

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»
(г. Хабаровск)

Обучающийся

В.С. Котов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., И.В. Горохов

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

Тольятти 2025

Аннотация

Выпускная квалификационная работа 46 страниц, 7 рисунков, 8 таблиц, 20 источников.

Актуальность темы работы. В городе Хабаровск планируется к постройке новый жилой микрорайон, для которого необходимо спроектировать качественную и надежную систему электроснабжения. Подключение к электрической сети зданий в составе инфраструктуры микрорайона позволит обеспечить питанием электрической энергией санитарно-технические устройства, бытовую технику и электронику, освещение и другие электроприемники. В целом, электроснабжение микрорайона обеспечит общее нормальное функционирование его инфраструктуры. Реализация предлагаемой системы электроснабжения и технических решений, монтаж и наладка предлагаемого оборудования позволят ввести новый микрорайон в эксплуатацию, что будет способствовать экономическому и социальному развитию города.

Объект исследования: микрорайон г. Хабаровск.

Предмет исследования: система электроснабжения микрорайона.

Цель работы: обеспечение надежного и качественного электроснабжения микрорайона.

Содержание работы включает вопросы: характеристика микрорайона и электрических нагрузок; основные требования к системе электроснабжения; проектирование системы электроснабжения микрорайона.

Содержание

Введение	4
1 Краткая характеристика микрорайона, зданий и электрических нагрузок....	7
2 Проектирование системы электроснабжения микрорайона	10
2.1 Основные требования к системе электроснабжения	10
2.2 Определение электрических нагрузок зданий и системы освещения территории	10
2.3 Выбор числа и мощности силовых трансформаторов, типа и марок подстанций	16
2.4 Расчет высоковольтной сети, выбор кабелей	21
2.5 Расчет низковольтной сети, выбор кабелей	25
2.6 Определение токов короткого замыкания, проверка термической стойкости кабелей	26
2.7 Выбор устройств защиты и автоматики	32
2.8 Расчет заземляющего устройства подстанций	40
Заключение	44
Список используемых источников	45

Введение

Микрорайоны (МКР) городов являются важной частью городской инфраструктуры, и их электроснабжение играет ключевую роль в обеспечении комфорта и безопасности жителей. Электроснабжение МКР осуществляется через электрические сети, которые имеют большую протяженность и разветвленность, это позволяет обеспечивать электроэнергией множество потребителей, «находящихся на территории микрорайона. Однако такая система имеет свои особенности, связанные с расположением потребителей и их категорией надёжности электроснабжения. В микрорайонах обычно располагаются жилые дома, общественные здания, предприятия и другие потребители, все они относятся к определённой категории надёжности электроснабжения, которая зависит от их важности и непрерывности работы.» [9] Например, жилые дома обычно относятся ко второй категории (или первой при наличии лифтов), а общественные здания и предприятия – к первой или второй. Для обеспечения надёжного электроснабжения в используются различные технические средства и оборудование. Трансформаторные подстанции (ТП), распределительные устройства (РУ) и линии электропередачи (ЛЭП) являются основными элементами системы электроснабжения (СЭС).

Электроприемниками в составе инфраструктуры МКР являются «санитарно-технические устройства (например, электроприводы насосов водоснабжения и канализации, вентиляции), электроприводы лифтов, освещение территории и внутри зданий, бытовая техника и электроника, а также другие потребители электроэнергии. Очевидно, что электроснабжение современных микрорайонов является обязательным условием для их заселения, проживания в них населения, работы промышленных предприятий, функционирования коммерческих, административных и общественных объектов» [9]. Работа транспортной инфраструктуры также требует обязательного качественного и надежного электроснабжения, так как

в состав электроприемников входят освещение автомобильных дорог и стоянок частного и общественного автотранспорта, оборудование регулировки и контроля дорожного движения, зарядные станции для электротранспорта и прочее. При перерывах электроснабжения нормальное функционирование инфраструктуры микрорайонов нарушается, что приводит к выраженным экономическим и социальным негативным последствиям, таким как, например, значительные денежные убытки предприятий и массовое недовольство жителей. Поэтому качественное проектирование СЭС, с привлечением высококлассных специалистов, является обязательным.

Надежная и эффективная система электроснабжения обеспечивает бесперебойное функционирование жилых домов, объектов социальной инфраструктуры, предприятий и организаций, расположенных в МКР. Основными требованиями, предъявляемыми к СЭС микрорайонов, являются:

- надежность и бесперебойность электроснабжения, должно обеспечиваться непрерывное и стабильное электроснабжение всех потребителей;
- энергоэффективность, система должна быть спроектирована таким образом, чтобы минимизировать потери электроэнергии при ее передаче и распределении;
- гибкость и масштабируемость, СЭС должна быть способна адаптироваться к изменениям в структуре и объемах потребления электроэнергии в микрорайоне, а также обеспечивать возможность расширения и модернизации;
- система должна соответствовать современным экологическим стандартам и нормам, минимизируя негативное воздействие на окружающую среду;
- СЭС должна быть спроектирована и эксплуатироваться в соответствии с требованиями безопасности, исключая риски для жизни и здоровья людей.

«На основе проведенного анализа всех исходных данных разрабатывается оптимальная СЭС микрорайона, включающая линии электропередачи, трансформаторные подстанции и другие необходимые элементы.» [7]

«Актуальность темы работы. В городе Хабаровск планируется к постройке новый жилой микрорайон, для которого необходимо спроектировать качественную и надежную систему электроснабжения. Подключение к электрической сети зданий в составе инфраструктуры микрорайона позволит обеспечить питанием электрической энергией санитарно-технические устройства, бытовую технику и электронику, освещение» [4] и другие электроприемники. В целом, электроснабжение микрорайона обеспечит общее нормальное функционирование его инфраструктуры. «Реализация предлагаемой системы электроснабжения и технических решений, монтаж и наладка предлагаемого оборудования позволят ввести новый микрорайон в эксплуатацию, что будет способствовать экономическому и социальному развитию города.» [18]

Объект исследования: микрорайон г. Хабаровск.

Предмет исследования: система электроснабжения микрорайона.

Цель работы: обеспечение надежного и качественного электроснабжения микрорайона.

Задачи работы:

- систематизировать характеристики зданий и инфраструктуры микрорайона, электроприемников;
- определить основные требования к системе электроснабжения;
- рассчитать электрические нагрузки;
- разработать качественную и надежную систему электроснабжения микрорайона;
- выбрать основное электрооборудование СЭС.

1 Краткая характеристика микрорайона, зданий и электрических нагрузок

«Жилой микрорайон – это не только пространство для жизни, но и сложная система, в которой взаимодействуют различные элементы инфраструктуры. Одним из таких важных компонентов, обеспечивающих комфорт и безопасность жителей, являются электроприемники, эти устройства играют ключевую роль в функционировании домов, общественных зданий и инфраструктуры» [9]. СЭС микрорайона представляет собой комплекс устройств, которые распределяют электрическую энергию от внешних источников к различным потребителям. В жилом микрорайоне СЭС обеспечивает надежное и безопасное электроснабжение потребителей, что является основой для функционирования всех современных удобств. Без электричества невозможно представить себе жизнь в городе: освещение, отопление, работа бытовых приборов, интернет и многие другие аспекты повседневной жизни зависят от стабильного электроснабжения. Одной из главных особенностей СЭС является защита электрических цепей от перегрузок и коротких замыканий, это особенно важно в жилых микрорайонах, где большое количество людей использует электроэнергию одновременно. Современные СЭС городов оснащены автоматическими выключателями и защитными устройствами, которые предотвращают аварийные ситуации и обеспечивают безопасность жителей.

В г. Хабаровск планируется к постройке новый жилой микрорайон, для которого необходимо спроектировать качественную и надежную СЭС. Основная часть инфраструктуры представлена многоквартирными жилыми домами этажностью 5-10 этажей. Имеются магазины, детский сад, школа, дом быта, банк, АТС. Для питания МКР будет проложена кабельная линия (КЛ) 10 кВ от подстанции (ПС) энергосистемы 110/10 кВ.

«Генплан микрорайона показан на рисунке 1.

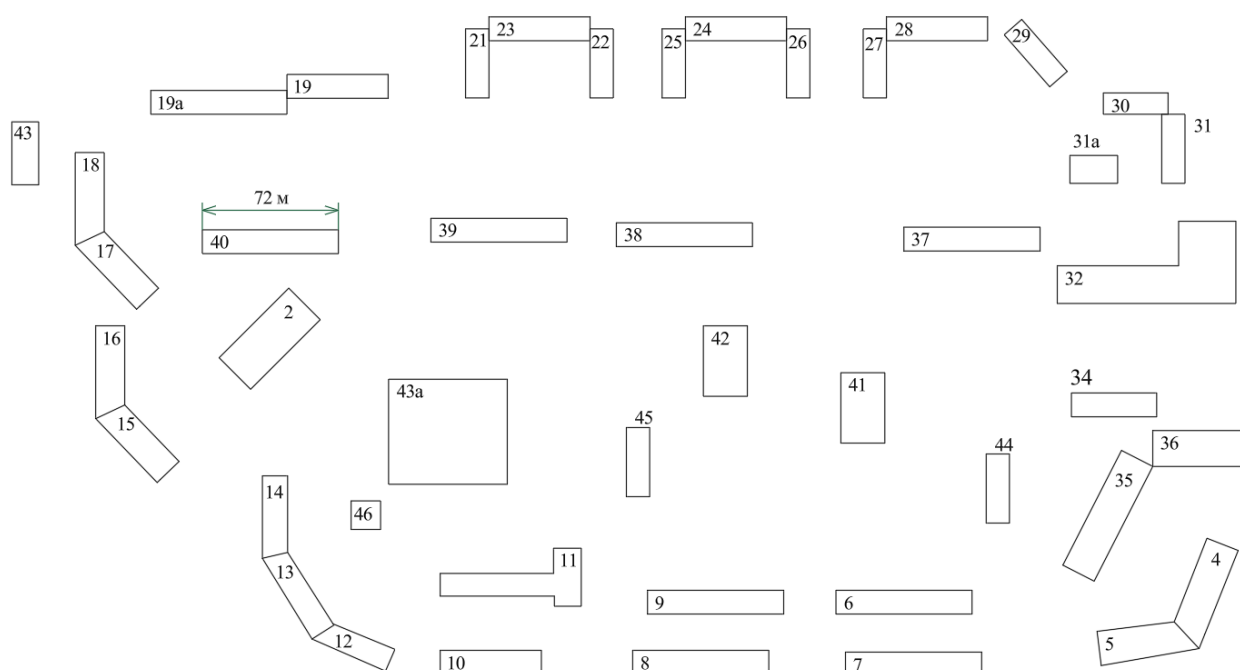


Рисунок 1 – Генеральный план микрорайона

В жилых домах и других объектах обеспечена газификация, в местах приготовления пищи установлены газовые кухонные плиты, что сокращает потребление электрической энергии.

Характеристики зданий приведены в таблице 1» [1].

Таблица 1 – Характеристики зданий

№ на генплане	Здания	Кол-во квартир, вместимость, площадь	Этажность	Катег. надежн. ЭСН
40	жилой дом (ЖД)	150	9	I
19	ЖД	68	5	II
19a				
43		80	10	I
17		50	5	II
18		60		
2	Д/сад	290 мест	2	I
21	ЖД	60	5	II
23		90		
22		52		
39		158	10	I
43a	школа	980 мест	3	I

Продолжение таблицы 1

№ на генплане	Здания	Кол-во квартир, вместимость, площадь	Этажность	Катег. надежн. ЭСН
25	ЖД	58	5	II
24		87		
38		150	10	I
27		60	5	II
28				
29		74	5	II
37		150	10	I
30		42	5	II
31		50		
26		48		
31a	Дом быта	295 кв.м.	2	II
32	ЖД	60	5	II
35		78		
4		50		
5		74		
6		90		
7				
41	Магазин	590 кв.м.	2	II
42	Банк	610 кв.м.	2	I
36	ЖД	56	5	II
34		80		
9		68		
8		74		
44	Магазин	580 кв.м.	2	II
45		590 кв.м.		
11	ЖД	56	5	II
10		60		
12		50		
13				
14		60		
16				
15		50		
46	АТС	115 кв.м.	1	I

Выводы.

Данный микрорайон представляет собой комплекс современных жилых и социально-общественных зданий, объединенных развитой инфраструктурой района. Составлен генеральный план МКР, систематизированы ключевые характеристики зданий.

2 Проектирование системы электроснабжения микрорайона

2.1 Основные требования к системе электроснабжения

В условиях современного города, где электричество стало неотъемлемой частью повседневной жизни, к системе электроснабжения МКР предъявляются высокие требования, одним из ключевых требований к является надежность. Жители должны быть уверены в том, что электричество будет подаваться без перебоев, для этого необходимо предусмотреть резервные источники питания, «которые могут включаться в случае аварийных ситуаций. Безопасность – это еще одно важное требование, система электроснабжения должна быть спроектирована таким образом, чтобы исключить возможность коротких замыканий, перегрузок и других аварийных ситуаций, которые могут угрожать жизни и здоровью людей.» [2] «Для этого используются автоматические выключатели, защитные устройства и системы заземления, также необходимо обеспечить правильную изоляцию проводов и кабелей, чтобы предотвратить поражение электрическим током.» [13] С учетом глобальных тенденций к устойчивому развитию и экономии ресурсов, энергоэффективность становится важным требованием к «системе электроснабжения, это включает в себя использование современных технологий, таких как светодиодное освещение, энергосберегающие приборы и системы управления энергопотреблением» [9]. СЭС должна быть гибкой и способной адаптироваться к изменяющимся условиям [8].

2.2 Определение электрических нагрузок зданий и системы освещения территории

«Расчет силовых нагрузок зданий необходим для дальнейшего выбора числа и мощности трансформаторных подстанций, кабелей схемы

электроснабжения, выбора электрических аппаратов на подстанциях, питающих район. Расчет ведется методом коэффициента спроса. Электрические нагрузки МЖД рассчитываются по удельной мощности на одну квартиру. Нагрузки остальных зданий определяются по удельной мощности на единицу площади или вместимости» [9].

«Активная нагрузка квартир жилого дома:

$$P = P_{уд.кв} \cdot n, \quad (1)$$

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

n – число квартир, шт.

Полная нагрузка складывается из нагрузки квартир и силовых приемников (лифтов, вентиляции, водяных насосов и др.):

$$P_C = k_{с.дв} \cdot \sum_{i=1}^n P_{дв.н} \cdot N_{\varepsilon} \cdot N_{\Pi}, \quad (2)$$

$$P_{р.л.} = k_{с.л.} \cdot \sum_{i=1}^{nl} P_{n.i}, \quad (3)$$

$$P_p = (P + P_{рл} \cdot N_{\Pi} + P_C) \cdot K_p, \quad (4)$$

где $P_{дв.н}$ – расчетные мощности электродвигателей (ЭД), кВт/этаж;

n – число ЭД, шт.;

$k_{с.дв}$ – коэффициент спроса нагрузки;

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

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

P_C – нагрузка силовых электроприемников дома, кВт;

N_{ε} – число этажей, шт.;

N_{Π} – число подъездов, шт.;

K_p – расчетный коэффициент запаса мощности.

Реактивная и полная нагрузка жилого дома:

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

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

где $\operatorname{tg} \varphi$ – нормативный тангенс угла» [9].

1) Расчет для ЖД № 40.

Для 150 квартир, $P_{уд} = 0,81$ кВт/кв [12].

$$P = 0,81 \cdot 150 = 121,5 \text{ кВт.}$$

Электропривод лифтов: $P_{р.л} = 4,5$ кВт.

Нагрузки МЖД:

$$P_{р.л.} = 0,8 \cdot 4 \cdot 4,5 = 14,4 \text{ кВт,}$$

$$P_C = 0,85 \cdot 1,5 \cdot 9 \cdot 4 = 45,9 \text{ кВт,}$$

$$P_p = (121,5 + 14,4 + 45,9) \cdot 1,05 = 190,89 \text{ кВт,}$$

$$Q_p = 190,89 \cdot 0,33 = 62,74 \text{ квар,}$$

$$S_p = \sqrt{190,89^2 + 62,74^2} = 200,94 \text{ кВА.}$$

2) Расчет по вместимости. Для детского сада: $P_{уд.} = 0,46$ кВт/место [12].

Нагрузки:

$$P = 0,46 \cdot 290 = 133,4 \text{ кВт,}$$

$$P_{р.л.} = 0 \text{ кВт,}$$

$$P_C = 0,75 \cdot 1,5 \cdot 2 \cdot 1 = 2,25 \text{ кВт,}$$

$$P_p = (133,4 + 0 + 2,25) \cdot 1,1 = 149,22 \text{ кВт,}$$

$$Q_p = 149,22 \cdot 0,33 = 37,4 \text{ квар},$$

$$S_p = \sqrt{149,22^2 + 37,4^2} = 153,83 \text{ кВА}.$$

3) Расчет по удельной мощности и площади. Для дома быта:
 $P_{уд.} = 0,18 \text{ кВт/м}^2$ [12].

Нагрузки:

$$P = 0,18 \cdot 295 = 53,1 \text{ кВт},$$

$$P_{р.л.} = 0 \text{ кВт},$$

$$P_c = 0,65 \cdot 1,5 \cdot 2 \cdot 2 = 3,9 \text{ кВт},$$

$$P_{р.} = (53,1 + 0 + 3,9) \cdot 1,15 = 65,55 \text{ кВт},$$

$$Q_p = 65,55 \cdot 0,2 = 13,31 \text{ квар},$$

$$S_p = \sqrt{65,55^2 + 13,31^2} = 66,89 \text{ кВА}.$$

Светодиодное освещение (LED) стало настоящей революцией в области освещения, и его применение на территории жилых микрорайонов открывает новые горизонты для улучшения качества жизни горожан [6]. В условиях современного города, где освещение играет ключевую роль в обеспечении безопасности, комфорта и эстетики, использование светодиодов становится не только актуальным, но и необходимым. «Одним из главных преимуществ светодиодного освещения является его высокая энергоэффективность, светодиоды потребляют значительно меньше электроэнергии по сравнению с традиционными лампами накаливания и флуоресцентными лампами» [4]. Это позволяет существенно сократить затраты на электроэнергию для освещения общественных пространств, таких как парки, улицы и дворы, в условиях растущих цен на энергоносители и необходимости экономии ресурсов, переход на светодиоды становится экономически оправданным решением для муниципалитетов и управляющих

компаний. Светодиоды имеют значительно больший срок службы – до 50000 часов, что в несколько раз превышает срок службы традиционных источников света, это означает, что замена ламп и обслуживание освещения требуют гораздо меньших затрат и усилий [5].

«Расчет осветительной нагрузки территории выполняется по удельной мощности на единицу площади. Требуемая мощность освещения:

$$P_{po} = P_{уд.о} \cdot F \cdot 10^{-3}, \quad (7)$$

где $P_{уд.о}$ – удельная нагрузка для светодиодного освещения территории,

Вт/м²;

F – площадь территории, м².

$$P_{po} = 0,1 \cdot 132454 \cdot 10^{-3} = 13,25 \text{ кВт}$$

В системе освещения используем светодиодные модули уличного освещения 3×SVT-96W.

Требуемое число светильников:

$$N = \frac{P_{po}}{P_{св}}, \quad (8)$$

где $P_{св}$ – паспортная мощность светильника, кВт.

$$N = \frac{13,25}{0,288} \approx 46 \text{ шт.}$$

В системе освещения используем 46 светодиодных модулей уличного освещения 3×SVT-96W, установленных на опорах ОГКл-9» [3].

Результаты расчетов нагрузок сведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчетов нагрузок

№ здания	Наименование	tgφ	P, кВт	Pл, кВт	Pс, кВт	Pp, кВт	Qp, квар	Sp, кВА
40	жилой дом (ЖД)	0,33	121,50	14,40	45,90	190,89	62,74	200,94
19	ЖД	0,29	69,36	0	19,13	92,91	27,10	96,78
19а		0,29	69,36	0	19,13	92,91	27,10	96,78
43		0,33	75,20	10,80	38,25	130,46	42,88	137,33
17		0,29	56,50	0	19,13	79,41	23,16	82,71
18		0,29	63,00	0	25,50	92,93	27,10	96,80
2	Д/сад	0,25	133,40	0	2,25	149,22	37,40	153,83
21	ЖД	0,29	63,00	0	19,13	86,23	25,15	89,82
23		0,29	79,20	0	19,13	103,24	30,11	107,54
22		0,29	58,76	0	19,13	81,78	23,85	85,19
39		0,33	126,40	18,00	63,75	218,56	71,84	230,06
43а	школа	0,20	245,00	0	3,38	273,21	55,48	278,79
25	ЖД	0,29	61,48	0	19,13	84,64	24,69	88,16
24		0,29	76,56	0	19,13	100,47	29,30	104,66
38		0,33	121,50	14,40	51,00	196,25	64,50	206,57
27		0,29	63,00	0	19,13	86,23	25,15	89,82
28		0,29	63,00	0	19,13	86,23	25,15	89,82
29		0,29	71,04	0	19,13	94,67	27,61	98,62
37		0,33	121,50	14,40	51,00	196,25	64,50	206,57
30		0,29	49,98	0	12,75	65,87	19,21	68,61
31		0,29	56,50	0	19,13	79,41	23,16	82,71
26		0,29	54,72	0	19,13	77,54	22,62	80,77
31а	Дом быта	0,20	53,10	0	3,90	65,55	13,31	66,89
32	ЖД	0,29	63,00	0	19,13	86,23	25,15	89,82
35	ЖД	0,29	73,32	0	19,13	97,07	28,31	101,11
4		0,29	56,50	0	19,13	79,41	23,16	82,71
5		0,29	71,04	0	19,13	94,67	27,61	98,62
6		0,29	79,20	0	19,13	103,24	30,11	107,54
7		0,29	79,20	0	19,13	103,24	30,11	107,54
41	Магазин	0,25	147,50	0	3,90	174,11	43,64	179,49

Продолжение таблицы 2

№ здания	Наименование	tgφ	P, кВт	Pл, кВт	Pс, кВт	Pp, кВт	Qp, квар	Sp, кВА
36	ЖД	0,29	59,92	0	19,13	83,00	24,21	86,46
34		0,29	75,20	0	19,13	99,04	28,89	103,17
9		0,29	69,36	0	19,13	92,91	27,10	96,78
8		0,29	71,04	0	19,13	94,67	27,61	98,62
44	Магазин	0,20	145,00	0	3,90	171,24	34,77	174,73
45		0,20	147,50	0	3,90	174,11	35,35	177,66
11	ЖД	0,29	59,92	0	19,13	83,00	24,21	86,46
10		0,29	63,00	0	19,13	86,23	25,15	89,82
12		0,29	56,50	0	19,13	79,41	23,16	82,71
13		0,29	56,50	0	19,13	79,41	23,16	82,71
14		0,29	63,00	0	19,13	86,23	25,15	89,82
16		0,29	63,00	0	19,13	86,23	25,15	89,82
15		0,29	56,50	0	19,13	79,41	23,16	82,71
46	АТС	0,25	13,80	0	0,98	16,99	4,26	17,52
Итого без освещ. территории						4931,93	1404,23	5127,94
Территория, освещение						13,25	4,37	13,95
Итого						4945,17	1408,60	5141,88

Электрические нагрузки будут распределены по трансформаторным подстанциям (ТП) 10/0,4 кВ.

2.3 Выбор числа и мощности силовых трансформаторов, типа и марок подстанций

Электроснабжение жилых микрорайонов – это сложный и многогранный процесс, который требует тщательного планирования и проектирования. «Одним из ключевых элементов этой системы являются трансформаторы подстанций, которые обеспечивают преобразование электрической энергии и распределение ее между потребителями,

правильный выбор числа и мощности трансформаторов имеет решающее значение для надежности, эффективности и безопасности электроснабжения» [9]. На основе оценки потребностей в электроэнергии производится расчет необходимой мощности трансформаторов, которая должна быть достаточной для обеспечения всех потребителей в пиковые нагрузки, а также учитывать резерв для будущего роста. Обычно рекомендуется выбирать трансформаторы с запасом мощности, чтобы избежать перегрузок и обеспечить надежность электроснабжения, важно также учитывать коэффициент нагрузки, который может варьироваться в зависимости от времени суток и сезона [13]. Выбор числа трансформаторов зависит от нескольких факторов, включая общую мощность, требования к надежности, а также экономические соображения. Часто применяют ТП с двумя трансформаторами, что позволяет обеспечить резервирование и повысить надежность системы, в случае выхода из строя одного трансформатора, второй может продолжать обеспечивать электроснабжение.

«Будут установлены комплектные подстанции 2КТПН-10/0,4, компоновка показана на рисунке 2.

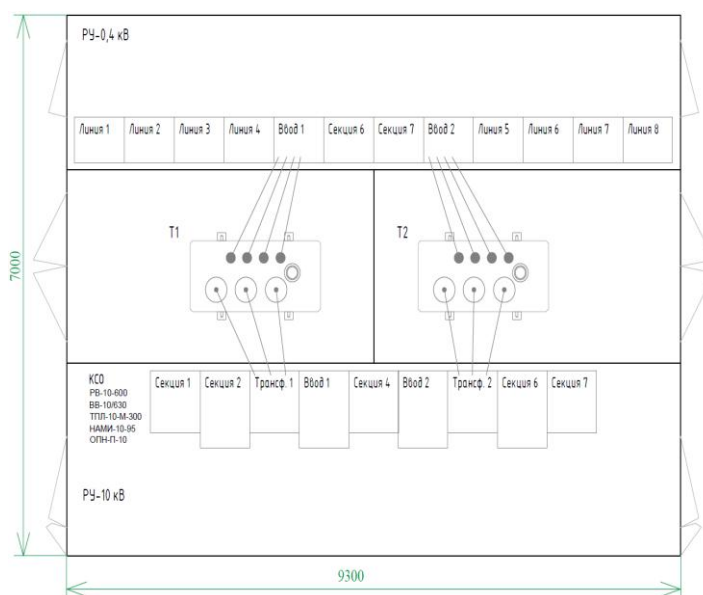


Рисунок 2 – Компоновка подстанции

Оптимальная мощность силовых трансформаторов:

$$S_0 = \frac{S_p}{\beta \cdot N}, \quad (9)$$

где β – нормативный коэффициент загрузки;

N – число трансформаторов, шт;

S_p – нагрузка, кВА.

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

$$Q_1 = \sqrt{(N \cdot \beta \cdot S_{н.т.})^2 - P_p^2}, \quad (10)$$

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

P_p – нагрузка, кВт.

Требуемая для компенсации со стороны 0,4 кВ РМ:

$$Q_{0,4} = Q_p - Q_1 \quad (11)$$

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 РМ согласно выражению» [14]:

$$Q_{HH} = Q_p - Q_{БК} \quad (12)$$

Для ТП-1 нагрузки, с учетом зоны охвата: 828,72 кВт; 247,48 квар; 864,88 кВА, по (9-11).

$$S_o = \frac{864,88}{0,7 \cdot 2} = 618 \text{ кВА.}$$

«Будет установлена КТПН с энергоэффективными трансформаторами ТМГ12-630/10.

$$Q_1 = \sqrt{(2 \cdot 0,7 \cdot 630)^2 - 828,72^2} = 301,91 \text{ квар,}$$

$$Q_{0,4} = 247,48 - 301,91 = -54 \text{ квар} < 0.$$

КРМ не требуется.

Коэффициент загрузки трансформатора в послеаварийном режиме:

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

$$K_n = \frac{864,88}{630} = 1,37 \leq 1,4.$$

Послеаварийная перегрузка менее допустимой 40 %» [15].

Выбранные подстанции 2КТПН-10/0,4 штатно укомплектованы оборудованием АСКУЭ от АО «Концерн Энергомера» [19].

Для всех ТП расчеты – в таблице 3.

Таблица 3 – Выбор трансформаторов

№ ТП	Зона охвата нагр., № зданий	So, кВА	S.т, кВА (ТМГ12)	Qк , квар	Кп
214	40,19,19а,43,17,18,2	618	630	-54	1,37
207	21,22,23,24,25,39,43а	702	1000	-770	0,98
273	26,27,28,29,30,31,32,37,38,31а	771	1000	-633	1,08
283	4,5,6,7,8,9,34,35,36,41,42,44	1001	1250	-737	1,12
213	10-16,45,46	571	630	-220	1,27

«Одним из главных достоинств трансформаторов серии ТМГ12 является их высокая энергоэффективность, они разработаны с использованием современных технологий и материалов, что позволяет значительно снизить потери энергии в процессе трансформации» [16]. По сравнению с традиционными трансформаторами, ТМГ12 демонстрируют более низкие уровни потерь как в режиме нагрузки, так и в режиме холостого хода, это приводит к снижению затрат на электроэнергию и уменьшению углеродного следа, что особенно важно в условиях глобальных изменений климата. Трансформаторы отличаются компактными размерами и относительно небольшим весом, что делает их удобными для установки в ограниченных пространствах, характерных для городских микрорайонов. Это позволяет оптимизировать использование территории подстанций и снижает затраты на строительство и монтаж, компактность также упрощает процесс обслуживания и ремонта, что является важным аспектом для управляющих компаний. Энергосберегающие трансформаторы обладают высокой надежностью и долговечностью, они изготовлены из качественных материалов, что обеспечивает их устойчивость к внешним воздействиям и длительный срок службы, это особенно важно для подстанций, которые должны обеспечивать бесперебойное электроснабжение.

«Активные и реактивные потери мощности в трансформаторах:

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

где ΔP_κ – потери КЗ, кВт;

n – число трансформаторов, шт;

S_m – номинальная мощность, кВА;

ΔP_{xx} – потери ХХ, кВт.

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

где U_κ – напряжение КЗ, %;

I_{xx} – ток XX, %.

Для ТП-1:

$$\Delta P_m = 6,75 / 2 \cdot [(828,7^2 + 247,5^2) / 0,63^2] + 2 \cdot 0,8 = 7,96 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_m = (5,5 / 2 \cdot 100) \cdot [(828,7^2 + 247,5^2) / 0,63] + (2 \cdot 0,7 \cdot 0,63) / 100 = 41,47 \text{ квар}.$$

Расчеты сведены в таблице 4» [9].

Таблица 4 – Потери мощности в ТП и итоговые нагрузки района

Подстанции, №	ΔP , кВт	ΔQ , квар	$P_p + \Delta P$, кВт	$Q_p + \Delta Q$, квар	S'_p , кВА
214	7,96	41,47	836,68	288,95	885,17
207	7,28	38,59	955,40	299,00	1001,10
273	8,32	44,06	1042,54	354,43	1101,14
283	11,19	59,65	1361,04	436,86	1429,44
213	7,03	36,67	778,04	245,42	815,83
Всего	41,8	220,44	5372,03	1641,62	5617,26

Далее выбираются кабели сети 10 кВ.

2.4 Расчет высоковольтной сети, выбор кабелей

Для питания МКР будет проложена КЛ 10 кВ от подстанции 110/10 кВ энергосистемы до главного распределительного пункта (ГРП), расположенного на территории МКР, от которого будут питаться ТП-10/0,4 кВ микрорайона.

Электроснабжение выполняется по смешанной схеме как оптимальной по надежности и экономическим затратам [18]. На рисунке 3 представлена структурная схема электроснабжения микрорайона.

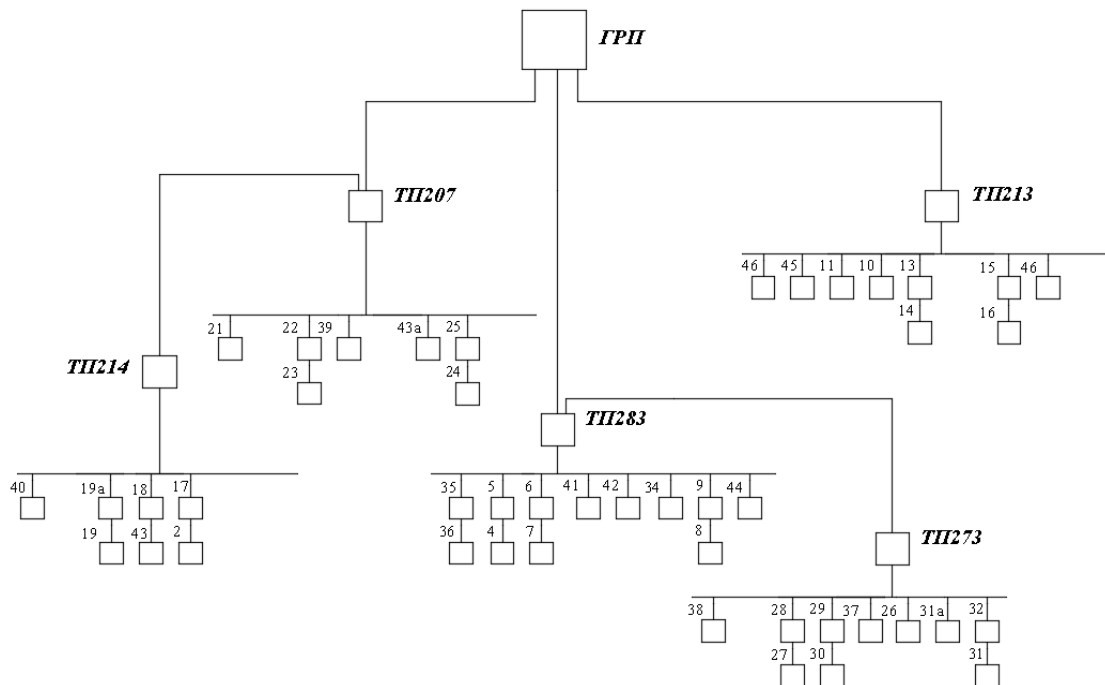


Рисунок 3 – Структурная схема электроснабжения микрорайона

Расчет КЛ 10 кВ до ГРП.

«Расчетный рабочий ток питающей линии:

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

где n – число цепей, шт.

$$I_p = 5617,26 / (\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 2) = 162,2 \text{ А.}$$

Аварийный ток:

$$I_{ag} = 5617,26 / (\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 1) = 324,3 \text{ А.}$$

Экономическое сечение жил:

$$F_{\text{эк}} = I_p / j_{\text{эк}}, \quad (17)$$

где $j_{\text{эк}}$ – экономическая плотность тока, А/мм².

$$F_{\text{эк}} = 162,2 / 1,7 = 95 \text{ мм}^2.$$

С поправкой на аварийный ток выбирается кабель АПвП-3×185, $I_{\text{дон}} = 360 \text{ А}$ » [9].

$$I_{\text{ав}} = 324,3 \text{ А} < I_{\text{дон}} = 360 \text{ А}.$$

Кабели марки АПвП представляют собой современное решение для передачи и распределения электрической энергии, сочетающее в себе инновационные технологии и высокую надежность. Конструкция продумана до мелочей, в основе лежит алюминиевая многопроволочная жила, которая обеспечивает хорошую проводимость тока, «изоляция выполнена из сшитого полиэтилена, что гарантирует долговечность и устойчивость к внешним воздействиям. Особое внимание уделено экранированию: как по токопроводящей жиле, так и по изоляции используются экструдированные электропроводящие слои из сшитого полиэтилена, важным преимуществом является возможность прокладки в земле независимо от степени коррозионной активности грунтов, а также на трассах без ограничения разности уровней» [3]. Технические параметры впечатляют своей надежностью, эксплуатационные температуры варьируются от -60°C до +50°C, что позволяет использовать кабель в различных климатических условиях. Прокладка возможна даже при температуре -20°C без предварительного подогрева, минимальный радиус изгиба при монтаже составляет 15 диаметров кабеля, что обеспечивает

удобство при прокладке. Срок службы составляет 30 лет, что говорит о высокой надежности и долговечности.

«Потери напряжения в линии:

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

где I_p – расчетный ток линии, А;

L – длина линии, км;

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

$\cos \varphi$ – средневзвешенный коэффициент мощности нагрузки.

$$\Delta U_{\text{л}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 324,3 \cdot 1,3 \cdot 100}{10000} (0,167 \cdot 0,956 + 0,077 \cdot 0,341) = 0,67 \% \leq 5 \%$$

Потери не превышают допустимые 5%» [9].

Результаты выбора кабелей – в таблице 5.

Таблица 5 – Выбор кабелей сети 10 кВ

Участок	См, кВА	Ip, А	Iав, А	Фэк, мм ²	Фст, мм ² (АПВП)	Idоп, А	ΔU, %
до ГРП	5617,3	162,2	324,3	95	240	355	0,67
ГРП-ТП-207	1886,3	54,5	108,9	32	35	115	0,24
ТП-207-ТП-214	885,2	25,6	51,1	15	16	75	0,54
ГРП-ТП-283	2530,6	73,1	146,1	43	70	165	0,16
ТП-283-ТП-273	1101,1	31,8	63,6	19	16	75	0,67
ГРП-ТП-213	815,8	23,6	47,1	14	16	75	0,50

Кабели подходят по всем условиям.

2.5 Расчет низковольтной сети, выбор кабелей

Вводные распределительные пункты (РП) зданий будут питаться по КЛ 0,4 кВ, выполненным кабелем марки АВБШв, режим нейтрали сети – с глухозаземленной нейтралью [20].

«Расчет для КЛ до здания №40. Расчетный ток КЛ, по (14):

$$I_{\max} = 200,9 / (\sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 1) = 290,0 \text{ А.}$$

Принимается кабель АВБШв 4×150, $I_{\text{доп}} = 335 \text{ А.}$

Индуктивным сопротивлением для сети 0,4 кВ можно пренебречь. Потери напряжения в КЛ, по (18):

$$\Delta U_{\text{л}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 200,9 \cdot 0,03 \cdot 100}{400} (0,21 \cdot 0,95 + 0 \cdot 0,308) = 0,02 \% < 5 \%$$

Выбор кабелей сведен в таблице 6» [1].

Таблица 6 – Выбор кабелей низковольтной сети

Участок, КЛ до (№ здания)	$I_{\text{ав}}, \text{ А}$	$F_{\text{ст}}, \text{ мм}^2$ (АВБШв)	$I_{\text{доп}}, \text{ А}$	$\Delta U, \%$
40	290,0	150	335	0,02
19	139,7	35	145	0,04
19а	279,4	120	290	0,03
43	198,2	70	220	0,04
17	341,4	185	370	0,01
18	337,9	185	370	0,01
2	222,0	95	260	0,26
21	129,7	35	145	0,41
23	155,2	50	180	0,07
22	278,2	120	290	0,07
39	332,1	150	335	0,12
43а	402,4	240	440	0,05
25	278,3	120	290	0,05
24	151,1	50	180	0,09

Продолжение таблицы 6

Участок, КЛ до (№ здания)	I _{ав} , А	F _{ст} , мм ² (АВБШВ)	I _{доп} , А	ΔU, %
38	298,2	150	335	0,04
27	129,7	35	145	0,28
28	259,3	95	260	0,05
29	241,4	95	260	0,07
37	298,2	150	335	0,06
30	99,0	25	125	0,13
31	119,4	25	125	0,88
26	116,6	25	125	0,12
31а	96,5	25	125	0,42
32	249,0	95	260	0,05
35	270,7	120	290	0,09
4	119,4	25	125	0,26
5	261,7	120	290	0,05
6	310,4	150	335	0,09
7	155,2	50	180	0,06
41	259,1	95	260	0,06
42	238,9	95	260	0,02
36	124,8	35	145	0,64
34	148,9	50	180	0,14
9	282,0	120	290	0,03
8	142,3	35	145	0,18
44	252,2	95	260	0,14
45	256,4	95	260	0,17
11	124,8	25	125	0,69
10	129,7	35	145	1,71
12	119,4	25	125	0,88
13	249,0	95	260	0,04
14	129,7	35	145	0,78
16	129,7	35	145	0,35
15	249,0	95	260	0,04
46	25,3	16	90	0,26

Далее определяются токи короткого замыкания (КЗ).

2.6 Определение токов короткого замыкания, проверка термической стойкости кабелей

Токи короткого замыкания являются одним из важнейших параметров при проектировании и эксплуатации электрических сетей, особенно

актуальным этот вопрос становится при организации электроснабжения микрорайонов, где требуется обеспечить надежную и безопасную работу всей системы. Методика расчета токов короткого замыкания позволяет определить значение периодической составляющей полного тока для начального момента времени, это значение является определяющим при выборе электрооборудования СЭС. При расчете токов КЗ в сетях микрорайона учитываются следующие основные допущения: отсутствие качаний в электрической системе, упрощение переходных процессов и учет только основных элементов схемы. Схема замещения создается путем замены всех элементов их электрическими сопротивлениями, при расчете токов КЗ особое внимание уделяется точкам короткого замыкания (сборные шины, начало/середина/конец линий), учету питания от энергосистемы, приведению сопротивлений к одному уровню напряжения и распределению токов по ветвям схемы. Специфика расчета для сетей микрорайона заключается в большем количестве расчетных точек, необходимости учета различных уровней напряжения, важности правильного выбора расчетных режимов и учете особенностей прокладки кабельных линий.

«Полное сопротивление цепи:

$$z = \sqrt{\Sigma r^2 + \Sigma x^2}, \quad (18)$$

где Σr , Σx – активное и индуктивное сопротивление цепи, Ом.

Приведенное сопротивление участков:

$$x^o = x \cdot \left(\frac{U_{\delta}}{U_n} \right)^2, \quad (19)$$

где x – действительное сопротивление участка, Ом;

U_{δ} – базисное напряжение, кВ;

U_n – номинальное напряжение, кВ.

Для трансформатора:

$$x_m^o = \frac{U_{\kappa} \%}{100} \cdot \frac{U_{\delta}^2}{S_{nm}}, \quad (20)$$

Приведенное сопротивление электрических линий:

$$x_l^o = x_0 \cdot l \cdot \left(\frac{U_{\delta}}{U_n} \right)^2, \quad (21)$$

где x_0 – удельное сопротивление, Ом/км;

l – длина линии, км.

Периодическая слагающая трехфазного тока КЗ» [11]:

$$I_{\kappa 3}^{(3)} = \frac{U_{\delta}}{\sqrt{3z}}, \quad (22)$$

«Ударный ток КЗ:

$$I_y = \sqrt{2} \cdot \kappa_y \cdot I_{\kappa 3}^{(3)}, \quad (23)$$

$$\kappa_y = 1 + e^{\frac{0,01}{T_a}}, \quad (24)$$

$$T_a = \sum R / 314 \cdot \sum X, \quad (25)$$

где κ_y – ударный коэффициент;

T_a – постоянная затухания апериодической слагающей тока.

Токи двухфазного и однофазного КЗ:

$$I_{\kappa 3}^{(2)} = I_{\kappa 3}^{(3)} \cdot \sqrt{3} / 2, \quad (26)$$

$$I_{K3}^{(1)} = 0,55 \cdot I_{K3}^{(3)}, \quad (27)$$

Переходное сопротивление в местах присоединения низковольтных проводов учитывается добавкой активного сопротивления 15 мОм и индуктивного 5 мОм» [11]. Схема замещения сети показана на рисунке 4.

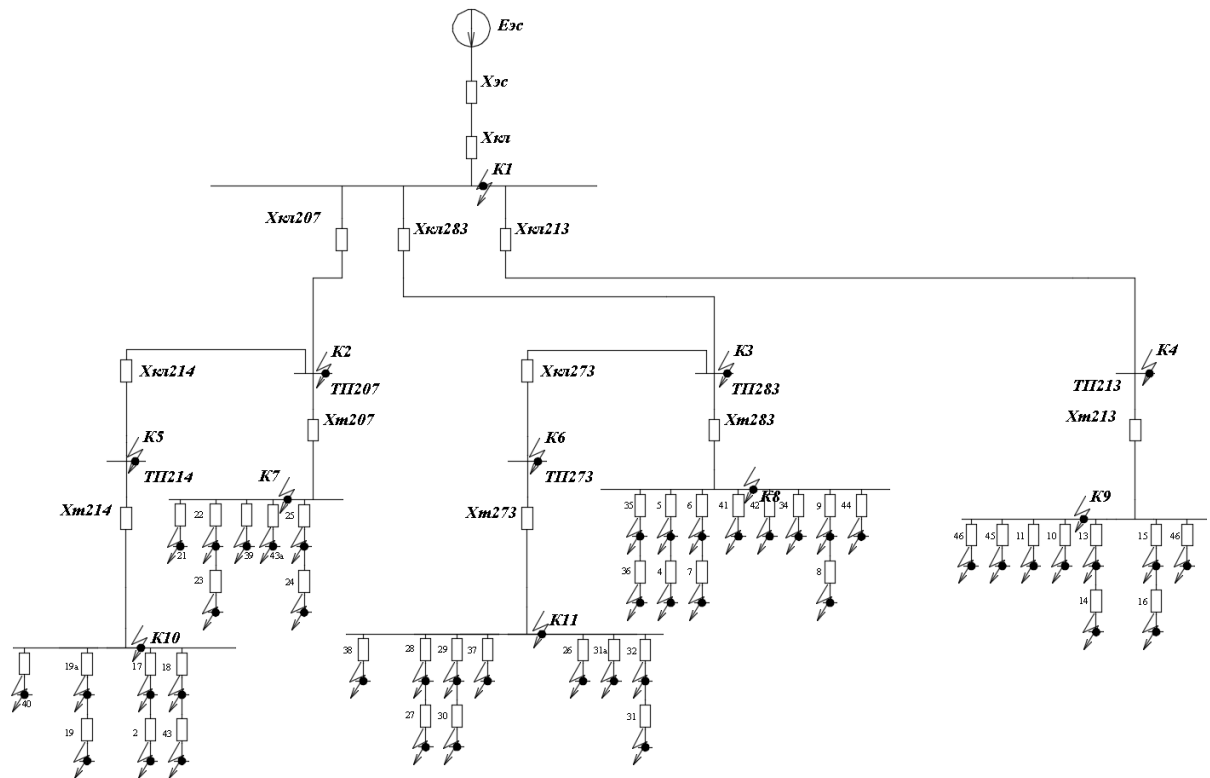


Рисунок 4 – Схема замещения сети

Расчет для точки К1 (шины 10 кВ ГРП).

«Сопротивление энергосистемы:

$$X_C = \frac{U_6}{\sqrt{3} \cdot I_{K.ЭС}}, \quad (28)$$

где $I_{K.ЭС}$ – трехфазный ток КЗ на питающем фидере 10 кВ, кА.

$$X_c = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 2,154} = 2814 \text{ мОм.}$$

Сопротивления КЛ 10 кВ с учетом переходных сопротивлений контактов:

$$R_{KL10} = 109 + 15 = 124 \text{ мОм,}$$

$$X_{KL10} = 50 + 5 = 55 \text{ мОм.}$$

С учетом сопротивлений КЛ 10 кВ и энергосистемы, эквивалентные сопротивления цепи:

$$R_{\Sigma} = 109 + 15 = 124 \text{ мОм,}$$

$$X_{\Sigma} = 2814 + 50 + 5 = 2870 \text{ мОм,}$$

$$z = \sqrt{124^2 + 2870^2} = 2872 \text{ мОм.}$$

Расчет токов КЗ, по (20–25):

$$I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{10500}{\sqrt{3} \cdot 2872} = 2,111 \text{ кА;}$$

$$T_a = 2870 / (314 \cdot 124) = 0,074;$$

$$k_y = 1 + e^{\frac{0,01}{0,074}} = 1,71;$$

$$I_y = \sqrt{2} \cdot 1,71 \cdot 2,111 = 5,104 \text{ кА;}$$

$$I_{\text{кз}}^{(2)} = 2,111 \cdot \sqrt{3} / 2 = 1,828 \text{ кА;}$$

$$I_{\text{кз}}^{(1)} = 0,55 \cdot 2,111 = 1,161 \text{ кА.}$$

Результаты расчетов сведены в таблице 7» [11].

Таблица 7 – Результаты расчетов токов КЗ

Точка КЗ	$I^{(3)}_{\text{КЗ}}, \text{кА}$	$I_y, \text{кА}$	$I^{(2)}_{\text{КЗ}}, \text{кА}$	$I^{(1)}_{\text{КЗ}}, \text{кА}$
К1	2,111	5,104	1,828	1,161
К2	2,047	4,950	1,773	1,126
К3	2,069	5,002	1,791	1,138
К4	2,090	5,053	1,810	1,149
К5	1,986	4,802	1,720	1,092
К6	2,027	4,901	1,756	1,115
К7	1,454	3,515	1,259	0,800
К8	1,551	3,751	1,343	0,853
К9	1,463	3,537	1,267	0,805
К10	1,152	2,785	0,998	0,634
К11	1,115	2,696	0,966	0,613

«Минимальное термически стойкое сечение жил кабелей:

$$F_T = I_K^{(3)} \cdot \sqrt{t_3} / K_T, \quad (29)$$

где t_3 – время срабатывания защиты, с;

K_T – температурный коэффициент.

Для сети 10 кВ:

$$F_T = 2111 \cdot \sqrt{0,025} / 95 = 3,5 \text{ мм}^2,$$

Для сети 0,4 кВ:

$$F_T = 1551 \cdot \sqrt{0,01} / 95 = 1,6 \text{ мм}^2.$$

Все выбранные кабели термически устойчивы» [15].

Далее проводится выбор устройств защиты и автоматики СЭС.

2.7 Выбор устройств защиты и автоматики

Автоматический выключатель (АВ) – это устройство, предназначенное для автоматического отключения электрической цепи при возникновении аварийных ситуаций, таких как короткое замыкание или перегрузка, в электрических сетях микрорайонов АВ играют важную роль, обеспечивая безопасность и надежность электроснабжения жителей и объектов инфраструктуры. Автоматический выключатель состоит из нескольких основных компонентов:

- контактная система, включает подвижные и неподвижные контакты, которые обеспечивают прохождение тока в нормальном режиме и разрыв цепи при срабатывании;
- привод, управляющий положением контактов, содержащий пружины и рычаги;
- термочувствительный элемент, обычно представлен биметаллической пластиной, которая деформируется при нагреве и приводит к размыканию контактов;
- электромагнитный расцепитель, «срабатывающий при резком увеличении тока и мгновенно разрывающий цепь;
- корпус.

Автоматический выключатель выполняет несколько важных функций:

- при превышении допустимого тока контакты размыкаются, предотвращая перегрев и повреждение оборудования;
- при возникновении короткого замыкания электромагнитный расцепитель мгновенно разрывает цепь, предотвращая повреждения и пожары;

- отключение поврежденного участка предотвращает распространение аварии на остальные части сети» [17].

«Для защиты линий распределительной сети 0,4 кВ требуется выбрать автоматические выключатели, условия выбора:

- по напряжению:

$$U_{ном} \geq U_c, \quad (30)$$

- отстройка уставки теплового расцепителя:

$$I_{т.р.} > 1,1 \cdot I_p, \quad (31)$$

АВ для защиты КЛ к зданию №1 выбирается марки ВА-52-39/320.

Проверка по (28-31):

$$U_{ном} = 400 \geq 400 \text{ В},$$

$$1,1 \cdot 290,0 = 319 \text{ А},$$

$$I_{т.р.} = 320 > 319 \text{ А},$$

Выбор АВ сведен в таблице 8» [17].

Таблица 8 – Выбор автоматических выключателей

Фидер, № здания	I_p , А	$1,1 \cdot I_p$, А	Марка авт. выкл.	I_n , А
40	290,0	319,0	ВА-52-39	320
19	139,7	153,7		160
19а	279,4	307,3		320
43	198,2	218,0		250
17	341,4	375,6		400
18	337,9	371,7		400
2	222,0	244,2		250
21	129,7	142,6		160

Продолжение таблицы 8

Фидер, № здания	I_p , А	$1,1 \cdot I_p$, А	Марка авт. выкл.	I_n , А
23	155,2	170,7	ВА-52-39	250
22	278,2	306,0		320
39	332,1	365,3		400
43a	402,4	442,6		500
25	278,3	306,1		320
24	151,1	166,2		250
38	298,2	328,0		400
27	129,7	142,6		160
28	259,3	285,2		320
29	241,4	265,5		320
37	298,2	328,0		320
30	99,0	108,9		160
31	119,4	131,3		160
26	116,6	128,2		160
31a	96,5	106,2		160
32	249,0	273,9		320
35	270,7	297,8		320
4	119,4	131,3		160
5	261,7	287,9		320
6	310,4	341,5		400
7	155,2	170,7		250
41	259,1	285,0		320
42	238,9	262,8		320
36	124,8	137,3		160
34	148,9	163,8		250
9	282,0	310,2		320
8	142,3	156,6		160
44	252,2	277,4		320
45	256,4	282,1		320
11	124,8	137,3		160
10	129,7	142,6		160
12	119,4	131,3		160
13	249,0	273,9		320
14	129,7	142,6		160
16	129,7	142,6		160
15	249,0	273,9		320
46	25,3	27,8	ВА-51-35	32

На питающем фидере 10 кВ будут установлены комплекты релейной защиты на микропроцессорных терминалах. Релейная защита и автоматика (РЗА) – это комплекс устройств и систем, предназначенных для автоматического обнаружения и устранения аварийных ситуаций в

электрической сети микрорайона, РЗА обеспечивает безопасность и надежность электроснабжения, минимизирует последствия аварий и восстанавливает нормальную работу сети после аварийных ситуаций.

Релейная защита и автоматика выполняют несколько ключевых функций:

- автоматическое выявление коротких замыканий, перегрузок и других аварийных состояний;
- быстрые действия по отключению аварийных участков сети для предотвращения распространения повреждений;
- возвращение сети в нормальный режим работы после устранения аварийной ситуации;
- предотвращение повреждений трансформаторов, кабелей и другого оборудования.

РЗА включают несколько основных компонентов:

- чувствительные устройства, реагирующие на изменения параметров сети (ток, напряжение, частота);
- выключатели и другие устройства, исполняющие команды реле;
- центры обработки информации, объединяющие сигналы от реле и управляющие исполнительными органами;
- линии связи, связывающие отдельные элементы РЗА в единую систему.

Установленные современные микропроцессорные терминалы РЗА будут эффективно обеспечивать следующие «виды защиты электрической сети:

- токовая отсечка;
- максимальная токовая защита;
- от перегрузки;
- от замыканий на землю» [2].

«Микропроцессорные терминалы Сириус-2МЛ-02 обеспечат защиту питающей линии 10 кВ, внешний вид терминала показан на рисунке 5.



Рисунок 5 – Терминал Сириус-2МЛ-02

Определяются уставки защит.

Токовая отсечка (ТО):

$$I_{C3} \geq K_{отс} \cdot I_{НОМ.Л} , \quad (32)$$

где $K_{отс}$ – коэффициент отстройки;

$I_{НОМ.Л}$ – номинальный ток линии, кА» [2].

$$I_{C3} \geq 5 \cdot 0,162 = 0,81 \text{ кА.}$$

«МТЗ:

$$I_{C3} \geq \frac{K_H \cdot K_{C3}}{K_B} \cdot I_{р.макс} , \quad (33)$$

где $I_{р.макс}$ – расчетный ток КЛ, А.

$$I_{C3} \geq \frac{1,1 \cdot 1,18}{0,935} \cdot 324,3 = 450,13 \text{ А.}$$

Ток срабатывания реле:

$$I_{CP} = I_{C3} \cdot \frac{k_{cx}}{n_T}, \quad (34)$$

где k_{cx} , n_T – коэффициенты схемы подключения и трансформации ТТ.

Коэффициент чувствительности защиты» [7]:

$$k_u = \frac{I_K^{(2)}}{I_{C3}}, \quad (35)$$

$$I_{CP} = 450,13 \cdot \frac{1}{400 / 5} = 5,63 \text{ А,}$$

$$k_u = \frac{1161}{450,13} = 2,58 \geq 1,5.$$

«Защита от замыканий на землю (ЗНЗ).

Ток срабатывания:

$$I_{C.3.} \geq k_{отс} \cdot k_B \cdot I_C, \quad (36)$$

где $k_{отс}$ – коэффициент отстройки;

k_B – коэффициент броска ёмкостного тока;

I_C – ёмкостный ток присоединения, А.

$$I_C = I_{CO} \cdot L, \quad (37)$$

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

L – длина линии, км» [7].

$$I_C = 1,47 \cdot 1,3 = 1,911 \text{ А},$$

$$I_{C.з.} \geq 1,2 \cdot 2,5 \cdot 1,911 = 5,733 \text{ А}.$$

«АВР на шинах 0,4 кВ ТП выполняется на микропроцессорном терминале Сириус-АВР, лицевая панель терминала показана на рисунке 6.



Рисунок 6 – Терминал Сириус-АВР, лицевая панель

Уставка минимального напряжения:

$$U_{C.P} = 0,7 \cdot U_{НОМ}, \quad (38)$$

где $U_{НОМ}$ – напряжение сети, В.

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

Уставка срабатывания реле контроля напряжения на другой секции шин:

$$U_{C.P} = (0,6 \div 0,65) \cdot U_{НОМ}, \quad (39)$$

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

Уставка реле времени:

$$t_{C.P.ABP} = t_1 + \Delta t, \quad (40)$$

где t_1 – время отключения, с;

Δt – степень селективности, с» [7].

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

«Микропроцессорная релейная защита и автоматика (МПРЗ) – это современный подход к защите и управлению электроэнергетическими объектами, основанный на применении микропроцессоров и цифровых технологий» [2]. В отличие от традиционных электромеханических и статических систем, МПРЗ обеспечивает высокую точность, надежность и многофункциональность, что позволяет существенно повысить эффективность работы энергосистем. Микропроцессорная релейная защита использует цифровые алгоритмы и высокоточные сенсоры, что позволяет с высокой точностью измерять и анализировать параметры сети, это значительно снижает вероятность ложных срабатываний и повышает общую надежность системы. Традиционные электромеханические и статические реле выполняют ограниченное количество функций. В свою очередь, каждая единица микропроцессорного реле может совмещать в себе функции нескольких традиционных реле, выполняя задачи защиты, измерения, сигнализации, мониторинга и диагностики, это «значительно упрощает проектирование и эксплуатацию, снижает затраты на оборудование и обслуживание. Каждое устройство МПРЗ оснащено удобным интерфейсом, позволяющим детально настроить его под конкретные условия эксплуатации, настройки сохраняются в памяти устройства, что исключает необходимость постоянных проверок и ручной настройки» [2].

2.8 Расчет заземляющего устройства подстанций

«Заземляющее устройство (ЗУ) подстанций предназначено для обеспечения безопасности персонала и оборудования при возникновении аварийных ситуаций, таких как короткое замыкание или грозовой разряд. Удельное сопротивление грунта для вертикальных (ВЭ) и горизонтальных (ГЭ) электродов:

$$\rho_p = \rho \cdot K_c, \quad (41)$$

где ρ – удельное сопротивление грунта, Ом · м;

K_c – коэффициент сезонности.

$$\rho_{p6} = 720 \cdot 1,1 = 792 \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

$$\rho_{p2} = 720 \cdot 1,4 = 1008 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Для ВЭ используется угловая сталь 50х50 мм, для ГЭ используется полосовая сталь 50х5 мм. Сопротивление растеканию одного ВЭ:

$$R_{\text{огэ}} = \frac{\rho_{p6}}{2 \cdot \pi \cdot l} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot l}{d} \right) + 0,5 \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot t + l}{4 \cdot t - l} \right) \right], \quad (42)$$

где l – длина ВЭ, м;

d – приведенный диаметр, м;

t – расстояние от поверхности до центра ВЭ, м.

$$d = 0,95 \cdot b, \quad (43)$$

где b – ширина уголка, мм [15].

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

$$t = 3 / 2 + 0,8 = 2,3 \text{ м},$$

$$R_{\text{овз}} = \frac{720}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot 3}{0,0475} \right) + 0,5 \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot 2,3 + 3}{4 \cdot 2,3 - 3} \right) \right] = 62,08 \text{ Ом.}$$

«Расчетное число ВЭ:

$$n' = R_{\text{овз}} / R_n, \quad (44)$$

где R_n – наибольшее допустимое сопротивление ЗУ, Ом.

$$n' = 62,08 / 4 \approx 16 \text{ шт.}$$

План заземления ТП показан на рисунке 7.

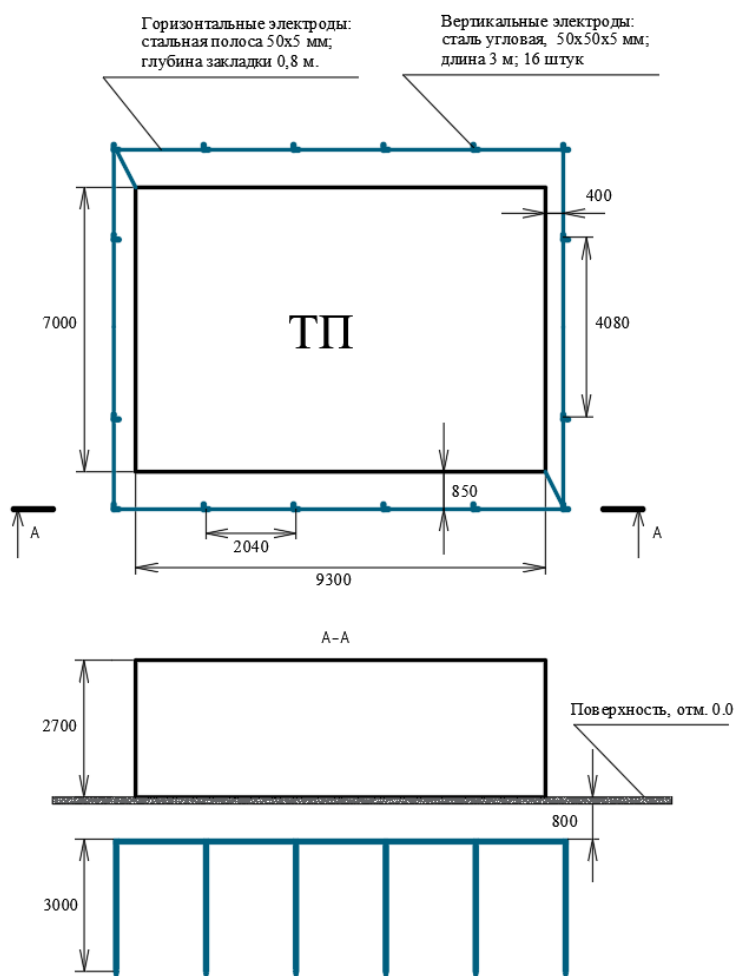


Рисунок 7 – План заземления ТП

Длина ГЭ:

$$l_z = 1,05 \cdot a \cdot n', \quad (45)$$

где a – расстояние между ВЭ, м.

$$a = l_{\text{пер}} / n', \quad (46)$$

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

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

$$a = 32,6 / 16 = 2,04 \text{ м},$$

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

Сопротивление растеканию ГЭ:

$$R_{z3} = \frac{\rho_{pz}}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left(\frac{l^2}{d \cdot t} \right), \quad (47)$$

$$d = 0,5 \cdot b, \quad (48)$$

где b – ширина полосы, м.

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

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

$$R_{z3} = \frac{1008}{2 \cdot 3,14 \cdot 34,27} \cdot \ln \left(\frac{34,27^2}{0,025 \cdot 0,825} \right) = 2,408 \text{ Ом}.$$

Эквивалентное сопротивление ЗУ:

$$R_{zp} = \frac{R_{огз} \cdot R_{z3}}{R_{огз} \cdot \eta_6 \cdot n + R_{z3} \cdot \eta_z}, \quad (49)$$

где η_6 , η_z – коэффициенты использования ВЭ и ГЭ» [15].

$$R_{cp} = \frac{62,08 \cdot 2,408}{62,08 \cdot 0,49 \cdot 16 + 2,408 \cdot 0,32} = 3,732 \text{ Ом} < 4 \text{ Ом}.$$

«Итоговое сопротивление для ЗУ меньше предельно допустимого согласно ПУЭ» [15]. Безопасность и надежная работа электрической сети будут обеспечиваться.

«Заземляющее устройство является важнейшим элементом безопасности любой электроустановки, правильная организация заземления обеспечивает надежную защиту персонала и оборудования от поражения электрическим током, а также предотвращает повреждение электрооборудования при аварийных режимах работы» [14]. Проектные работы являются первым этапом монтажа, устройство внешнего заземляющего контура производят строго по рабочим чертежам проекта, вертикальные заземлители устанавливаются двумя способами: забивкой или вдавливанием для заземлителей из угловой стали и отбракованных труб и вворачиванием «или вдавливанием для заземлителей из круглой стали. Соединения в цепях заземлителей выполняются сваркой внахлестку, места сварки обязательно покрываются битумом для защиты от коррозии, вводы в здание заземляющих проводников» [7] выполняются не менее чем в двух местах, у мест вводов на стены наносятся опознавательные знаки с указанием расстояния до заземляющих проводников. Проходы через стены и перекрытия осуществляются через открытые отверстия, стальные трубы или обоймы, фиксация результатов производится путем составления акта на скрытые работы и внесения привязок заземляющих устройств к стационарным ориентирам на чертежах.

Выводы по разделу.

Выполнено проектирование системы электроснабжения микрорайона «Западный» (г. Хабаровск). С учетом рабочих, аварийных и послеаварийных режимов СЭС выбрано ее основное электрооборудование, отечественного производства. Выполнен расчет заземляющего устройства подстанций.

Заключение

«Выполнено проектирование системы электроснабжения микрорайона «Западный» (г. Хабаровск). Основная часть инфраструктуры представлена многоквартирными жилыми домами этажностью 5-10 этажей.» [14] Имеются магазины, детский сад, школа, дом быта, банк, АТС. Для питания МКР будет проложена кабельная линия 10 кВ от подстанции энергосистемы 110/10 кВ. Подключение к электрической сети зданий в составе инфраструктуры микрорайона позволит обеспечить питанием электрической энергией санитарно-технические устройства, бытовую технику и электронику, освещение и другие электроприемники. В целом, электроснабжение микрорайона обеспечит общее нормальное функционирование его инфраструктуры.

«Решены задачи:

- рассчитаны электрические нагрузки по МКР, которые составили 4945,17 кВт; 1408,60 квар; 5141,88 кВА; электрические нагрузки будут распределены по ТП 10/0,4 кВ;
- спроектирована система освещения территории, будет установлено 46 энергоэффективных светильников 3×SVT-96W;» [8]
- проведен выбор марок подстанций, будут установлены 2КТПН-10/0,4 с энергоэффективными трансформаторами ТМГ12;
- выбраны кабели питающей и распределительной сетей (марок АПвП для сети 10 кВ и АВБШв для сети 0,4 кВ), оборудование защиты линий (автоматических выключателей серии ВА и терминалов РЗА серии «Сириус»), выполнен расчет заземляющего устройства подстанций.

Реализация предлагаемой системы электроснабжения позволит ввести новый микрорайон в эксплуатацию.

Список используемых источников

1. Анчарова Т.В. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений : учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2023. 415 с.
2. Бирюлин В.И. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2022. 164 с.
3. Бирюлин В.И. Электроснабжение промышленных и гражданских объектов : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2022. 204 с.
4. Головатый С. Е. Охрана окружающей среды и энергосбережение : учебное пособие. Минск : РИПО, 2021. 304 с.
5. Кобозев В.А. Качество электроэнергии и энергоэффективность систем электроснабжения потребителей : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2022. 356 с.
6. Комков В. А. Энергосбережение в жилищно-коммунальном хозяйстве : учебное пособие. – 2-е изд. М. : ИНФРА-М, 2022. 204 с.
7. Куксин А. В. Релейная защита электроэнергетических систем : учебное пособие. – М. : Инфра-Инженерия, 2021. 200 с.
8. Любарский Ю. Я. Интеллектуальные электрические сети: компьютерная поддержка диспетчерских решений : учебное пособие. М. : ИНФРА-М, 2022. 160 с.
9. Ополева Г.Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов: Учебное пособие. М. : Форум, 2022. 416 с.
10. Правила устройства электроустановок: действующие разделы 6-го и 7-го изданий. М. : ИНФРА-М, 2023. 832 с.
11. РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания. М. : Издательство НЦ ЭНАС, 2002. 149 с.

12. РД 34.20.185-94. Инструкция по проектированию городских электрических сетей. [Электронный ресурс]. URL: https://www.elec.ru/viewer?url=/library/rd/rd_34_20_185-94.pdf (дата обращения 05.04.2025).

13. Сибикин Ю. Д. Современные электрические подстанции : учебное пособие. – 2-е изд., доп. М. : ИНФРА-М, 2023. 417 с.

14. Сибикин Ю.Д. Электроснабжение : учебное пособие. – 2-е изд., стер. М. : ИНФРА-М, 2023. 328 с.

15. Шеховцов В.П. Расчет и проектирование схем электроснабжения. Методическое пособие для курсового проектирования : учебное пособие. – 3-е изд., испр. М. : ИНФРА-М, 2023. 214 с.

16. Шеховцов В.П. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению : учебное пособие. – 3-е изд. М. : ИНФРА-М, 2023. 136 с.

17. Щербаков, Е. Ф. Электрические аппараты : учебное пособие. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2022. 303 с.

18. Школа для электрика. [Сайт]. – <http://electricalschool.info/> (дата обращения: 09.04.2025).

19. Энергомера. [Сайт]. – <http://www.energomera.ru/> (дата обращения: 15.04.2025).

20. Я энергетик. [Сайт]. – <https://yaenergetik.ru/> (дата обращения: 18.04.2025).