

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

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Электроснабжение

(направленность (профиль) / специализация)

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Проектирование системы электроснабжения микрорайона «Западный» города  
Тольятти

Студент

Р.Р. Зябиров

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

д.т.н., доцент, А.А. Кувшинов

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

Тольятти 2021

## Аннотация

Ключевые слова: район, электроснабжение, проектирование, здание, электрическая нагрузка, оборудование, кабель, линия, подстанция, ток, напряжение, мощность.

Объект исследования: микрорайон Западный, г. Тольятти.

Предмет исследования: разработка системы электроснабжения (СЭС) микрорайона.

Цель работы: проектирование СЭС рассматриваемого района в соответствии с актуальными требованиями нормативных документов.

Содержание ВКР включает в себя следующие вопросы: систематизацию характеристик рассматриваемого района и зданий, исходных данных на проектирование; расчет электрических нагрузок зданий; Выбор ТП и силовых трансформаторов; расчет питающих сетей, выбор электрооборудования; расчет токов короткого замыкания; выбор аппаратов защиты линий распределительной сети; расчет заземления подстанций; выбор современного оборудования релейной защиты и автоматики, расчет уставок защит.

Бакалаврская работа включает пояснительную записку объемом 46 страниц, содержащую 9 рисунков, 12 таблиц и графическую часть на шести листах формата А1.

## Содержание

Введение.....	4
1 Характеристика рассматриваемого района и зданий, исходные данные на проектирование .....	5
1.1 Характеристика рассматриваемого района и зданий .....	5
1.2 Исходные данные на проектирование .....	5
2 Проектирование системы электроснабжения микрорайона.....	9
2.1 Расчет электрических нагрузок зданий .....	9
2.2 Выбор ТП и силовых трансформаторов .....	15
2.3 Выбор кабелей сети 10 кВ.....	19
2.4 Выбор кабелей сети 0,4 кВ.....	22
2.5 Расчет токов КЗ .....	24
2.6 Выбор аппаратов защиты линий распределительной сети.....	29
2.7 Расчет заземления подстанций .....	32
3 Выбор устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) .....	36
3.1 Релейная защита питающей линии 10 кВ.....	36
3.2 Выбор терминала для обеспечения автоматического ввода резерва (АВР) 0,4 кВ, расчет уставок АВР.....	39
Заключение .....	43
Список используемых источников.....	44
Приложение А. Расположение подстанций 10/0,4 кВ, зоны охвата нагрузок.....	437
Приложение Б. План прокладки кабельных линий .....	448
Приложение В. Схема релейной защиты питающей линии 10 кВ .....	439

## Введение

Актуальность проектирования систем электроснабжения (СЭС) жилых комплексов (ЖК), районов и микрорайонов (МКР) состоит в том, что данные объекты повсеместно и постоянно вводятся в эксплуатацию, которая невозможна без обеспечения их качественного и надежного электроснабжения. Проектирование СЭС данных объектов выполняется группой компетентных специалистов (инженеров-проектировщиков) на основе актуальных нормативных документов и требований застройщика. В состав электрических нагрузок микрорайонов входят жилые и общественные здания, особенности и требования к электроснабжению которых должны быть учтены при проектировании СЭС.

Объект исследования: СЭС микрорайона Западный, г. Тольятти.

Предмет исследования: разработка системы электроснабжения (СЭС) микрорайона.

Цель работы: проектирование СЭС рассматриваемого района в соответствии с актуальными требованиями нормативных документов.

Задачи работы:

- систематизировать характеристики рассматриваемого района и зданий;
- провести расчет электрических нагрузок зданий;
- выбрать ТП и силовые трансформаторы;
- рассчитать питающую и распределительную сеть, выбрать кабели и электрооборудование;
- рассчитать токи КЗ;
- провести выбор устройств релейной защиты и автоматики (РЗА), рассчитать уставки защит.

Методы исследования: изучение нормативно-технических документов, литературы и информационных источников; анализ и синтез; аналитико-расчётный.

## **1 Характеристика рассматриваемого района и зданий, исходные данные на проектирование**

### **1.1 Характеристика рассматриваемого района и зданий**

Рассмотрим подробнее инфраструктуру района и здания.

В состав инфраструктуры района входят: жилые дома (ЖД), жилкомсервис, административные здания, детские сады, детские ясли, школы, общежитие.

Согласно документации от застройщика, предполагается газификация ЖД, следовательно, расчет электрических нагрузок ЖД следует производить с учетом газовых кухонных плит [12]. Постройка зданий предполагается из силикатного и красного глиняного кирпича.

ЖД представляют собой современные многоэтажные новостройки повышенной комфортности. Характеристики ЖД – от 9 до 15 этажей, 2...8 подъездов, число квартир от 80 до 250. В каждом подъезде предусмотрены лифты повышенной вместимости. Административные здания включают помещения госслужб, офисы торгово-коммерческих и иных организаций – 1...3 этажа, площадь от 230,4 до 11256,9 м<sup>2</sup>.

Социальные здания (детские сады и ясли, школы, общежитие) – 2...4 этажа, вместимость от 500 до 1400 мест.

Далее для проведения расчетов электрических нагрузок микрорайона и разработки системы его СЭС, систематизируем исходные данные на проектирование. Необходимо составить перечень зданий с их основными характеристиками и генеральный план МКР.

### **1.2 Исходные данные на проектирование**

На основании документации от застройщика составлен генеральный план МКР, который показан на рисунке 1.

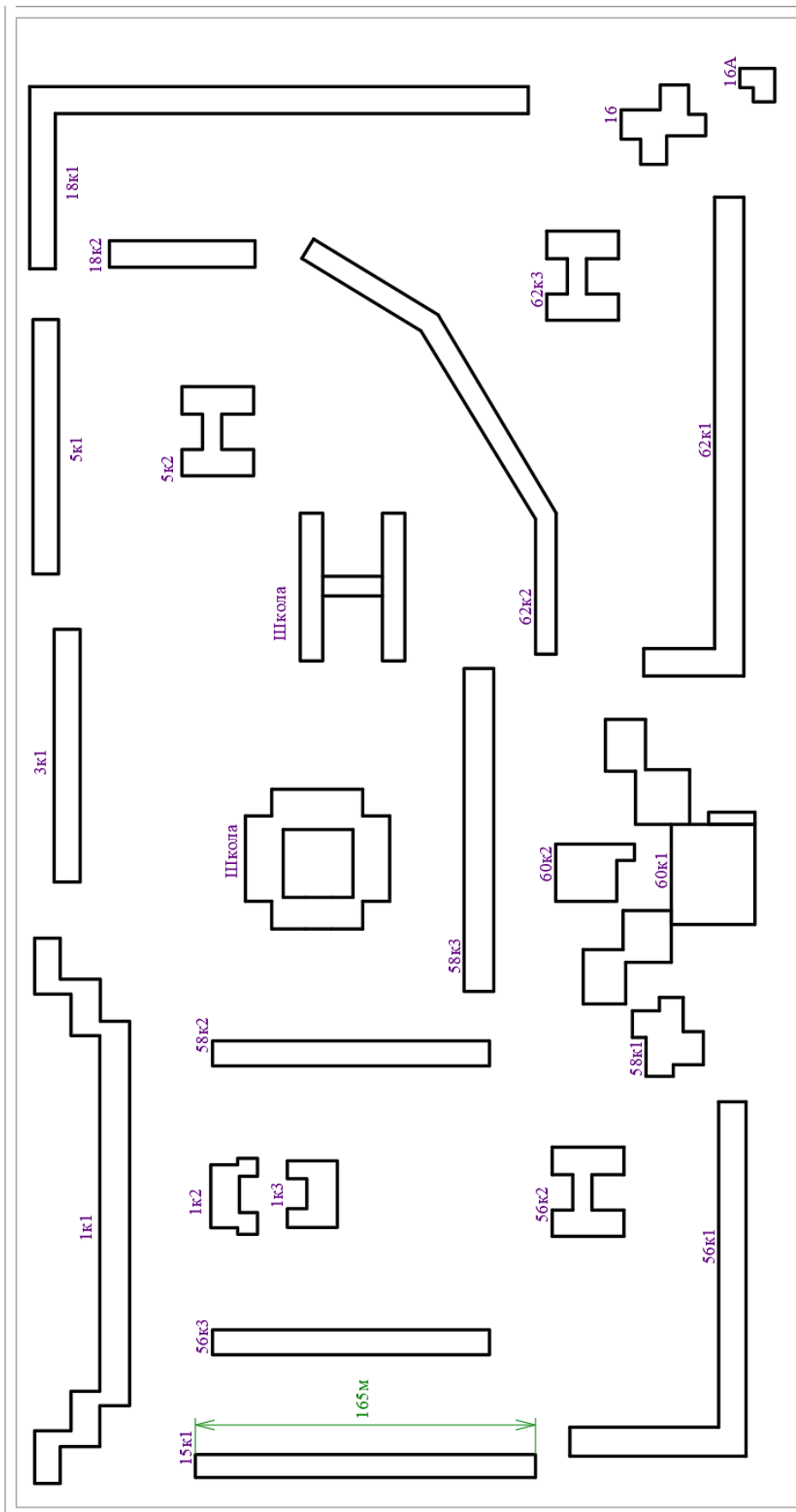


Рисунок 1 – Генеральный план микрорайона

На генеральном плане МКР, в масштабе, отмечается расположение всех зданий и их габариты. Далее с учетом документации от застройщика отмечается расположение трансформаторных подстанций (ТП), которые располагаются с учетом гармоничного вписывания в общую инфраструктуру МКР, отсутствия помех проезду автомобилей и спецтехники. Электроприемники ТП (здания) распределяются по ТП с учетом минимизации общей суммарной длины распределительной сети, на генплане намечаются трассы прокладки линий питающей и распределительной сетей.

Систематизируем здания и их основные параметры (согласно документации от застройщика) в сводной таблице 1.

Таблица 1 – Здания микрорайона и их основные параметры

Позиция на генплане	Наименование зданий	Кол-во квартир/ площадь/ число мест	Этажность	Категория
1к1	Жилой дом	250	14	II
1к2	Жилкомсервис	597,5	1	II
1к3	Административное здание	1290,6	2	III
3к1	Жилой дом	120	9	II
5к1	Жилой дом	120	9	II
5к2	Детский сад	500 мест	2	I
15к1	Жилой дом	120	9	II
16	Общежитие	800 мест	16	II
16А	Административное здание	230,4	1	III
18к1	Жилой дом	240	9	II
18к2	Жилой дом	80	9	II
56к1	Жилой дом	150	9	II
56к2	Детский сад	500 мест	2	I
56к3	Жилой дом	120	9	II
58к1	Жилой дом	90	15	II

Продолжение таблицы 1

Позиция на генплане	Наименование зданий	Кол-во квартир/ площадь/ число мест	Этажность	Категория
58к2	Жилой дом	120	9	II
58к3	Жилой дом	140	9	II
60к1	Административное здание	11256,9	3	III
60к2	Административное здание	1787,2	2	III
62к1	Жилой дом	200	9	II
62к2	Жилой дом	180	9	II
62к3	Детские ясли	600 мест	2	I
Школа №115	Школа	1200 мест	3	I
Школа №135	Школа	1400 мест	4	I

Категории надежности электроснабжения зданий определяются согласно ПУЭ [9], РД 34.20.185-94 [11] и требованиями технической документации на проектирование [12]:

- первая категория: детские сады и ясли, школы (для этих объектов первая категория обусловлена требованиями к электроснабжению систем противопожарной защиты и пожаротушения);

- вторая категория: жилые дома, жилкомсервис;

- третья категория: остальные объекты.

Вывод по разделу.

Приведена характеристика рассматриваемого района, его инфраструктуры и зданий как потребителей электроэнергии. На основании документации от застройщика составлен генеральный план МКР, систематизированы все необходимые исходные данные для проектирования СЭС микрорайона.



## 2 Проектирование системы электроснабжения микрорайона

### 2.1 Расчет электрических нагрузок зданий

«Расчет силовых нагрузок зданий необходим для дальнейшего выбора числа и мощности трансформаторных подстанций, кабелей схемы электроснабжения, расчета токов короткого замыкания и уставок релейной защиты, выбора электрических аппаратов на подстанциях, питающих район, т.е. для всей дальнейшей работы над проектом. Расчет ведется методом коэффициента спроса. Этот метод применяется для расчета электроснабжения крупных предприятий, жилых массивов с большим количеством электроприемников, когда влиянием отдельного электроприемника на общую нагрузку можно пренебречь» [7].

Электрические нагрузки ЖД рассчитываются по удельной мощности на одну квартиру. Нагрузки остальных зданий определяются по удельной мощности на единицу площади или вместимости. Удельные мощности принимаются согласно [11].

Расчетные характеристики зданий сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Расчетные характеристики зданий

№ здания	Здание	Число кв./ S/ мест	Этажей, шт	Руд, кВт/кв (м <sup>2</sup> , место)	cosφ	Число подъездов (входов), шт
1к1	Жилой дом	250	14	0,75	0,75	6
1к2	Жилкомсервис	597,5	1	0,14	0,14	1
1к3	Административное здание	1290,6	2	0,12	0,12	1
3к1	Жилой дом	120	9	0,83	0,83	3
5к1	Жилой дом	120	9	0,83	0,83	3

Продолжение таблицы 2

№ здания	Здание	Число кв./ S/ мест	Этажей, шт	Руд, кВт/кв (м <sup>2</sup> , место)	cosφ	Число подъездов (входов), шт
5к2	Детский сад	500 мест	2	0,31	0,31	1
15к1	Жилой дом	120	9	0,83	0,83	5
16	Общежитие	800 мест	16	0,35	0,35	2
16А	Административное здание	230,4	1	0,12	0,12	1
18к1	Жилой дом	240	9	0,76	0,76	8
18к2	Жилой дом	80	9	0,98	0,98	2
56к1	Жилой дом	150	9	0,8	0,8	6
56к2	Детский сад	500 мест	2	0,31	0,31	1
56к3	Жилой дом	120	9	0,83	0,83	4
58к1	Жилой дом	90	15	0,97	0,97	2
58к2	Жилой дом	120	9	0,83	0,83	4
58к3	Жилой дом	140	9	0,81	0,81	5
60к1	Административное здание	5628,45	3	0,08	0,08	1
60к2	Административное здание	1787,2	2	0,12	0,12	1
62к1	Жилой дом	200	9	0,77	0,77	7
62к2	Жилой дом	180	9	0,78	0,78	8
62к3	Детские ясли	600 мест	2	0,28	0,28	1
Школа	Школа	1200 мест	3	0,18	0,18	1
Школа	Школа	1400 мест	4	0,18	0,18	1

«Активная нагрузка квартир для жилого дома определяется по формуле [2]:

$$P = P_{уд.кв} \cdot n, \quad (1)$$

где  $P_{уд.кв}$  – удельная нагрузка квартиры, кВт;

$n$  – количество квартир, присоединенных к элементу сети, шт» [2].

«Полная нагрузка жилого дома складывается из нагрузки квартир и силовых приемников (лифтов, вентиляции, водяных насосов и др.) и находится согласно выражениям [2]:

$$P_C = P_{Р.Л} + k_{С.ДВ} \cdot \sum_{i=1}^n P_{ДВ.Н} \cdot N_{Э}, \quad (2)$$

$$P_{Р.Л} = k_{С.Л.} \cdot \sum_{i=1}^{nl} P_{n.i}, \quad (3)$$

$$P_{Р.} = (P + P_{РЛ} \cdot N_{П} + P_C \cdot N_{П}) \cdot K_p, \quad (4)$$

где  $P_{ДВ.Н}$  – номинальные мощности электродвигателей насосов водоснабжения, вентиляции и других, равная 1,5 кВт из расчета на один этаж;

$n$  – число двигателей, шт.;

$k_{С.ДВ}$  – коэффициент спроса этих двигателей, принимаемый равным 0,7 для многоэтажного дома в зависимости от числа этажей;

$k_{С.Л.}$  – коэффициент спроса лифтовых установок (при их наличии);

$P_{n.i}$  – установленная мощность электродвигателя  $i$ -го лифта, кВт;

$P_C$  – нагрузка силовых электроприемников дома, кВт;

$N_{Э}$  – число этажей, шт.;

$N_{П}$  – число подъездов, шт.;

$K_p$  – расчетный коэффициент, учитывающий требуемый запас мощности, в зависимости от параметров здания» [2].

«Реактивная нагрузка жилого дома:

$$Q_{ж.д} = P_{ж.д} \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (5)$$

где  $\operatorname{tg} \varphi$  – тангенс угла, соответствующий нормативному  $\cos \varphi$  электроприемников квартир и силовых электроприемников» [2].

«Полная расчетная мощность жилого дома» [2]:

$$S_{ж.д} = \sqrt{P_{ж.д}^2 + Q_{ж.д}^2}, \quad (6)$$

1) Пример расчета нагрузки для ЖД № 1к1.

При числе квартир 250,  $P_{уд} = 0,75 \text{ кВт} / \text{кв}$  [11].

$$P = 0,75 \cdot 250 = 187,5 \text{ кВт}.$$

В доме 12 лифтов, мощность электропривода  $P_{р.л} = 4,5 \text{ кВт}$ .

Проведем расчеты по формулам (2-6):

$$P_{р.л.} = 0,7 \cdot 12 \cdot 1,5 = 37,8 \text{ кВт};$$

$$P'_C = 0,7 \cdot 1,5 \cdot 14 = 14,7 \text{ кВт};$$

$$P_p = (187,5 + 37,8 + 14,7 \cdot 6) \cdot 1,02 = 319,77 \text{ кВт}.$$

$$Q_p = 319,77 \cdot 0,54 = 172,59 \text{ квар};$$

$$S_p = \sqrt{319,77^2 + 172,59^2} = 363,38 \text{ кВА}.$$

2) Расчет нагрузки по вместимости (пример для школы, 1200 мест).

Для школы:  $P_{уд} = 0,18 \text{ кВт} / \text{место}$  [11].

$$P = 0,18 \cdot 1200 = 216 \text{ кВт}.$$

Проведем расчеты по формулам (2-6):

$$P_{p.л.} = 0 \text{ кВт};$$

$$P_c = 0,9 \cdot 1,5 \cdot 3 = 4,05 \text{ кВт};$$

$$P_p = (216 + 0 + 4,05 \cdot 1) \cdot 1,0 = 220,05 \text{ кВт};$$

$$Q_p = 220,05 \cdot 0,456 = 100,26 \text{ квар};$$

$$S_p = \sqrt{220,05^2 + 100,26^2} = 241,81 \text{ кВА}.$$

3) Расчет нагрузки по удельной мощности и площади (пример для жилкомсервиса, №1к2 на плане).

Для жилкомсервиса:

$$P_{уд.} = 0,14 \text{ кВт} / \text{м}^2 \text{ [11]}.$$

$$P = 0,14 \cdot 597,5 = 83,65 \text{ кВт}.$$

Проведем расчеты по формулам (2-6):

$$P_{p.л.} = 0 \text{ кВт};$$

$$P_c = 0,8 \cdot 1,5 \cdot 1 = 1,2 \text{ кВт};$$

$$P_p = (83,65 + 0 + 1,2 \cdot 1) \cdot 1,0 = 84,85 \text{ кВт};$$

$$Q_p = 84,85 \cdot 0,593 = 50,35 \text{ квар};$$

$$S_p = \sqrt{84,85^2 + 50,35^2} = 98,66 \text{ кВА}.$$

Все нагрузки по зданиям определяются аналогично, расчеты сведены в таблицу 3.

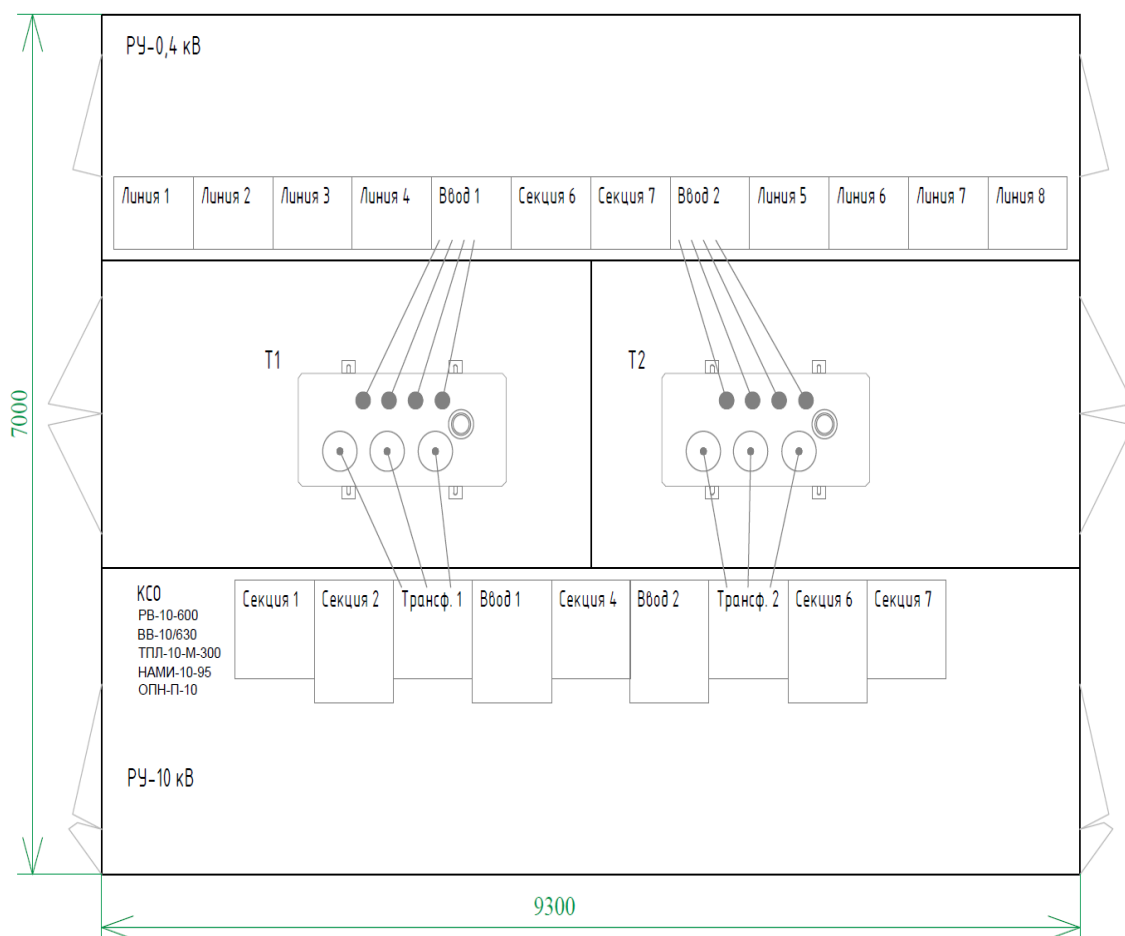
Таблица 3 – Результаты расчетов электрических нагрузок района

№ здания	cosφ	tgφ	Кс. дв	P, кВт	Pс, кВт	Кр	Pp, кВт	Qp, квар	Sp, кВА
1к1	0,88	0,54	0,7	187,5	14,70	1,02	319,77	172,59	363,38
1к2	0,86	0,59	0,8	83,65	1,20	1	84,85	50,35	98,66
1к3	0,86	0,59	0,8	154,87	2,40	1	157,27	93,32	182,87
3к1	0,88	0,54	0,7	99,6	9,45	1,08	158,60	85,60	180,23
5к1	0,88	0,54	0,7	99,6	9,45	1,08	158,60	85,60	180,23
5к2	0,9	0,48	0,9	155	2,70	1	157,70	76,38	175,22
15к1	0,88	0,54	0,7	99,6	9,45	1,08	192,62	103,96	218,88
16	0,88	0,54	0,7	280	16,80	1	326,20	176,06	370,68
16А	0,86	0,59	0,8	27,648	1,20	1	28,85	17,12	33,54
18к1	0,88	0,54	0,7	182,4	9,45	1,02	314,57	169,79	357,46
18к2	0,88	0,54	0,7	78,4	9,45	1,12	123,09	66,44	139,87
56к1	0,88	0,54	0,7	120	9,45	1,06	227,37	122,72	258,38
56к2	0,9	0,48	0,9	155	2,70	1	157,70	76,38	175,22
56к3	0,88	0,54	0,7	99,6	9,45	1,08	175,61	94,78	199,55
58к1	0,88	0,54	0,7	87,3	15,75	1,12	147,17	79,43	167,24
58к2	0,88	0,54	0,7	99,6	9,45	1,08	175,61	94,78	199,55
58к3	0,88	0,54	0,7	113,4	9,45	1,06	203,68	109,93	231,45
60к1	0,86	0,59	0,8	450,28	3,60	1	460,18	273,05	535,09
60к2	0,86	0,59	0,8	214,46	2,40	1	216,86	128,68	252,17
62к1	0,88	0,54	0,7	154	9,45	1,04	274,82	148,33	312,30
62к2	0,88	0,54	0,7	140,4	9,45	1,04	277,06	149,54	314,84
62к3	0,9	0,48	0,9	168	2,70	1	170,70	82,67	189,67
Школа	0,91	0,46	0,9	216	4,05	1	220,05	100,26	241,81
Школа	0,91	0,46	0,9	252	5,40	1	257,40	117,27	282,86
Территория, освещение	0,75	0,88	-	27,22	-	-	27,22	24,01	36,30
Итого	0,88	0,54	-	-	-	-	5013,53	2699,06	5697,45

## 2.2 Выбор ТП и силовых трансформаторов

«При выборе числа и местоположения ТП учитываем планировку застройки и трасс питающих КЛ, а также требования застройщика. Расположение ТП и распределение нагрузки выбираются с учетом обеспечения минимальной суммарной протяженности КЛ распределительной сети» [5].

Расположение ТП 10/0,4 кВ и зоны охвата их электрических нагрузок показаны на рисунке А.1 (Приложение А). Выбираем четыре современных ТП серии 2КТПН-10/0,4 с двумя силовыми трансформаторами, т.к. в составе нагрузок имеется нагрузка 2 и (для ТП-2, ТП-3 и ТП-4) 1 категории надежности электроснабжения. Компоновка ТП показана на рисунке 2.



«Оптимальная мощность силовых трансформаторов:

$$S_0 = \frac{S_p}{\beta \cdot N}, \quad (8)$$

где  $\beta$  – нормативный коэффициент загрузки трансформатора;

$N$  – количество трансформаторов, шт;

$S_p$  – расчетная нагрузка потребителей, кВА» [6].

«Допустимая к передаче в сеть 0,4 кВ величина реактивной мощности (PM):

$$Q_1 = \sqrt{(N \cdot \beta \cdot S_{н.м.})^2 - P_p^2}, \quad (9)$$

где  $S_{н.м.}$  – номинальная мощность трансформатора, кВА;

$P_p$  – расчетная активная мощность нагрузки ТП, кВт» [13].

«Требуемая для компенсации со стороны 0,4 кВ PM» [15]:

$$Q_{0,4} = Q_p - Q_1 \quad (10)$$

«При полученном отрицательном значении  $Q_{0,4}$ , либо менее 50 квар, компенсация реактивной мощности (КРМ) не требуется. Далее, в случае выбора установок КРМ, рассчитывается остаточное значение PM согласно выражению» [16]:

$$Q_{HH} = Q_p - Q_{БК} \quad (11)$$

Рассмотрим пример выбора трансформаторов ТП-1 (зона охвата нагрузок показана на рисунке А.1, Приложение А, в состав нагрузки также



входит освещение территории). Суммарные нагрузки ТП: 957,3 кВт; 539 квар; 1098,65 кВА.

Проведем расчеты по формулам (8-11).

$$S_o = \frac{1098,65}{0,7 \cdot 2} = 784,75 \text{ кВА}$$

На ТП устанавливаются два трансформатора ТМГ12-1000/10.

$$Q_1 = \sqrt{(2 \cdot 0,7 \cdot 1000)^2 - 957,3^2} = 1021,52 \text{ квар}$$

$$Q_{0,4} = 539 - 1021,52 = -482,5 \text{ квар} < 0$$

КРМ не требуется.

«Коэффициент загрузки трансформатора в нормальном режиме» [14]:

$$K_3 = \frac{S_{p.комп.}}{S_{н.т.} \cdot N}, \quad (12)$$

$$K_3 = \frac{1098,65}{1000 \cdot 2} = 0,55$$

«Коэффициент аварийной перегрузки трансформатора» [14]:

$$K_n = \frac{S_{p.комп.}}{S_{н.т.}}, \quad (13)$$

$$K_n = \frac{1098,65}{1000} = 1,1 \leq 1,4$$

Послеаварийная перегрузка составит 10 %, что менее допустимой 40 % [3].

Для других ТП расчеты аналогичны, результаты в таблице 4.

Таблица 4 – Выбор и проверка трансформаторов ТП 10/0,4 кВ

Подстанция	$P_p$ , кВт	$Q_p$ , квар	$S_p$ , кВА	$S_{p.т.}$ , кВА	$S_{т.}$ , кВА	$Q_1$ , квар	$Q_k$ , квар	$S_{p.к.}$ , кВА	$K_{п}$
ТП-1	957,3	539,0	1098,65	784,75	1000	1021,52	-482,50	1098,65	1,10
ТП-2	1132,6	584,1	1274,33	910,24	1000	822,93	-238,87	1274,33	1,27
ТП-3	1846,0	1002,3	2100,50	1500,36	1600	1268,86	-266,61	2100,50	1,31
ТП-4	1077,6	573,7	1220,83	872,02	1000	893,72	-319,99	1220,83	1,22

«Активные потери мощности в трансформаторах ТП:

$$\Delta P_m = \Delta P_k / n \cdot [(P_p^2 + Q_p^2) / S_m] + n \cdot \Delta P_{xx}, \quad (14)$$

где  $\Delta P_k$  – потери КЗ, кВт;

$n$  – число трансформаторов, шт;

$S_m$  – номинальная мощность, кВА;

$\Delta P_{xx}$  – потери ХХ, кВт» [22].

«Реактивные потери мощности в трансформаторах ТП:

$$\Delta Q_m = (U_k / n \cdot 100) \cdot [(P_p^2 + Q_p^2) / S_m] + (n \cdot I_{xx} \cdot S_m) / 100, \quad (15)$$

где  $U_k$  – напряжение КЗ, %;

$I_{xx}$  – ток ХХ, %» [22].

Для ТП-1:

$$\Delta P_m = 11 / 2 \cdot [(957,3^2 + 539^2) / 1,0^2] + 2 \cdot 2,1 = 5,9 \text{ кВт};$$

$$\Delta Q_m = (5,5 / 2 \cdot 100) \cdot [(957,3^2 + 539^2) / 1,0] + (2 \cdot 1,4 \cdot 1,0) / 100 = 61,19 \text{ квар}.$$

Потери мощности для всех ТП и итоговые нагрузки района посчитаны в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты расчетов потерь мощности для всех ТП и итоговых нагрузок района

№ ТП	$\Delta P$ , кВт	$\Delta Q$ , квар	$P_p + \Delta P$ , кВт	$Q_p + \Delta Q$ , квар	$S'_p$ , кВА
ТП-1	5,9	61,19	963,20	600,21	1134,9
ТП-2	6,4	72,66	1139,03	656,72	1314,8
ТП-3	10,5	117,43	1856,44	1119,69	2168,0
ТП-4	6,2	68,99	1083,87	642,71	1260,1
$\Sigma$	29,0	320,27	5042,55	3019,33	5877,4

### 2.3 Выбор кабелей сети 10 кВ

СЭС района должна соответствовать нормативно-техническим документам и проектной документации [9,10,12]. «Для потребителей первой и второй категории необходимо использовать двухтрансформаторные ТП, двухцепные питающие КЛ 0,4 кВ, двухсекционные ВРУ 0,4 кВ. Для потребителей третьей категории следует использовать одноцепные питающие КЛ 0,4 кВ и односекционные ВРУ 0,4 кВ. Целесообразно применить кольцевую схему питания ТП района по стороне высокого напряжения, что обеспечит требуемую надежность электроснабжения при минимальных потерях электроэнергии и капиталовложениях в прокладку КЛ» [2, 23, 24].

Питающая сеть 10 кВ выполняется кабелями современной марки АПВП, проложенными в траншеях. Схема питающей сети 10 кВ (упрощенная) показана на рисунке 3.

линия ВН  
от ПС  
(110/10/6кВ); 2хАПВП-3х185(10кВ), L=2,71 км

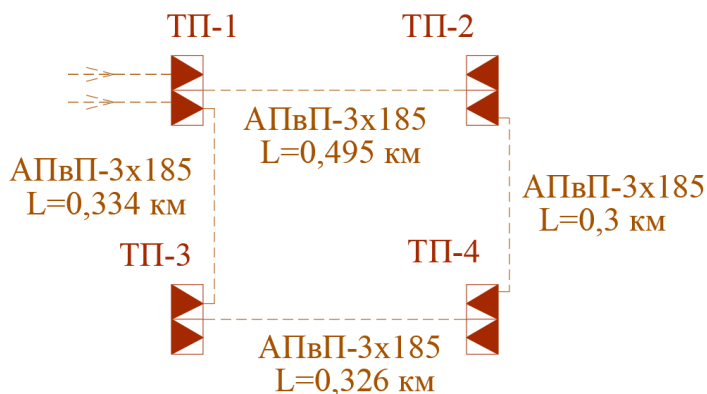


Рисунок 3 – Упрощенная схема питающей сети 10 кВ

«Расчетный рабочий ток питающей линии:

$$I_p = S_p / (\sqrt{3} \cdot U_n \cdot n), \quad (16)$$

где  $n$  – число цепей, шт» [7].

$$I_p = 5877,4 / (\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 2) = 168,7 \text{ А.}$$

Ток послеаварийного режима:

$$I_{ав} = 5877,4 / (\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 1) = 339,3 \text{ А.}$$

«Экономическое сечение:

$$F_{эк} = I_p / j_{эк}, \quad (17)$$

где  $j_{эк}$  – экономическая плотность тока, А/мм<sup>2</sup>» [17].

$$F_{эк} = 168,7 / 1,4 = 121,2 \text{ мм}^2.$$

Учитывая ток послеаварийного режима, выбирается кабель АПвП-3х185,  $I_{доп} = 360 \text{ А}$  [17].

$$I_{ав} = 339,3 \text{ А} < I_{доп} = 360 \text{ А}.$$

Сечение проходит по допустимому току.

«Потери напряжения в линии:

$$\Delta U_{л} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_p \cdot L \cdot 100}{U_n} (r_0 \cdot \cos \varphi + x_0 \cdot \sin \varphi), \quad (18)$$

где  $I_p$  – расчетный ток линии, А;

$L$  – длина линии, км;

$r_0$  и  $x_0$  – удельные активное и индуктивное сопротивления кабелей, Ом/км;

$\cos \varphi$  – средневзвешенный коэффициент мощности нагрузки» [18].

$$\Delta U_{л} = \frac{\sqrt{3} \cdot 123,6 \cdot 1,21 \cdot 100}{10000} (0,62 \cdot 0,847 + 0,09 \cdot 0,531) = 1,5 \%$$

«Потери не должны превышать допустимые 5%» [21]. КЛ 10 кВ питающей сети рассчитываются так же, результаты в таблице 6.

Таблица 6 – Расчет КЛ 10 кВ питающей сети

Участок	Sm, кВА	Ip, А	Сечение кабеля, мм <sup>2</sup>	L, м	ΔU, %
ТП1-ТП-2	5877,4	339,3	185	494,5	0,53
ТП1-ТП-3	5877,4	339,3	185	334,4	0,36
ТП2-ТП-4	5877,4	339,3	185	299,8	0,32
ТП3-ТП-4	5877,4	339,3	185	325,5	0,35

Выбранные кабели АПвП-3х185 проходят проверку по допустимому току и потерям напряжения в линиях.

## 2.4 Выбор кабелей сети 0,4 кВ

«Схема распределения сети 0,4 кВ выбирается согласно следующим основным критериям:

1) расположение ТП должно гармонично вписываться в инфраструктуру района и должно обеспечиваться оптимальное расположение по отношению к потребителям 0,4 кВ. Взаимная геометрия расположения подстанций также должна обеспечивать минимальную длину КЛ 10 кВ;

2) должна обеспечиваться требуемая надежность электроснабжения согласно ПУЭ;

3) необходимо обеспечить наименьшую протяженность КЛ 0,4 кВ с целью экономии кабельной продукции и строительно-монтажных работ. Также это обеспечит экономию электроэнергии в дальнейшем» [26, 27].

«Необходимо обеспечить возможность индивидуального отключения зданий» [12]. Исходя из вышеперечисленных критериев выбора, выбирается радиальная схема питающей сети 0,4 кВ. Питающая сеть 0,4 кВ выполняется кабелями современной марки АПвзББШп, проложенными от ТП 10/0,4 кВ до вводных распределительных пунктов (РП) зданий.

Расчет для участка сети ТП-1–1к1(ЖД).

Расчетный ток КЛ, по (16):

$$I_{\max} = 363,38 / (\sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 1) = 524,49 \text{ А.}$$

Принимаем два кабеля кабель АПвзББШп 4×120. Допустимый ток для двух данных кабелей равен 540 А [17].

«Индуктивным сопротивлением для сети 0,4 кВ пренебрегаем» [19,20].

Потери напряжения в линии, по (18):

$$\Delta U_{\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot 524,49 \cdot 0,0229 \cdot 100}{400} (0,129 \cdot 0,88 + 0 \cdot 0,47) = 0,31 \% < 5 \%$$

Для всех КЛ сети 0,4 кВ выбор кабелей и расчеты аналогичны, результаты в таблице 7.

Таблица 7 – Расчет КЛ питающей сети 0,4 кВ

Участок	N цепей	Sм, кВА	Ip, А	Сечение кабеля АПвзБбШп, мм <sup>2</sup>	Доп.кл, А	L, м	ΔU,%
ТП1--1к1	2	363,38	524,49	2*120	540	22,9	0,31
ТП1--1к2	2	98,66	142,41	50	165	80,7	1,30
ТП1--1к3	1	182,87	263,96	120	270	120,1	0,75
ТП1--15к1	2	218,88	315,93	185	345	141,2	0,68
ТП1--56к3	2	199,55	288,03	150	305	25,7	0,14
ТП2--3к1	2	180,23	260,13	120	270	150,4	0,92
ТП2--5к1	2	180,23	260,13	120	270	23,8	0,15
ТП2--5к2	2	175,22	252,91	120	270	39,4	0,23
ТП2--18к1	2	357,46	515,95	2*120	540	71,5	0,41
ТП2--18к2	2	139,87	201,89	95	240	36,7	0,22
ТП2--Школа	2	241,81	349,03	185	380	143,9	0,74
ТП3--56к1	2	258,38	372,93	185	380	73,3	0,40
ТП3--56к2	2	175,22	252,91	120	270	47,7	0,28
ТП3--58к1	2	167,24	241,38	120	270	50,4	0,29
ТП3--58к2	2	199,55	288,03	150	305	30,3	0,16
ТП3--58к3	2	231,45	334,07	185	345	62,3	0,32
ТП3--60к1	1	535,09	772,33	2*240	880	29,3	0,14
ТП3--60к2	1	252,17	363,97	240	440	75,2	0,32
ТП3--Школа	2	282,86	408,27	240	440	40,3	0,19
ТП4--16	2	370,68	535,03	2*120	540	139,4	0,82
ТП4--16А	1	33,54	48,42	10	65	174,2	2,38
ТП4--62к1	2	312,30	450,76	2*95	480	24,8	0,17
ТП4--62к2	2	314,84	454,43	2*95	480	71,5	0,48
ТП4--62к3	2	189,67	273,76	150	305	52,3	0,27

План прокладки кабельных линий показан на рисунке Б.1, Приложение Б.

## 2.5 Расчет токов КЗ

«Расчет токов КЗ в ключевых точках электрической сети необходим для выбора и проверки электрооборудования по допустимым параметрам и расчета уставок РЗА. Исходными для расчета являются принятый вариант схемы электроснабжения, выбранные к установке трансформаторы ТП, провода и кабели. Составляется эквивалентная схема замещения, куда вносятся только элементы сети, значимо влияющие на величину токов короткого замыкания, наносятся точки КЗ» [10, 25].

На рисунке 4 представлена схема замещения сети.

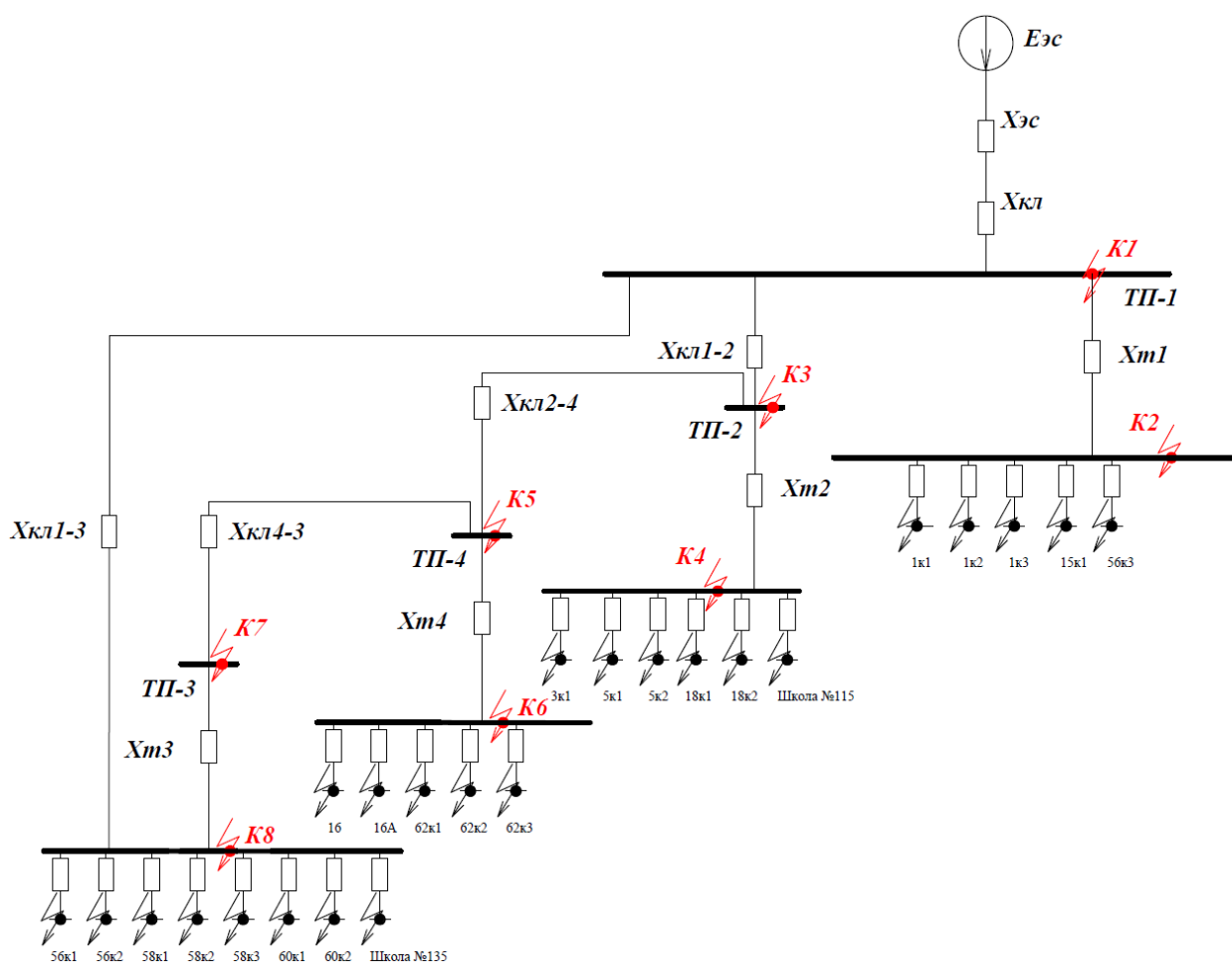


Рисунок 4 – Схема замещения сети

«Полное сопротивление цепи до точки КЗ:



$$z = \sqrt{\Sigma r^2 + \Sigma x^2}, \quad (20)$$

где  $\Sigma r$  – активное сопротивление цепи до точки КЗ, Ом;

$\Sigma x$  – индуктивное сопротивление цепи до точки КЗ, Ом» [10].

«Следует иметь в виду, что короткозамкнутая цепь находится под различными номинальными напряжениями. Приведенное сопротивление участков:

$$x^o = x \cdot \left( \frac{U_{\bar{o}}}{U_n} \right)^2, \quad (21)$$

где  $x$  – действительное сопротивление участка, Ом;

$U_{\bar{o}}$  – среднее напряжение в точке КЗ (базисное), кВ;

$U_n$  – номинальное напряжение приводимого участка, кВ» [10].

Для трансформатора:

$$x_m^o = \frac{U_k \%}{100} \cdot \frac{U_{\bar{o}}^2}{S_{шт}}, \quad (22)$$

«Приведенное сопротивление электрических линий определяется:

$$x_l^o = x_0 \cdot l \cdot \left( \frac{U_{\bar{o}}}{U_{нл}} \right)^2, \quad (23)$$

где  $x_0$  – удельное сопротивление провода или жил кабеля, Ом/км;

$l$  – длина линии, км;

$U_{нл}$  – номинальное напряжение приводимого участка, кВ» [10].

«Периодическая слагающая трехфазного тока КЗ» [10]:

$$I_{кз}^{(3)} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{3Z}}, \quad (24)$$

«Ударный ток КЗ:

$$I_y = I_{кз}^{(3)} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (\kappa_y - 1)^2}, \quad (25)$$

где  $\kappa_y$  – ударный коэффициент;

$T_a$  – постоянная затухания апериодической слагающей тока» [10].

$$\kappa_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}; \quad (26)$$

$$T_a = \sum R / 314 \cdot \sum X, \quad (27)$$

«Ток двухфазного КЗ определяется по формуле» [10]:

$$I_{кз}^{(2)} = I_{кз}^{(3)} \cdot \sqrt{3} / 2, \quad (28)$$

«Ток однофазного КЗ определяется по формуле» [10]:

$$I_{кз}^{(1)} = 0,55 \cdot I_{кз}^{(3)}, \quad (29)$$

«Переходное сопротивление в местах присоединения низковольтных проводов учитывается добавкой активного сопротивления 15 мОм и индуктивного 5 мОм» [27]. Сопротивления линий сведены в таблице 8.

Таблица 8 – Сопротивления линий

Участок	L,м	R'(0,4),мОм	X'(0,4),мОм
ТП1--1к1	22,9	1,48	0,37

Продолжение таблицы 8

Участок	L,м	R'(0,4),мОм	X'(0,4),мОм
ТП1--1к2	80,7	25,01	6,25
ТП1--1к3	120,1	15,49	3,87
ТП1--15к1	141,2	11,79	2,95
ТП1--56к3	25,7	2,64	0,66
ТП2--3к1	150,4	19,40	4,85
ТП2--5к1	23,8	3,08	0,77
ТП2--5к2	39,4	5,09	1,27
ТП2--18к1	71,5	4,33	1,08
ТП2--18к2	36,7	5,98	1,49
ТП2--Школа	143,9	11,66	2,91
ТП3--56к1	73,3	5,94	1,49
ТП3--56к2	47,7	6,15	1,54
ТП3--58к1	50,4	6,50	1,63
ТП3--58к2	30,3	3,12	0,78
ТП3--58к3	62,3	5,21	1,30
ТП3--60к1	29,3	1,01	0,25
ТП3--60к2	75,2	4,85	1,21
ТП3--Школа	40,3	2,60	0,65
ТП4--16	139,4	8,43	2,11
ТП4--16А	174,2	270,01	67,50
ТП4--62к1	24,8	2,02	0,50
ТП4--62к2	71,5	5,83	1,46
ТП4--62к3	52,3	5,38	1,35
ТП1-ТП-2	495	3,30	0,83
ТП1-ТП-3	334	2,23	0,56
ТП2-ТП-4	300	2,00	0,50
ТП3-ТП-4	325	2,17	0,54
КЛ до ТП-1	2,710	9,05	2,26

Сопровитления трансформаторов сведены в таблице 9.

Таблица 9 – Сопровитления трансформаторов

Место	R'(10), мОм	X'(10), мОм	R'(0,4), мОм	X'(0,4), мОм
ТП-1	1,1	5,5	0,0018	0,0088
ТП-2	1,1	5,5	0,0018	0,0088
ТП-3	1,125	3,4375	0,0018	0,0055
ТП-4	1,1	5,5	0,0018	0,0088

Расчет для участка ТП-1–1к1.

Сопровитления КЛ 0,4 кВ до РП здания 1к1, с учетом переходных сопротивлений контактов:

$$R_{КЛ0,4} = 1,48 + 15 = 16,48 \text{ мОм};$$

$$X_{КЛ0,4} = 0,37 + 5 = 5,37 \text{ мОм}.$$

С учетом сопротивления трансформатора ТП-1, КЛ 10 кВ и сопротивления энергосистемы, суммарные сопротивления до точки КЗ:

$$R_{\Sigma} = 16,48 + 0,018 + 2,57 + 9,05 = 28,1164 \text{ мОм};$$

$$X_{\Sigma} = 5,37 + 5 + 0,088 + 0,64 + 2,26 + 66,68 = 74,9584 \text{ мОм};$$

$$z = \sqrt{28,1164^2 + 74,9584^2} = 80,0581 \text{ мОм}.$$

Проведем расчет по формулам (24–29):

$$I_{кз}^{(3)} = \frac{0,4 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 80,0581} = 2,885 \text{ кА};$$

$$T_a = 28,1164 / (314 \cdot 74,9584) = 0,0119;$$

$$k_y = 1 + e^{\frac{0,01}{0,0119}} = 1,43;$$

$$I_y = 2,885 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (1,43 - 1)^2} = 3,383 \text{ кА};$$

$$I_{кз}^{(2)} = 2,885 \cdot \sqrt{3} / 2 = 2,929 \text{ кА};$$

$$I_{кз}^{(1)} = 0,55 \cdot 2,885 = 1,587 \text{ кА}.$$

Токи КЗ на остальных участках рассчитываются аналогично, результаты приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Результаты расчетов токов КЗ

Участок / точка КЗ	Zсум, мОм	I <sup>(3)</sup> кз., кА	Iу., кА	I <sup>(2)</sup> кз., кА	I <sup>(1)</sup> кз, кА
К1	78,1910	2,954	3,350	2,901	-
К2	78,1968	2,953	3,350	2,901	1,624
К3	80,0452	2,885	3,359	2,909	-
К4	80,0540	2,885	3,359	2,909	1,587
К5	96,8557	2,384	3,157	2,734	-
К6	96,8641	2,384	3,157	2,734	1,311
К7	98,3699	2,348	3,129	2,709	-
К8	98,3782	2,348	3,128	2,709	1,291
ТП1--1к1	80,0581	2,885	3,383	2,929	1,587
ТП1--1к2	114,9000	2,010	2,034	1,762	1,105
ТП1--1к3	92,7418	2,490	3,165	2,741	1,370
ТП1--15к1	92,2881	2,502	3,181	2,755	1,376
ТП1--56к3	91,9199	2,512	3,184	2,757	1,382
ТП2--3к1	91,3809	2,527	3,213	2,782	1,390
ТП2--5к1	110,2638	2,094	2,887	2,500	1,152
ТП2--5к2	110,3734	2,092	2,884	2,498	1,151
ТП2--18к1	111,2504	2,076	2,862	2,478	1,142
ТП2--18к2	111,5793	2,070	2,853	2,471	1,138
ТП2--Школа	110,4830	2,090	2,882	2,495	1,150
ТП3--56к1	110,2089	2,096	2,889	2,502	1,153
ТП3--56к2	112,4563	2,054	2,831	2,452	1,130
ТП3--58к1	90,2996	2,558	3,199	2,771	1,407
ТП3--58к2	90,2022	2,560	3,203	2,774	1,408
ТП3--58к3	89,6447	2,576	3,223	2,791	1,417
ТП3--60к1	89,8394	2,571	3,216	2,785	1,414
ТП3--60к2	89,7067	2,574	3,221	2,789	1,416
ТП3--Школа	88,7245	2,603	3,256	2,820	1,432
ТП4--16	89,7438	2,573	3,219	2,788	1,415
ТП4--16А	407,7227	0,283	0,295	0,256	0,156
ТП4--62к1	115,2675	2,004	2,774	2,402	1,102
ТП4--62к2	113,3160	2,038	2,822	2,444	1,121
ТП4--62к3	111,8073	2,066	2,860	2,477	1,136

## 2.6 Выбор аппаратов защиты линий распределительной сети

«Для защиты линий распределительной сети 0,4 кВ требуется выбрать автоматические выключатели, условия выбора» [2, 8]:

- «номинальное напряжение аппарата должно соответствовать напряжению сети, либо превышать его» [2, 8]:

$$U_{ном} \geq U_c, \quad (30)$$

- «предельная коммутационная способность (ПКС) аппарата должна превышать максимальный ударный ток КЗ в месте установки» [2]:

$$ПКС > i_y, \quad (31)$$

- «уставка теплового расцепителя должна превышать ток нагрузки» [2]:

$$I_{m.p.} > I_p, \quad (32)$$

- «отстройка уставки теплового расцепителя от тока нагрузки» [2]:

$$I_{m.p.} > 1,1 \cdot I_p, \quad (33)$$

«Проверка чувствительности электромагнитного расцепителя» [2]:

$$K_q = \frac{I_{\kappa}^{(1)}}{I_{эм.р.}} > 1,1. \quad (34)$$

«Проверка по селективности срабатывания:

$$t_{c.o.} \geq t_{c.o.n.} + \Delta t, \quad (35)$$

где  $t_{c.o.n.}$  – время срабатывания отсечки предыдущей защиты, с;

$\Delta t$  – ступень селективности, с» [18].

Выбор автоматического выключателя для защиты КЛ к зданию №1к1 согласно (30-35). Выбираем автомат ВА-52-39 на номинальный ток 630 А:

$$U_{ном} = 400 \geq 400 \text{ В};$$

$$1,1 \cdot 524,49 = 576,94 \text{ А};$$

$$I_{m.p.} = 630 > 576,94 \text{ А};$$

$$K_{\text{ч}} = \frac{1,59}{0,63} = 1,87 > 1,1;$$

$$ПКС = 36 > 3,38 \text{ кА};$$

$$t_{c.o.} = 0,25 \geq 0,02 + 0,1 = 0,12 \text{ с.}$$

Все условия выбора и проверки выполняются.

Для остальных линий выбор и проверка автоматов аналогичны, результаты сведены в таблице 11.

Таблица 11 – Выбор и проверка автоматических выключателей

Участок	$I_p$ , А	$1,1 \cdot I_p$ , А	$I_{y.}$ , кА	$I^{(1)}_{кз}$ , кА	Тип автомата	$I_{ном}$ , А	$I_{т.р.}$ , кА	$I_{\text{э.р.}}$ , кА	Кч	ПКС, кА
ТП1--1к1	524,49	576,94	3,38	1,59	ВА-52-39	630	0,63	0,85	1,87	36
ТП1--1к2	142,41	156,65	2,03	1,11	ВА-52-39	160	0,16	0,22	5,12	36
ТП1--1к3	263,96	290,35	3,17	1,37	ВА-52-39	320	0,32	0,43	3,17	36
ТП1--15к1	315,93	347,53	3,18	1,38	ВА-52-39	400	0,40	0,54	2,55	36
ТП1--56к3	288,03	316,84	3,18	1,38	ВА-52-39	320	0,32	0,43	3,20	36
ТП2--3к1	260,13	286,15	3,21	1,39	ВА-52-39	320	0,32	0,43	3,22	36
ТП2--5к1	260,13	286,15	2,89	1,15	ВА-52-39	320	0,32	0,43	2,67	36
ТП2--5к2	252,91	278,20	2,88	1,15	ВА-52-39	320	0,32	0,43	2,66	36
ТП2--18к1	515,95	567,55	2,86	1,14	ВА-52-39	630	0,63	0,85	1,34	36
ТП2--18к2	201,89	222,08	2,85	1,14	ВА-52-39	250	0,25	0,34	3,37	36
ТП2--Школа	349,03	383,93	2,88	1,15	ВА-52-39	400	0,40	0,54	2,13	36
ТП3--56к1	372,93	410,23	2,89	1,15	ВА-52-39	630	0,63	0,85	1,36	36
ТП3--56к2	252,91	278,20	2,83	1,13	ВА-52-39	320	0,32	0,43	2,61	36
ТП3--58к1	241,38	265,52	3,20	1,41	ВА-52-39	320	0,32	0,43	3,26	36
ТП3--58к2	288,03	316,84	3,20	1,41	ВА-52-39	320	0,32	0,43	3,26	36
ТП3--58к3	334,07	367,48	3,22	1,42	ВА-52-39	400	0,40	0,54	2,62	36
ТП3--60к1	772,33	849,57	3,22	1,41	ВА-52-39	1000	1,00	1,25	1,13	36
ТП3--60к2	363,97	400,37	3,22	1,42	ВА-52-39	630	0,63	0,85	1,66	36
ТП3--Школа	408,27	449,10	3,26	1,43	ВА-52-39	630	0,63	0,85	1,68	36
ТП4--16	535,03	588,54	3,22	1,42	ВА-52-39	630	0,63	0,85	1,66	36
ТП4--16А	48,42	53,26	0,30	0,16	ВА-47-29	63	0,06	0,09	1,83	4,2
ТП4--62к1	450,76	495,84	2,77	1,10	ВА-52-39	630	0,63	0,85	1,30	36

Продолжение таблицы 11

Участок	$I_p, A$	$1,1 \cdot I_p, A$	$I_{y.}, kA$	$I^{(1)}_{кз}, kA$	Тип автомата	$I_{ном}, A$	$I_{т.р.}, kA$	$I_{э.р.}, kA$	Кч	ПКС, кА
ТП4--62к2	454,43	499,87	2,82	1,12	ВА-52-39	630	0,63	0,85	1,32	36
ТП4--62к3	273,76	301,14	2,86	1,14	ВА-52-39	320	0,32	0,43	2,63	36

## 2.7 Расчет заземления подстанций

«Максимально допустимое сопротивление со стороны 0,4 кВ  $R_3=4 \text{ Ом}$ » [8,9]. «Удельное сопротивление грунта для вертикальных (ВЭ) и горизонтальных (ГЭ) электродов определяется по формуле:

$$\rho_p = \rho \cdot K_c, \quad (28)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление грунта (известняк),  $2000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;

$K_c$  – «коэффициент сезонности» [16].

$$\rho_{p6} = 2000 \cdot 1,1 = 2200 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

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

«Используем контурное заземление. Для ВЭ используем угловую сталь 50x50 мм, для ГЭ используем полосовую сталь 50x5 мм» [16].

«Сопротивление растеканию для одного ВЭ определяется по формуле:

$$R_{овз} = \frac{\rho_{p6}}{2 \cdot \pi \cdot l} \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot l}{d} \right) + 0,5 \cdot \ln \left( \frac{4 \cdot t + l}{4 \cdot t - l} \right) \right] \quad (29)$$

где  $l$  – длина ВЭ, м;

$d$  – приведенный диаметр ВЭ, м;

$t$  – расстояние от поверхности до центра ВЭ, м [16].



$$d = 0,95 \cdot b, \quad (30)$$

где  $b$  – ширина уголка, м.

Сопротивление растеканию для одного ВЭ:

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

$$t = 3 / 2 + 0,8 = 2,3 \text{ м}$$

$$R_{\text{оэз}} = \frac{2200}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot 3}{0,0475} \right) + 0,5 \cdot \ln \left( \frac{4 \cdot 2,3 + 3}{4 \cdot 2,3 - 3} \right) \right] = 60,962 \text{ Ом}$$

«Расчетное число ВЭ» [16]:

$$n' = R_{\text{оэз}} / R_n \quad (31)$$

где  $R_n = 4$  Ом – наибольшее допустимое сопротивление заземления, Ом.

$$n' = 60,962 / 4 = 15,2 \approx 16 \text{ шт}$$

«Длина ГЭ определяется по формуле» [16]:

$$l_z = 1,05 \cdot a \cdot n' \quad (32)$$

где  $a$  – расстояние между ВЭ, м.

$$a = l_{\text{пер}} / n' \quad (33)$$

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

$$l_{\text{пер}} = 2 \cdot (9,3 + 7) = 32,6 \text{ м}$$

$$a = 32,6 / 16 = 2,04 \text{ м}$$

$$l_z = 1,05 \cdot 2,04 \cdot 16 = 34,27 \text{ м}$$

Схема контура заземления ТП показана на рисунке 5.

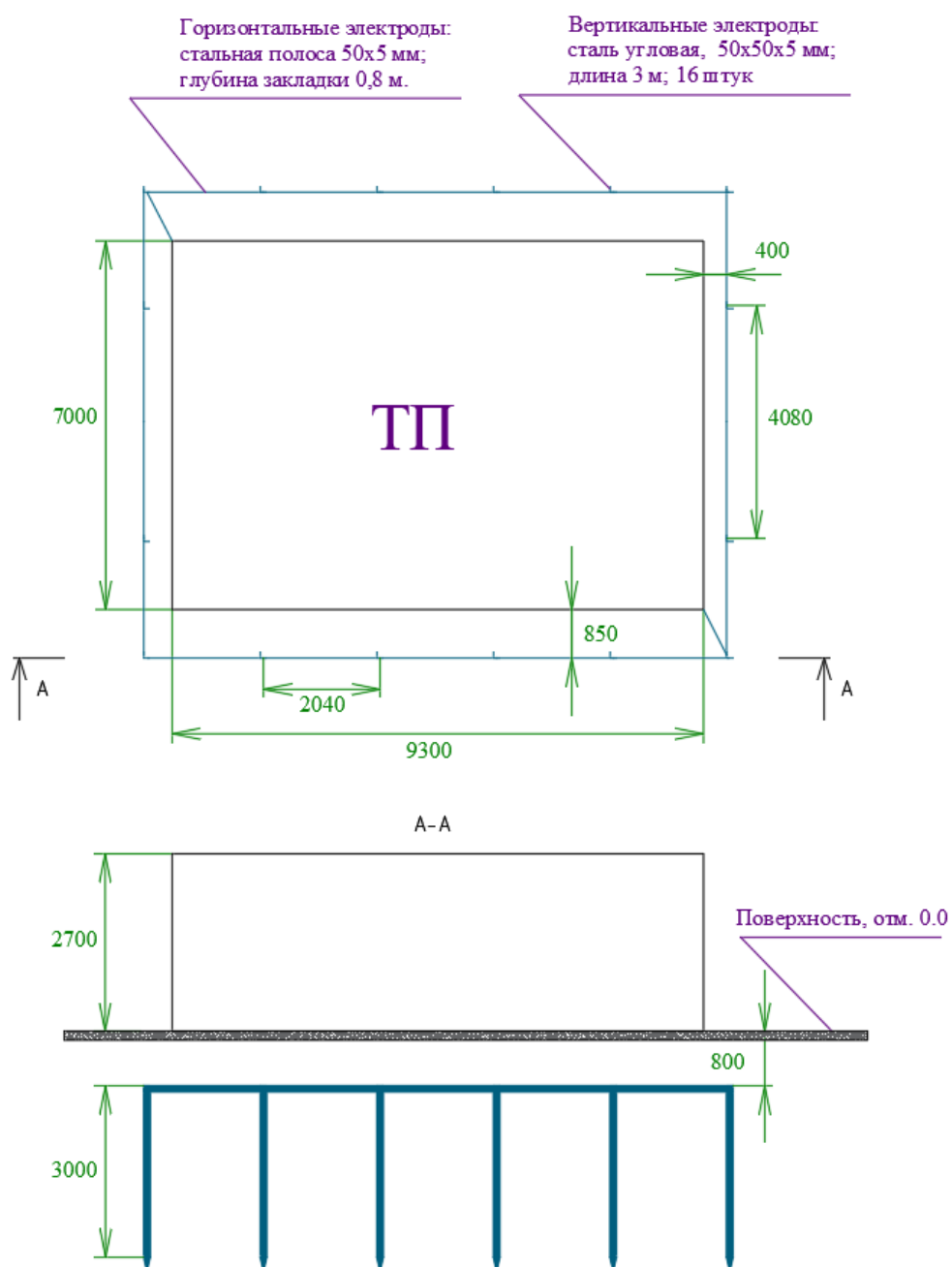


Рисунок 5 – Схема контура заземления ТП

«Сопротивление растеканию ГЭ:

$$R_{\text{ра}} = \frac{\rho_{\text{пз}}}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left( \frac{l^2}{d \cdot t} \right) \quad (34)$$

где  $l$  – длина ГЭ, м;

$d$  – расчетный диаметр ГЭ, м;

$t$  – расстояние от поверхности до центра ГЭ, м» [17].

$$d = 0,5 \cdot b, \quad (35)$$

где  $b$  – ширина полосы, м.

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

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

$$R_{\text{эз}} = \frac{2800}{2 \cdot 3,14 \cdot 34,27} \cdot \ln \left( \frac{34,27^2}{0,025 \cdot 0,825} \right) = 2,757 \text{ Ом}$$

«Эквивалентное сопротивление группового заземлителя:

$$R_{\text{зп}} = \frac{R_{\text{овэ}} \cdot R_{\text{эз}}}{R_{\text{овэ}} \cdot \eta_{\text{в}} \cdot n + R_{\text{эз}} \cdot \eta_{\text{г}}} \quad (36)$$

где  $\eta_{\text{в}}$  – коэффициент использования ВЭ;

$\eta_{\text{г}}$  – коэффициент использования ГЭ» [17].

$$R_{\text{зп}} = \frac{60,962 \cdot 2,757}{60,962 \cdot 0,51 \cdot 16 + 2,757 \cdot 0,3} = 3,792 \text{ Ом} < 4 \text{ Ом}$$

Вывод по разделу.

В данном разделе проведена разработка СЭС микрорайона, выбрано и проверено по допустимым параметрам электрооборудование, проведен расчет заземления ТП. Далее для обеспечения требуемой надежности электроснабжения необходимо провести выбор средств РЗА питающей КЛ 10 кВ и автоматического ввода резерва питания потребителей 1 категории.

### 3 Выбор устройств релейной защиты и автоматики (РЗА)

#### 3.1 Релейная защита питающей линии 10 кВ

Сравнительная техническая характеристика некоторых современных терминалов релейной защиты (РЗ) линий 6-10 кВ приведена в таблице 12.

Таблица 12 – Сравнительная техническая характеристика терминалов релейной защиты линий 6-10 кВ

Сравнительные величины	Сириус-2МЛ-02	БМРЗ-101-Д-КЛ-01	ТОР 200 Л
Назначение	Универсальный, защита любых присоединений	Защита КЛ	Защита КЛ и ВЛ
Интерфейсы связи	2xRS-485, 2xEthernet RJ45	RS-485, Ethernet RJ45	RS-485
Емкость памяти архива событий, Мб	1000	512	512
Емкость памяти архива срабатываний, Мб	50	25	25
Потребляемая мощность, Вт, не более	25	32	30
Масса не более, кг	7	7,4	7,6

Выбираются терминалы Сириус-2МЛ-02 производства ЗАО «Радиус-Автоматика» ввиду лучших технико-эксплуатационных характеристик.

Микропроцессорная часть позволяет задать токи срабатывания программно.

Защита питающей КЛ 10 кВ обеспечивается терминалами Сириус-2МЛ-02, схема приведена в Приложении В.

Внешний вид терминала Сириус-2МЛ-02 показан на рисунке 6.



Рисунок 6 – Внешний вид терминала Сириус-2МЛ-02

Рассчитаем уставки предусмотренных видов РЗ.

«Токовая отсечка (ТО):

$$I_{C3} \geq K_{отс} \cdot I_{НОМ.Т} , \quad (36)$$

где  $K_{отс}$  – коэффициент отстройки, равен 5,0 для МУ РЗА» [1].

$$I_{C3} \geq 5 \cdot 0,17 = 0,848 \text{ кА}$$

«МТЗ:

$$I_{C3} \geq \frac{K_H \cdot K_{C3}}{K_B} \cdot I_{р.макс} , \quad (37)$$

где  $I_{p.макс}$  – расчетный ток КЛ, А» [1].

$$I_{C3} \geq \frac{1,1 \cdot 1,18}{0,935} \cdot 169,666 = 235,536 \text{ A}$$

«Ток срабатывания реле:

$$I_{CP} = I_{C3} \cdot \frac{k_{cx}}{n_T}, \quad (38)$$

где  $k_{cx} = 1$  – коэффициент схемы подключения ТТ;

$n_T$  – коэффициент трансформации ТТ» [1].

$$I_{CP} = 235,536 \cdot \frac{1}{200/5} = 5,888 \text{ A}$$

«Коэффициент чувствительности защиты» [1]:

$$k_u = \frac{I_K^{(2)}}{I_{C3}}, \quad (39)$$

$$k_u = \frac{2901}{235,536} = 12,3 \geq 1,5$$

Защита от замыканий на землю (ЗНЗ).

«Ток срабатывания:

$$I_{C3} \geq k_{отс} \cdot k_B \cdot I_C, \quad (40)$$

где  $k_{отс}$  – коэффициент отстройки, равен 1,2 для МУ РЗА;

$k_B$  – коэффициент броска ёмкостного тока, равен 2,5 для МУ РЗА;

$I_C$  – ёмкостный ток присоединения, А.

$$I_C = I_{CO} \cdot L \cdot m, \quad (41)$$

где  $I_{CO}$  – удельный ёмкостный ток кабеля, А/км;

$L$  – длина линии, км;

$m$  – число проводов на фазу, шт» [1].

$$I_C = 1,16 \cdot 2,71 \cdot 1 = 3,144 \text{ А}$$

$$I_{C.з.} \geq 1,2 \cdot 2,5 \cdot 3,144 = 9,431 \text{ А}$$

### 3.2 Выбор терминала для обеспечения автоматического ввода резерва (АВР) 0,4 кВ, расчет уставок АВР

АВР предназначен для автоматического переключения питания ответственных потребителей на резервный источник при пропадании либо несоответствии норм показателей качества питания с основного источника. Упрощенная схема АВР 0,4 кВ показана на рисунке 7.

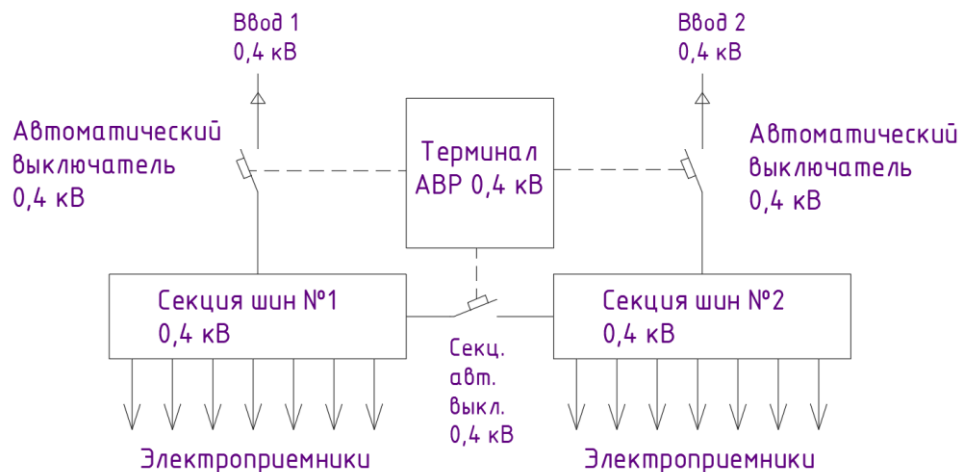


Рисунок 7 – Упрощенная схема АВР 0,4 кВ





Выбор уставок АВР 0,4 кВ производится в соответствии с инструкцией терминала.

«Уставка пускового органа минимального напряжения выбирается по условию:

$$U_{C.P} = 0,7 \cdot U_{НОМ}, \quad (42)$$

где  $U_{НОМ}$  – номинальное напряжение сети, В» [1].

$$U_{C.P0,4} = 0,7 \cdot 380 = 266 \text{ В.}$$

«Напряжение срабатывания максимального реле напряжения, контролирующего наличие напряжения на другой секции, выбирается по условию» [1]:

$$U_{C.P} = (0,6 \div 0,65) \cdot U_{НОМ}, \quad (43)$$

$$U_{C.P0,4} = (0,6 \div 0,65) \cdot 380 = 228 \div 247 \text{ В.}$$

«Время срабатывания реле времени пускового органа напряжения АВР выбирается по условию:

$$t_{C.P.ABP} = t_1 + \Delta t, \quad (44)$$

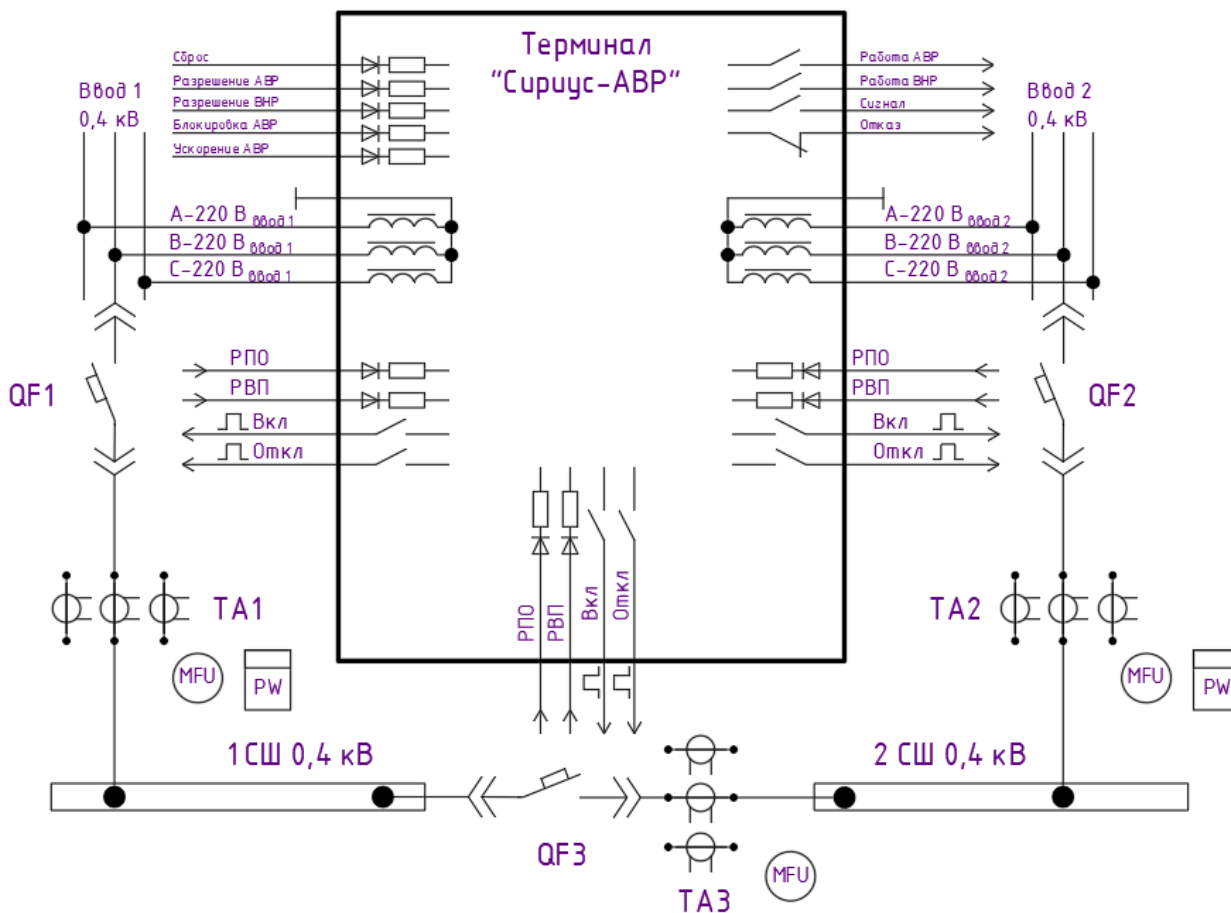
где  $t_1$  – наибольшее время срабатывания автоматических выключателей при КЗ на отходящих линиях, с;

$\Delta t$  – ступень селективности, с» [1].

$$t_{C.P.ABP} = 0,05 + 0,5 = 0,55 \text{ с.}$$

Схема микропроцессорного АВР приведена на рисунке 9.

## Схема подключения микропроцессорного терминала АВР



### Спецификация

Зона	Поз. обозн.	Обозначение	Кол.	Примечание
		Автоматические выключатели		
	QF1..QF3	ВА-52-39	3	
		Трансформаторы тока		
	TA1..TA3	ТШЛ-0,66-У1	9	

Рисунок 9 – Схема микропроцессорного АВР 0,4 кВ

Вывод по разделу.

Для обеспечения функций релейной защиты и автоматики выбраны современные микропроцессорные терминалы. Защита питающей КЛ 10 кВ обеспечивается терминалами Сириус-2МЛ-02. АВР на шинах вводных РП 0,4 кВ потребителей 1 категории выполняется на терминале Сириус-АВР. Рассчитаны уставки предусмотренных видов РЗА.

## Заключение

Выполнено проектирование системы электроснабжения микрорайона «Западный» города Тольятти, при разработке использовались актуальные нормативно-технические документы.

В ходе проектирования решены задачи:

- проанализирована проектно-строительная документация;
- проанализированы основные нормативно-технические документы по разработке СЭС жилых районов;
- систематизированы характеристики рассматриваемого района и зданий, инфраструктуры района, электрических нагрузок;
- определены расчетные электрические нагрузки микрорайона;
- проведен выбор трансформаторных подстанций, силовых трансформаторов;
- рассчитаны питающие сети 10 кВ и 0,4 кВ, выбрано электрооборудование, выбраны кабели;
- рассчитаны токи КЗ;
- выбраны аппараты защит линий распределительной сети, выполнена их проверка по чувствительности срабатывания и допустимым параметрам в рабочих и аварийных режимах;
- произведен расчет заземляющего устройства подстанций, составлена схема контура заземления;
- выбрано микропроцессорное оборудование релейной защиты и автоматики, составлены схемы подключения терминалов РЗА, определены требуемые уставки.

Разработанная СЭС микрорайона обеспечит надежное и безопасное электроснабжение потребителей согласно актуальным требованиям нормативно-технических документов.

## Список используемых источников

1. Андреев В. А. Релейная защита систем электроснабжения в примерах и задачах / В.А. Андреев. – М.: Высшая школа, 2017. 256 с.
2. Анчарова, Т.В. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений / Т.В. Анчарова, Е.Д. Стебунова, М.А. Рашевская. – М.: Инфра-Инженерия, 2016. 416 с.
3. ГОСТ 14209-85. Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов. – М.: Энергия, 2018. 39 с.
4. Дубинский Г.Н. Наладка устройств электроснабжения напряжением свыше 1000 В / Г.Н. Дубинский, Л.Г. Левин. – М.: Солон-Пресс, 2017. 416 с.
5. Конюхова, Е.А. Электроснабжение объектов: Учебное пособие для среднего профессионального образования / Е.А. Конюхова. – М.: ИЦ Академия, 2017. 320 с.
6. Кудрин Б.И. Электроснабжение потребителей и режимы: Учебное пособие / Б.И. Кудрин, Б.В. Жилин, Ю.В. Матюнина. - М.: МЭИ, 2016. 412 с.
7. Куско А. Сети электроснабжения. Методы и средства обеспечения качества энергии / А. Куско, М. Томпсон. - М.: Додэка XXI, 2016. 336 с.
8. Охрана труда в энергетике: Учебник для техникумов / под ред. Князевского Б.А. – М.: Энергопромиздат, 2017. 376 с.
9. Правила устройства электроустановок, издание 7. – М.: Энергия, 2021. 648 с.
10. РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования - М.: Энергия, 2018. 69 с.
11. РД 34.20.185-94. Инструкция по проектированию городских электрических сетей. – Москва: Изд-во стандартов, 2021. – 30 с.
12. Проектная документация. Электроснабжение микрорайона Западный. – Тольятти, 2021. – 205 с.

13. Фролов Ю. М. Основы электроснабжения / Ю.М. Фролов, В.П. Шелякин. – М.: Лань, 2018. 480 с.
14. Хорольский В. Я. Надежность электроснабжения / В.Я. Хорольский, М.А. Таранов. – М.: Форум, Инфра-М, 2017. 128 с.
15. Хорольский В. Я. Эксплуатация систем электроснабжения / В.Я. Хорольский, М.А. Таранов. – М.: Дрофа, 2016. 288 с.
16. Шеховцов В. П. Расчет и проектирование схем электроснабжения / В.П. Шеховцов. – М.: Форум, Инфра-М, 2017. 216 с.
17. Шеховцов В. П. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению / В.П. Шеховцов. - М.: Форум, Инфра-М, 2016. 136 с.
18. Школа электрика. Информационный портал. [Электронный ресурс]. – <http://electricalschool.info/> (дата обращения: 19.09.2021).
19. Электроснабжение – проектирование. Информационный портал. [Электронный ресурс]. – <http://220blog.ru/> (дата обращения: 19.09.2021).
20. Электротехнический интернет-портал. [Электронный ресурс]. – <https://www.elec.ru/> (дата обращения: 20.09.2021).
21. Энергосети России. Информационный портал. [Электронный ресурс]. – <https://energoseti.ru/> (дата обращения: 19.09.2021).
22. Юндин М. А. Курсовое и дипломное проектирование по электроснабжению / М.А. Юндин, А.М. Королев. - М.: Лань, 2016. 320 с.
23. Biegelmeier G. Electro supply system. – Bulletin. Int. Sek IVSS Verhüt Arbeitsall und Berufskrankh Elek, 2017. 428 p.
24. Dalziel C.F., Lee W. Electricity and power supply – “IEEE Spectrum”, 2018, №2. p. 44-50.
25. Designing a modern substation to minimise cost and time during future upgrades. Sinclair Boy Pienaar. /Dissertation submitted in fulfilment of the re-quirements for the degree: Master of Engineering in Electrical Engineering /Department of Electrical, Electronic and Computer Engineering, Faculty of Engi-neering and Information Technology. Central University of Technology, Free State, July 2019.

26. Minimization of active capacity losses in cable power lines of 0.4 kV using optimally distributed compensating devices at petrochemical and oil refining enterprises. E. V. Tumaeva<sup>1</sup>, S. S. Kuzin and E. N. Gavrilov. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 643, DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012100; 21 September 2019.

27. Vlasyuk, I.V. Paramonov, S.Yu. Belov, S.I. The influence of reactive power compensation on energy saving by agricultural enterprises. AGRIS: International information system for the agricultural science and technology, 2018, P 40–46.

# Приложение А

## Расположение подстанций 10/0,4 кВ, зоны охвата нагрузок

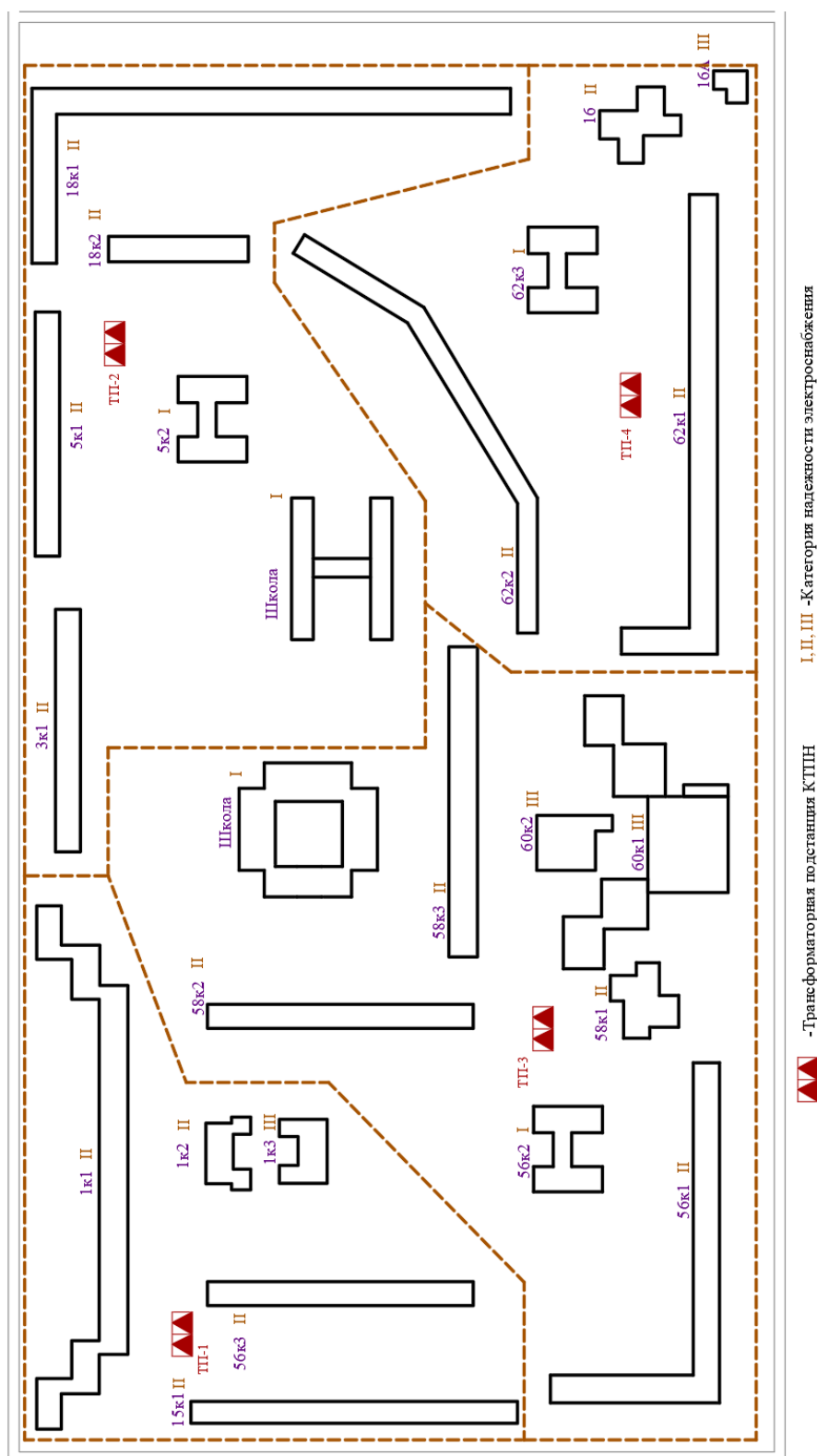


Рисунок А.1 – Расположение ТП 10/0,4 кВ и зоны охвата нагрузок

# Приложение Б

## План прокладки кабельных линий

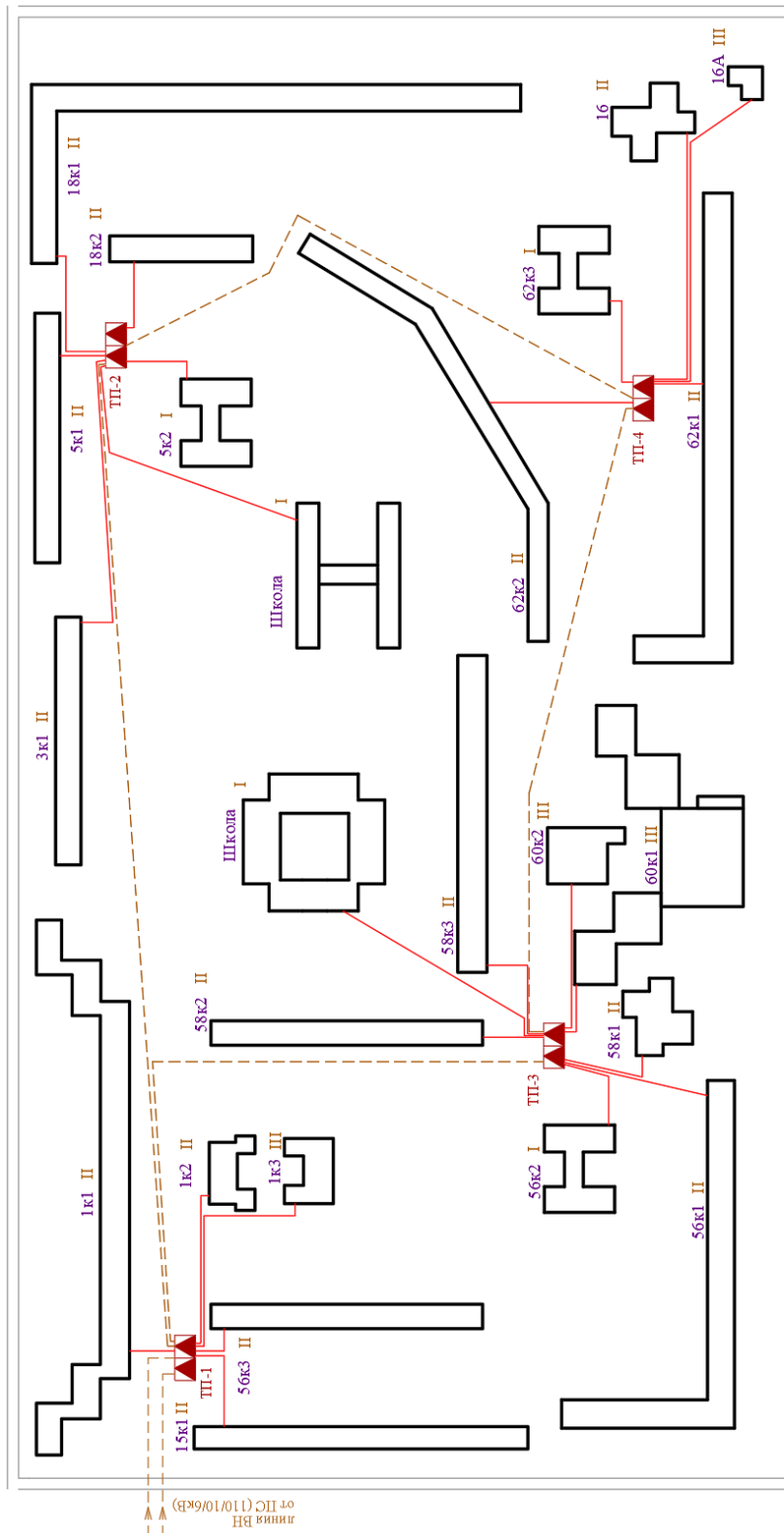


Рисунок Б.1 – План прокладки кабельных линий



## Приложение В

### Схема релейной защиты питающей линии 10 кВ

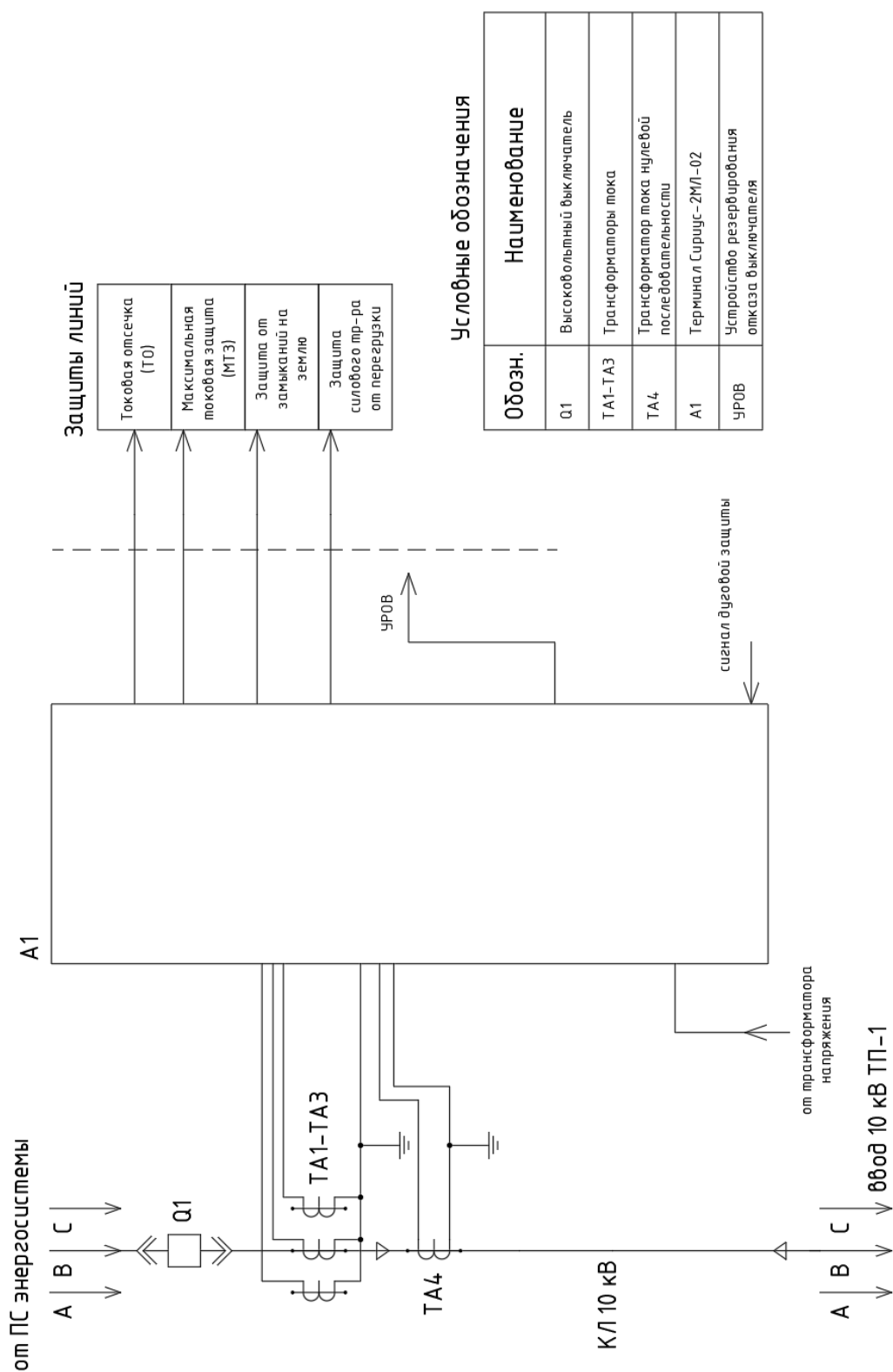


Рисунок В.1 – Схема релейной защиты питающей линии 10 кВ