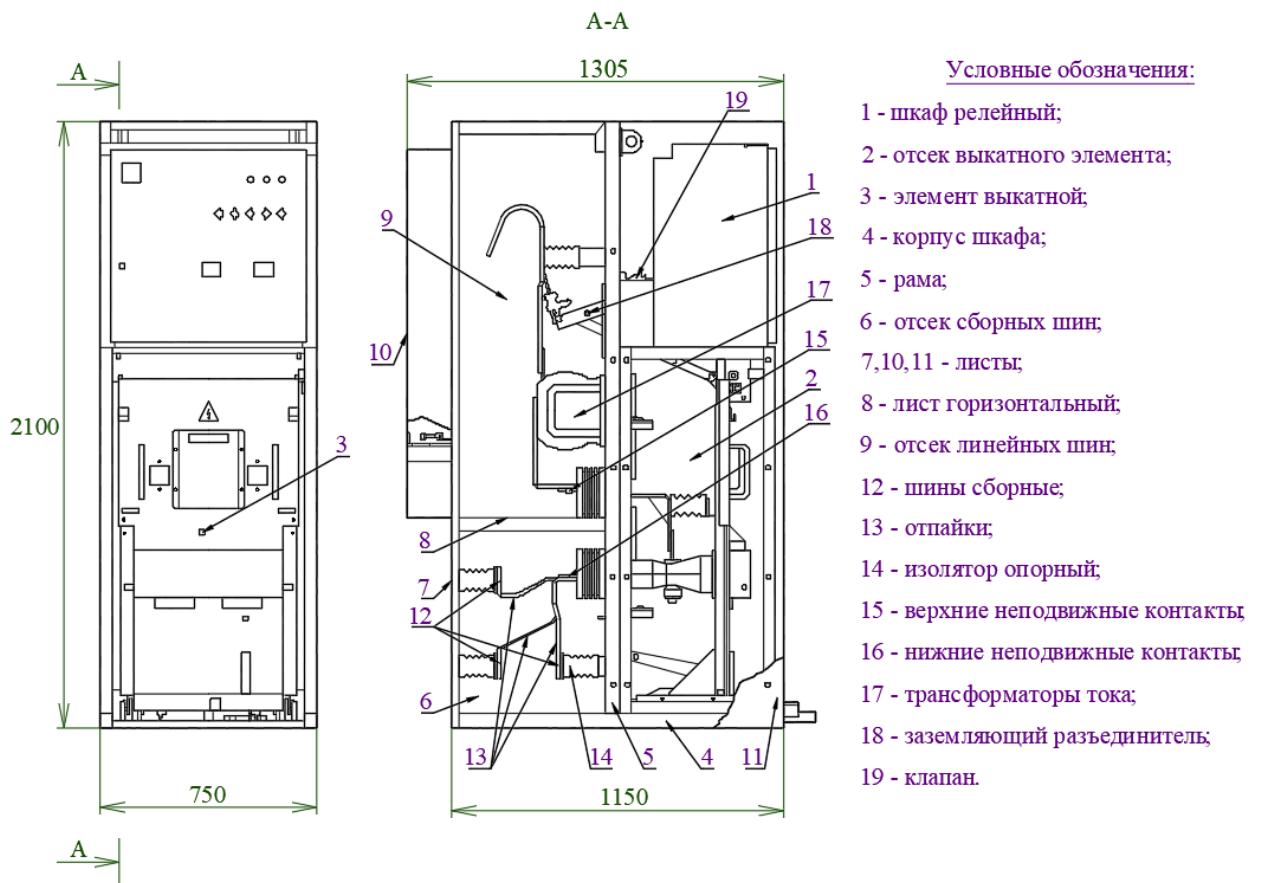


Рисунок 8 – Разрез и компоновка ячейки К-204ЭП

КРУ марки К-204ЭП изготавливаются в соответствии с требованиями ТУ 3414-006- 05758859-99 [13].

### 3.4 Выбор защитного оборудования системы электроснабжения завода

Выбор ОПН.

В ГРП для защиты электрооборудования будут установлены ОПН-10/11,5-10/400. Взрывобезопасный ток ОПН должен быть более, чем на 20% больше тока КЗ:

$$1,2 \cdot I_{кз} \leq I_{ВБ}; \quad (55)$$

$$1,2 \cdot 2,06 = 2,47 \text{ кА} \leq I_{ВБ} = 20 \text{ кА}.$$

Выбранные ОПН подходят.

Релейная защита и автоматика (РЗА).

Защита фидеров 10 кВ обеспечивается терминалами «Сириус-2Л-02», схема защиты показана на листе 3 графической части. Текущие параметры работы оборудования и участков цепей контролируются микропроцессором и, в случае превышения величин уставок релейной защиты, отключаются высоковольтные выключатели.

Автоматический ввод резерва (АВР) на шинах ГРП обеспечивает, согласно ПУЭ, бесперебойное питание участков первой категории надежности электроснабжения.

Схема АВР – на рисунке 9.

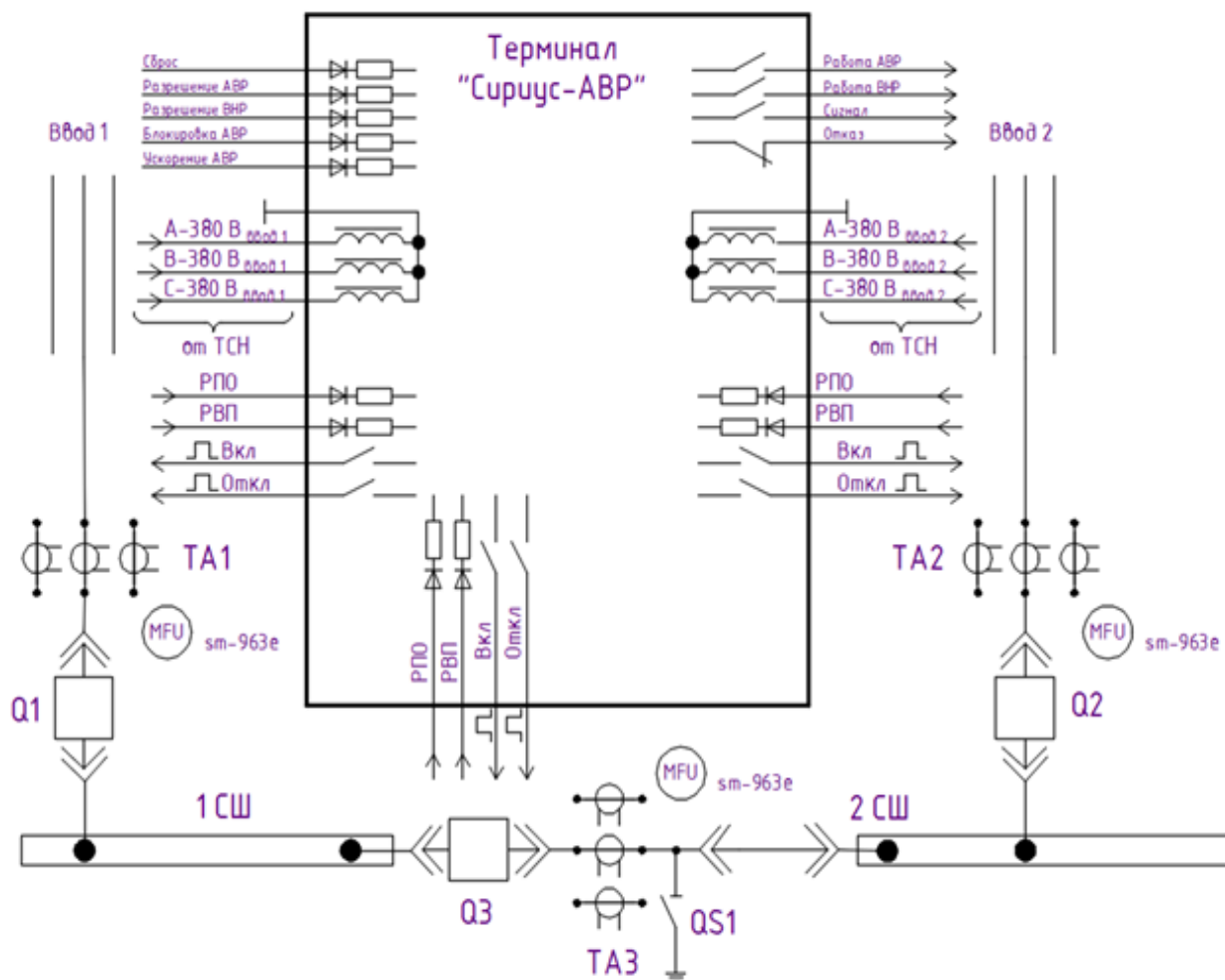


Рисунок 9 – Схема АВР

Уставки АВР:

$$U_{CP1} = (0,25 - 0,4) \cdot U_{НОМ}, \quad (56)$$

$$U_{CP1} = 0,4 \cdot 10,5 = 4,2 \text{ кВ}$$

$$U_{CP2} = (0,65 - 0,7) \cdot U_{НОМ} \quad (57)$$

$$U_{CP2} = 0,7 \cdot 10,5 = 7,35 \text{ кВ}$$

$$t_{ABP1} = t_{CЗ.макс} + \Delta t, \quad (58)$$

где  $t_{CЗ.макс}$  – максимальное время АВР, с;

$\Delta t$  – выдержка для селективности, с [5].

$$t_{ABP1} = 9 + 0,5 = 9,5 \text{ с}$$

$$t_{ABP2} = t_{CB} + t_{зан}, \quad (59)$$

где  $t_{CB}$  – время включения выключателя, с;

$t_{зан}$  – запас времени, с [5].

$$t_{ABP2} = 0,1 + 0,4 = 0,5 \text{ с}$$

Защита линий 0,4 кВ.

Защита линий 0,4 кВ обеспечивается автоматическими выключателями (АВ) серии ВА. Обеспечивается защита от коротких замыканий и от перегрузки по току.

Устройства защитного отключения (УЗО).

Для защиты персонала от поражения электрическим током в помещениях с повышенной электроопасностью устанавливаются УЗО марки ИЕК ВД1-63 на ток утечки 10 мА. Для обеспечения пожаробезопасности во вводных электропитах устанавливаются УЗО марки ИЕК ВД1-63 на ток утечки 30 мА [12].

### 3.5 Выбор и расчет систем заземления и молниезащиты

Заземление и молниезащита цеховых ТП.

Удельное сопротивление грунта для вертикальных (ВЭ) и горизонтально-го (ГЭ) электродов:

$$\rho_p = \rho \cdot K_c; \quad (60)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление грунта, Ом · м;

$K_c$  – коэффициент сезонности.

$$\rho_{ps} = 2000 \cdot 1,1 = 2200 \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

$$\rho_{pe} = 2000 \cdot 1,4 = 2800 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Сопротивление растеканию для одного ВЭ:

$$R_{оэ} = \frac{\rho_{ps}}{2 \cdot \pi \cdot l} \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot l}{d} \right) + 0,5 \cdot \ln \left( \frac{4 \cdot t + l}{4 \cdot t - l} \right) \right], \quad (61)$$

где  $l$  – длина ВЭ, м;

$d$  – приведенный диаметр, м;

$t$  – расстояние от поверхности до центра ВЭ, м.

$$d = 0,95 \cdot b, \quad (62)$$

где  $b$  – ширина уголка, м.

$$d = 0,95 \cdot 0,05 = 0,0475 \text{ м};$$

$$t = 3 / 2 + 0,8 = 2,3 \text{ м};$$

$$R_{оэ} = \frac{2200}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot 3}{0,0475} \right) + 0,5 \cdot \ln \left( \frac{4 \cdot 2,3 + 3}{4 \cdot 2,3 - 3} \right) \right] = 60,96 \text{ Ом}.$$

Расчетное число ВЭ:

$$n' = R_{\text{огэ}} / R_n, \quad (63)$$

где  $R_n$  – предельное сопротивление ЗУ, Ом [8].

$$n' = 60,96 / 4 \approx 16 \text{ шт.}$$

Длина ГЭ:

$$l_2 = 1,05 \cdot a \cdot n', \quad (64)$$

где  $a$  – расстояние между ВЭ, м.

$$a = l_{\text{пер}} / n', \quad (65)$$

где  $l_{\text{пер}}$  – периметр здания ТП, м.

$$l_{\text{пер}} = 2 \cdot (9,97 + 7,62) = 35,2 \text{ м};$$

$$a = 35,2 / 16 = 2,2 \text{ м};$$

$$l_2 = 1,05 \cdot 2,2 \cdot 16 = 36,96 \text{ м.}$$

Сопротивление растеканию ГЭ:

$$R_{\text{эз}} = \frac{\rho_{\text{рз}}}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left( \frac{l^2}{d \cdot t} \right); \quad (66)$$

$$d = 0,5 \cdot b, \quad (67)$$

где  $b$  – ширина полосы, м.

$$d = 0,5 \cdot 0,05 = 0,025 \text{ м};$$

$$t = 0,05 / 2 + 0,8 = 0,825 \text{ м};$$

$$R_{23} = \frac{2800}{2 \cdot 3,14 \cdot 36,96} \cdot \ln \left( \frac{36,96^2}{0,025 \cdot 0,825} \right) = 2,709 \text{ Ом.}$$

Схема заземления ТП – на рисунке 10.

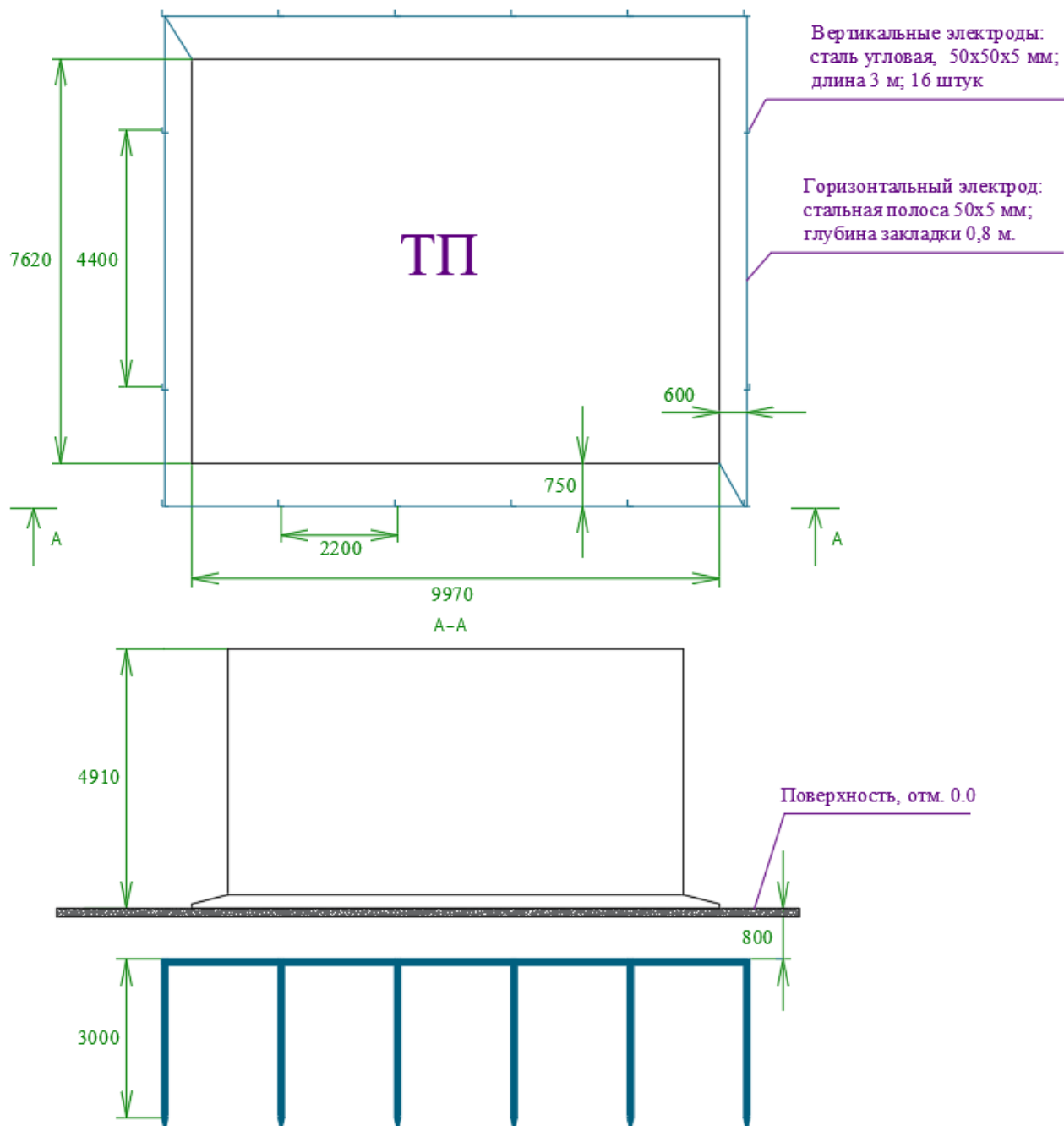


Рисунок 10 – Схема заземления ТП

Схема заложения электродов – на рисунке 11.



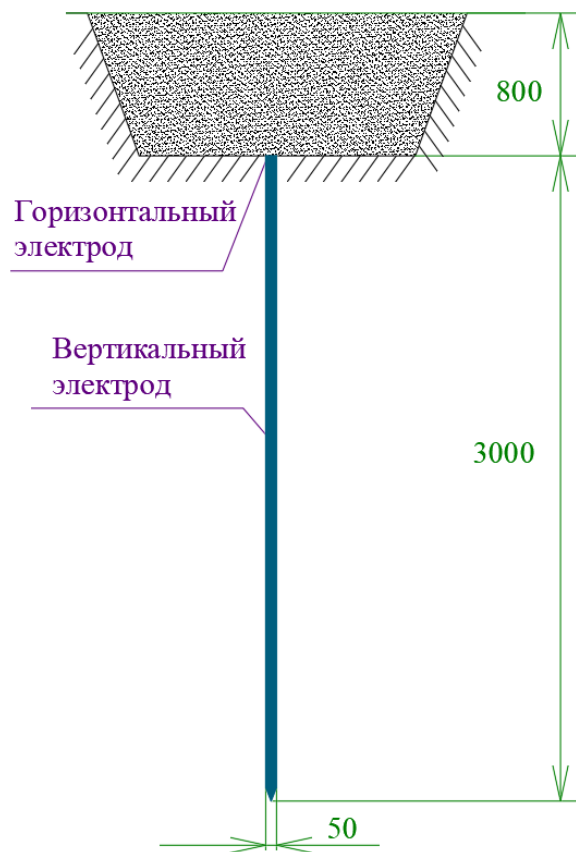


Рисунок 11 – Схема заложения электродов

Сопротивление ЗУ:

$$R_{zp} = \frac{R_{обз} \cdot R_{зэ}}{R_{обз} \cdot \eta_6 \cdot n + R_{зэ} \cdot \eta_z}, \quad (68)$$

где  $\eta_6$ ,  $\eta_z$  – коэффициенты использования ВЭ и ГЭ [9].

$$R_{zp} = \frac{60,96 \cdot 2,709}{60,96 \cdot 0,51 \cdot 16 + 2,709 \cdot 0,32} = 3,605 \text{ Ом} \leq 4 \text{ Ом}.$$

Выбраны комплектные ТП в цельнометаллическом корпусе, соединенном с ЗУ. Согласно ПУЭ, дополнительные меры по молниезащите не требуются [8].

Заземление и молниезащита ГРП.

При расчете учитываются требования ПУЭ по предельно допустимому сопротивлению ЗУ:

$$R_3 \leq \frac{250}{I_3} \leq 10 \text{ Ом}, \quad (69)$$

где  $I_3$  – расчётный ток замыкания на землю, А.

$$I_3 = \frac{U \cdot L}{10}, \quad (70)$$

где  $U$  – линейное напряжение, кВ;

$L$  – суммарная длина присоединенных линий 10 кВ, км.

$$I_3 = \frac{10 \cdot 2,764}{10} = 2,764 \text{ А}$$

$$R_3 \leq \frac{250}{2,764} = 90,45 \text{ Ом}$$

Т.к. ЗУ будет использоваться и для оборудования 0,4 кВ, принимаем максимально допустимое сопротивление 4 Ом [8]. По формулам (60-68):

$$d = 0,95 \cdot 0,05 = 0,0475 \text{ м}$$

$$t = 3,5 / 2 + 0,8 = 2,55 \text{ м}$$

$$R_{\text{овз}} = \frac{2200}{2 \cdot 3,14 \cdot 3,5} \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot 3,5}{0,0475} \right) + 0,5 \cdot \ln \left( \frac{4 \cdot 2,55 + 3,5}{4 \cdot 2,55 - 3,5} \right) \right] = 47,711 \text{ Ом}$$

$$n' = 47,711 / 4 \approx 12 \text{ шт}$$

$$l_{\text{неп}} = 2 \cdot (12,6 + 5,6) = 36,4 \text{ м}$$

$$a = 36,4 / 12 = 3,03 \text{ м}$$

$$l_2 = 1,05 \cdot 3,03 \cdot 12 = 38,18 \text{ м}$$

$$R_{\text{эз}} = \frac{2800}{2 \cdot 3,14 \cdot 38,18} \cdot \ln \left( \frac{38,18^2}{0,025 \cdot 0,825} \right) = 2,709 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{зп}} = \frac{47,711 \cdot 2,709}{47,711 \cdot 0,51 \cdot 12 + 2,709 \cdot 0,32} = 3,721 \text{ Ом} \leq 4 \text{ Ом}$$

Контур заземления состоит из 12 ВЭ длиной 3,5 м из угловой стали 50x50 мм, расстояние между ВЭ 3,03 м; верхний конец ниже уровня земли; на глубине 0,8 м ВЭ соединены полосой 50x5 мм. Данное ЗУ будет иметь эквивалентное сопротивление достаточное для надежной защиты людей и оборудования.

Размеры здания ГРП: 12,6·5,6·3,9 м. Молниезащита будет обеспечиваться одиночным строжневым молниеотводом (МО), установленным на крыше, по центру. Зоной защиты МО высотой  $h$  является конус высотой  $h_0 < h$ , вершина которого совпадает с вертикальной осью МО. Радиус сечения зоны защиты:

$$r_x = \frac{r_0 \cdot (h_0 - h_x)}{h_0}, \quad (71)$$

где  $r_0$  – радиус конуса защиты на уровне земли, м;

$h_0$  – высота конуса защиты, м;

$h_x$  – расчетная высота зоны защиты, м.

Высота  $h_x = 0$  (т.к. МО установлен на крыше),  $r_x = r_0$ .

$$h_0 = 0,85 \cdot h, \quad (72)$$

где  $h$  – высота МО, м.

$$r_0 = 1,2 \cdot h, \quad (73)$$

Высоту МО подбираем эмпирически, по условию:

$$\sqrt{(A/2)^2 + (B/2)^2} < r_0, \quad (74)$$

где  $A, B$  – длина и ширина защищаемой площади, м.

Для МО высотой 6 м, по (72-74):

$$r_0 = 1,2 \cdot 6 = 7,2 \text{ м};$$

$$h_0 = 0,85 \cdot 6 = 5,1 \text{ м};$$

$$\sqrt{(12,6 / 2)^2 + (5,6 / 2)^2} < 7,2;$$

$$6,89 < 7,2.$$

Защита обеспечивается. Схема заземления и молниезащиты ГРП показана на рисунке 12.

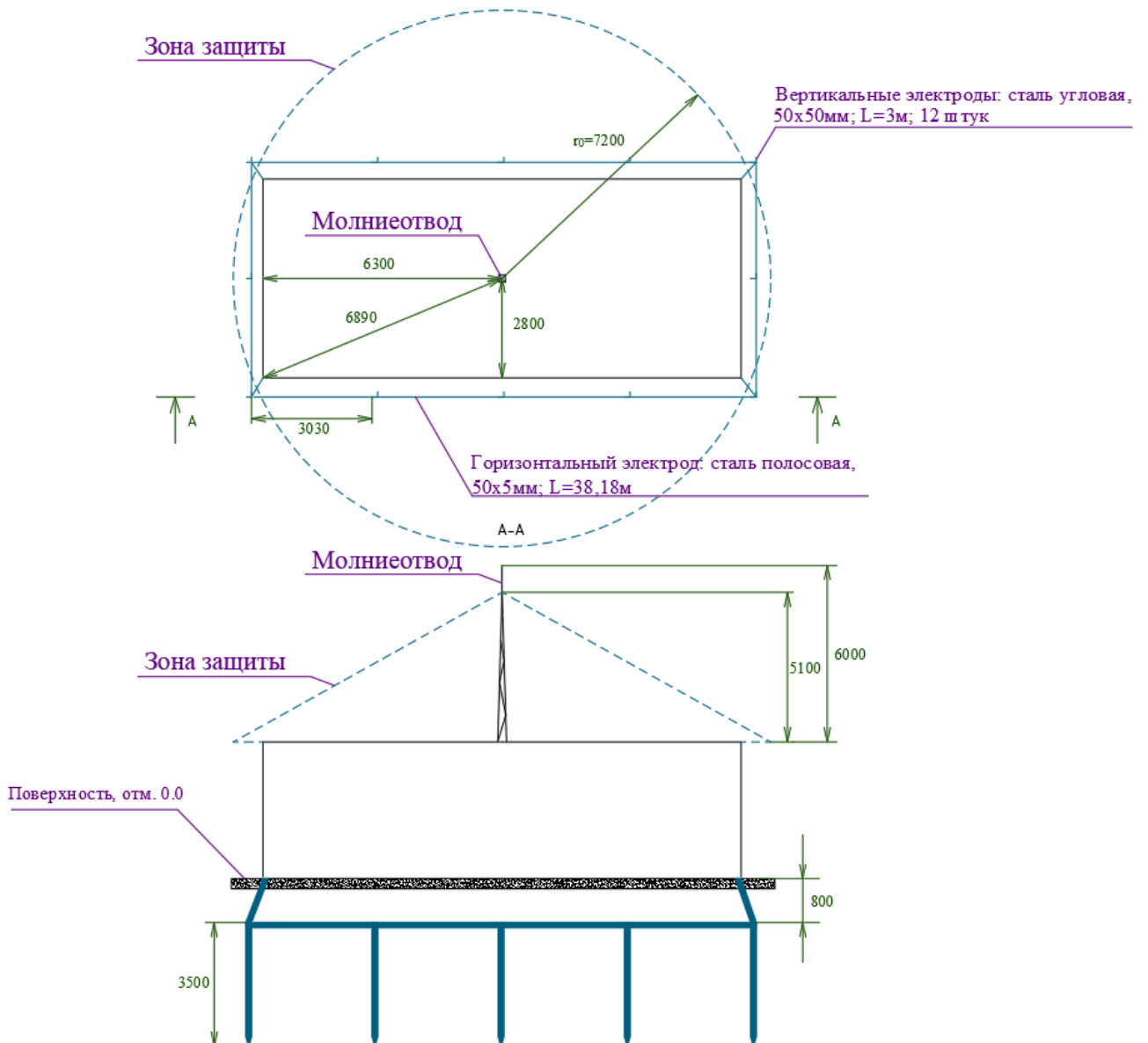


Рисунок 12 – Схема заземления и молниезащиты ГРП

### 3.6 Выбор системы учета электрической энергии завода по выпуску древесностружечных плит

На предприятии необходимо обеспечить максимальную энергоэффективность технологических процессов и мониторинг нормативного электропотребления производственного оборудования для предотвращения ненормативных и аварийных режимов работы. На рассматриваемом объекте предлагается реализовать АСТУЭ на основе оборудования и ПО от АО «Энергомера», отличительные особенности:

- передовая схемотехника и технологический процесс производства;
- способ передачи данных по силовым проводам (PLC) упрощает и удешевляет реализацию АСТУЭ и ее обслуживание;
- удобное, адаптивное ПО;
- надежный отечественный поставщик и изготовитель [11].

В составе АСТУЭ «Энергомера» промышленных предприятий используется следующее оборудование: счетчики СЕ 303, УСПД СЕ 805М, Учет электроэнергии и подключение потребителей ТП к системе АСТУЭ осуществляется счетчиками Энергомера СЕ 303, установленными на фидерах 10 кВ РУ, 10 и 0,4 кВ ТП и подключенными к УСПД через концентраторы RS-485 по протоколу Modbus. Внешний вид счетчика СЕ303 приведен на рисунке 13.



Рисунок 13 – Счетчик СЕ303

Управление, настройка и удаленное администрирование счетчиками (точками учета) выполняется через предлагаемое производителем ПО, которое имеет простой, эргономичный и дружелюбный к пользователю интерфейс. Режимы работы электрических сетей и электропотребления электроприемников непрерывно отслеживаются, информация передается в цифровом формате на центральный сервер [11].

### 3.7 Расчет стоимости схемы электроснабжения завода

Определяется стоимость электрооборудования (ЭО) по всем типам:

$$C = C_{ед} \cdot n, \quad (75)$$

где  $C_{ед}$  – стоимость единицы, тыс.руб.;

$n$  – число единиц, шт (м).

Для ТСН цена 75,1 тыс. руб./шт [14]. Суммарная стоимость:

$$C = 75,1 \cdot 2 = 150,2 \text{ тыс. руб.}$$

Суммарная стоимость ЭО:

$$\sum C = C_1 + C_2 + \dots C_i, \quad (76)$$

$$\sum C = 150,2 + 42,7 + \dots 8918,9 = 28403,6 \text{ тыс. руб.}$$

Транспортные расходы (5% от стоимости ЭО [9]):

$$C_{тр} = 0,05 \cdot \sum C, \quad (77)$$

$$C_{тр} = 0,05 \cdot 28403,6 = 1420,2 \text{ тыс. руб.}$$

Другие дополнительные затраты определяются аналогично. Расчет сметной стоимости проекта сведен в таблицу 15.

Таблица 15 – Расчет сметной стоимости проекта

Оборудование	кол-во, шт (км)	Цена ед., тыс. руб.	∑ стоимость, тыс. руб.
ТМГ-25/10	2	75,1	150,2
ОПН-10/11,5-10/400	48	0,89	42,7
УК 56-10,5-125	2	154,5	309,0
ТПЛК-10-600/5-0,5	18	68,95	1241,1
ТПЛК-10-50...300/5-0,5	83	12,11	1005,1
НАМИ-10-95	4	42,33	169,3
ВВ/TEL-10-20/630	27	198,2	5351,4
К-204ЭП	19	125,6	2386,4
2КТПН-ПК 2500-10/0,4	1	925,5	925,5
2КТПН-ПК 1600-10/0,4	1	723,6	723,6
2КТПН-ПК 1250-10/0,4	1	678,6	678,6
2КТПН-ПК 1000-10/0,4	1	564,3	564,3
2КТПН-ПК 630-10/0,4	4	446,9	1787,6
2КТПН-ПК 400-10/0,4	1	371,3	371,3
ПКТ-103	48	1,07	51,4
Сириус-2Л-02	14	87,5	1225,0
Сириус-АВР	1	37,5	37,5
АПВП-3x240/10	0,256	1487,3	380,7
АПВП-3x95/10	1,322	695,1	918,9
АПВП-3x70/10	0,989	578,9	572,5
АПВП-3x50/10	0,11	406,2	44,7
АПВП-3x35/10	1,328	246,8	327,8
АПВП-3x16/10	1,124	195,7	220,0
АПВП-1x400/10	13,8	646,3	8918,9
Стоимость оборудования (СО)			28403,6
Транспортные расходы (5% от СО)			1420,2
Стоимость тары и упаковки (6% от СО)			1704,2
Складские расходы (0,5% от СО)			142,0
Стоимость монтажных работ (20 % от СО)			5680,7
Сметная прибыль 20%			5680,7
Итого			43031,4

К сметной стоимости проекта необходимо прибавить укрупненные показатели стоимости сооружения ГРП 10 кВ, которые составляют 5600 тыс. руб. [10]. Итоговая стоимость схемы электроснабжения завода составит:

$$C = 43031,4 + 5600 = 48631,4 \text{ тыс.руб.}$$

Выводы.

Определены расчетные нагрузки предприятия, согласно которым выбрано оборудование СЭС завода. Согласно рассчитанным параметрам рабочих и аварийных режимов выбрано основное электрооборудование ГРП. Выбрано современное ЭО отечественных производителей. Выбрано защитное оборудование СЭС завода. Проведены выбор и расчет систем заземления и молниезащиты. Выполнен расчет стоимости схемы электроснабжения завода.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан проект электроснабжения завода по выпуску древесностружечных плит. Решены задачи:

- рассмотрены особенности и методы проектирования СЭС завода;
- определены ожидаемые электрические нагрузки по отдельным цехам и заводу в целом. Итоговые нагрузки предприятия составили 9797,3 кВт; 7154,33 квар; 12131,43 кВА;
- обеспечена достаточная энергоэффективность электроснабжения. На цеховых ТП будут установлены энергосберегающие силовые трансформаторы серий ТМГ12 и ТМГ35, компенсирующие установки АУКРМ; на шинах низкого напряжения главного распределительного пункта КРМ будет обеспечиваться конденсаторными установками УК56-125;
- выбрано оптимальное местоположение главного распределительного пункта, для чего составлена картограмма нагрузок. С учетом расположения зданий и места подхода питающей ЛЭП, ГРП максимально приближен к центру электрических нагрузок и размещается за цехом №7, к северо-востоку от него. Питание ГРП от ПС энергосистемы будет выполнено по двухцепной КЛ 10 кВ с кабелями АПвП с сечением жил 400 мм<sup>2</sup>, линия проверена по потерям напряжения и допустимому длительно току;
- выбраны марки и сечения жил силовых кабелей распределительной сети (линий 10 кВ от ГРП до цеховых ТП и линий 0,4 кВ от ТП до вводных распределительных пунктов цехов). Линии 10 кВ и 0,4 кВ будут выполнены кабелями АПвП и АВБШв. КЛ проверены по потерям напряжения, прокладка кабелей будет проводится в траншеях;

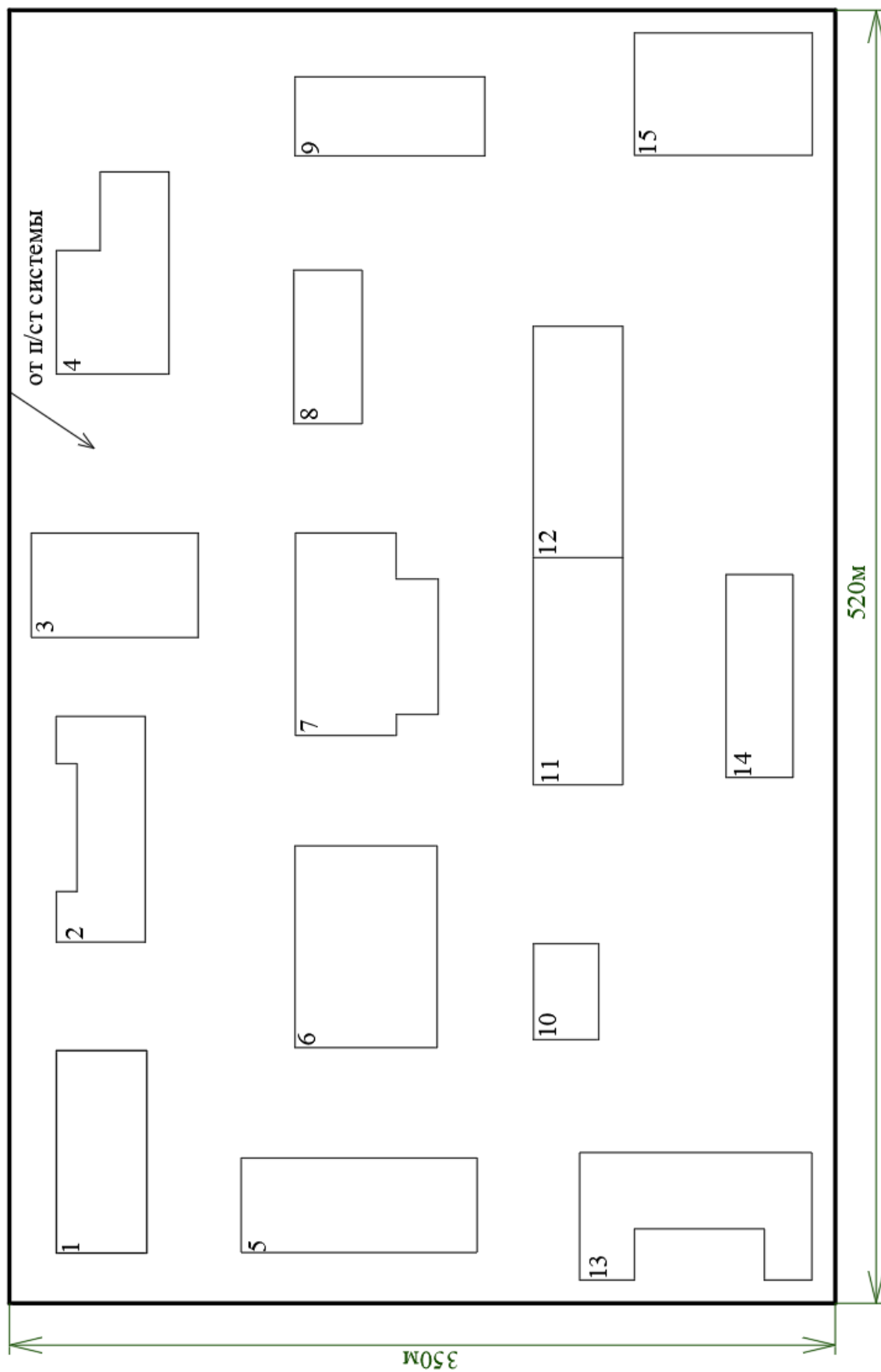
- составлен план прокладки кабельных линий. Распределительная сеть будет выполнена по смешанной схеме как наиболее выгодной и обеспечивающей минимальную суммарную длину КЛ;
- для выбора электрооборудования ГРП определены токи КЗ;
- выбрано электрооборудование ГРП следующих марок: выключатели ВВ/TEL-10/630, разъединители РВ-10/630, измерительные трансформаторы ТПЛК-10/30...600, НАМИ-10-95, ограничители перенапряжений ОПН-10/11,5-10/400; КРУ марки К-204ЭП на номинальный ток 630 А;
- защита фидеров 10 кВ обеспечивается терминалами «Сириус-2Л-02», на шинах 10 кВ выполняется АВР на терминале «Сириус-АВР»;
- спроектированы системы заземления и молниезащиты цеховых ТП и ГРП;
- предлагается реализовать АСТУЭ на основе оборудования и ПО от АО «Энергомера». Это обеспечит максимальную энергоэффективность технологических процессов и мониторинг нормативного электропотребления производственного оборудования для предотвращения ненормативных и аварийных режимов работы;
- Выполнен расчет стоимости схемы электроснабжения завода, которая составила 48631,4 тыс. руб.

Предлагаемый проект электроснабжения завода отвечает всем современным требованиям и может быть рекомендован к исполнению.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ананичева С. С. Электроэнергетические системы и сети. – Екатеринбург: УрФУ, 2019. – 296 с.
2. Арутюнян, А. А. Основы энергосбережения. – М.: Энергосервис, 2020. – 600 с.
3. Волчуков Н.П., Титов Н.Н. Построение информационной системы контроля и учета энергоресурсов промышленного предприятия. – Киев: Энерго, 2020. – 207 с.
4. ГОСТ 31532-2012. Энергетическая эффективность. Состав показателей. – М.: Энергия, 2022. – 57 с.
5. Кобец Б. Б., Волкова И. О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. – М.: Энергия, 2020. – 208 с.
6. Комков В. А. Энергосбережение на промышленных предприятиях. – М.: ИНФРА-М, 2019. – 320 с.
7. Лисиенко В.Г. Хрестоматия Энергосбережения. – М.: Лань, 2020. – 699 с.
8. ПУЭ, издание 7. – М.: Энергия, 2022. – 648 с.
9. Полуянович Н. К. Монтаж, наладка, эксплуатация и ремонт систем электропитания промышленных предприятий. – М.: Лань, 2019. – 400 с.
10. Проектная документация. Завод по выпуску древесностружечных плит. – Иркутск, 2023. – 605 с.
11. АО «Энергомера». Сайт. [Электронный ресурс]. – <http://www.energomera.com/>.
12. Школа электрика. Сайт. [Электронный ресурс]. – <http://electricalschool.info/>.
13. Электронный фонд документов. [Электронный ресурс]. – <https://docs.cntd.ru/>.
14. ЭТМ компания. Каталог. [Электронный ресурс]. – <https://www.etm.ru/>.

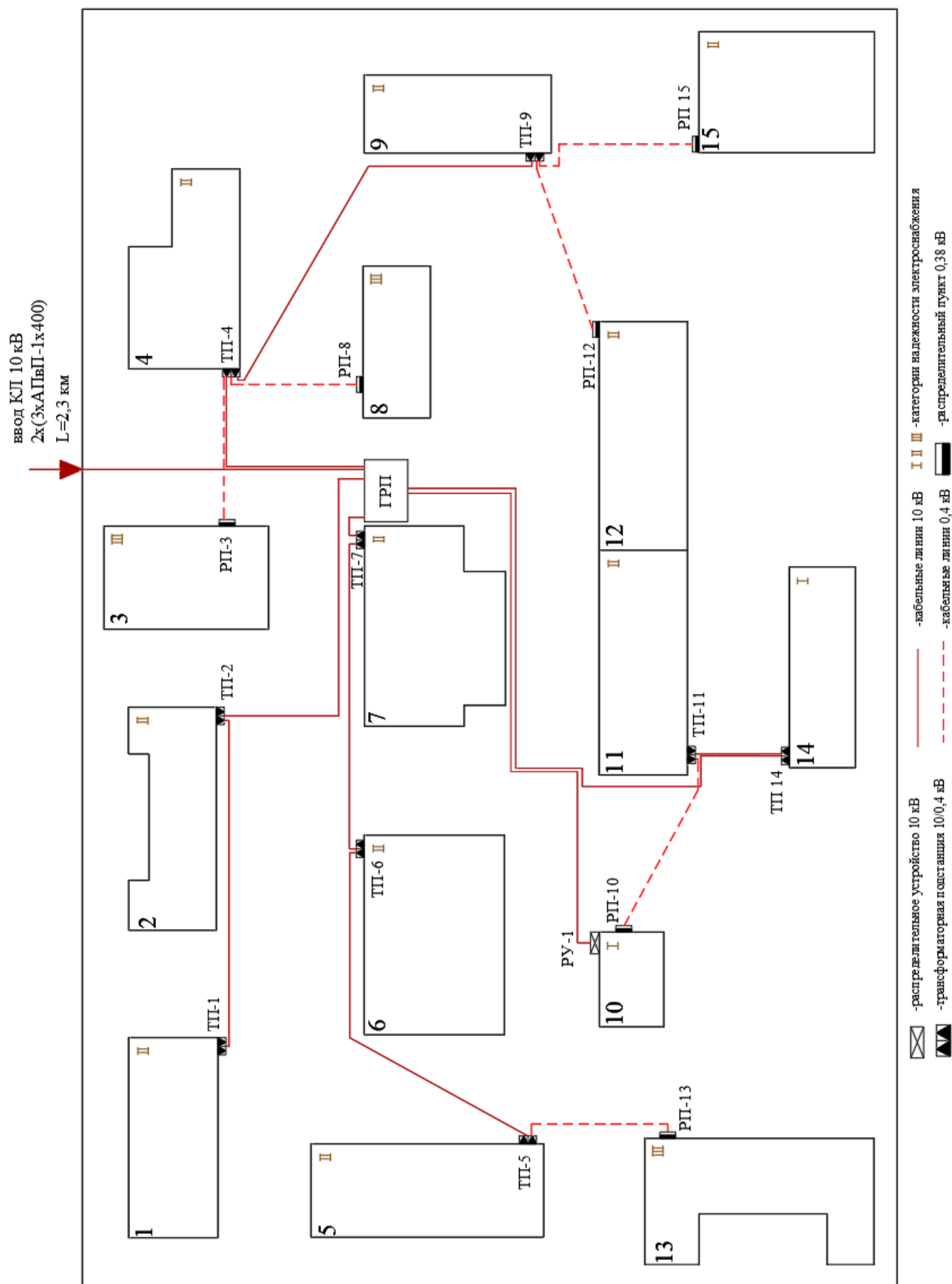
# ПРИЛОЖЕНИЕ А. Генеральный план завода



350м

520м

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б. План прокладки кабельных линий



Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
Образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВО  
«Сибирский федеральный университет»  
институт

«Электроэнергетика, машиностроение и автомобильный транспорт»  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой

А.С. Торопов  
подпись инициалы, фамилия  
« 04 » 07 2023 г.

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

код – наименование направления

Электроснабжение завода по выпуску древесностружечных плит г. Иркутск

тема

Руководитель

Иван  
подпись, дата

доцент, к.т.н.  
должность, ученая степень

Г.Н. Чистяков  
инициалы, фамилия

Выпускник

03.02.23  
подпись, дата

А.А. Дмитриев  
инициалы, фамилия

Нормоконтролер

04.07.2023  
подпись, дата

И.А. Кычакова  
инициалы, фамилия

Абакан 2023