

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

Институт химии и энергетики
(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»
(наименование)

13.03.02. Электроэнергетика и электротехника
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Электроснабжение
(направленность (профиль)/специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Электроснабжение микрорайона города на 10000 жителей

Обучающийся

А.В. Пальщиков
(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н. Д.А. Кретов
(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2024

Аннотация

Выпускная квалифицированная работа 48 страниц, 4 рисунка, 9 таблиц, 20 источников.

Ключевые слова: микрорайон, электроснабжение, система электроснабжения, здание, нагрузка, подстанция, оборудование, релейная защита, заземление.

Для ввода в эксплуатацию зданий и микрорайона города в целом в данной работе проводится разработка системы электроснабжения, при реализации предлагаемого проекта будет обеспечено качественное и надежное электроснабжение потребителей электроэнергии микрорайона. В состав электроприемников будут входить различные электроприводы санитарно-технических устройств, электронно-бытовая техника, освещение, оргтехника и другие потребители электроэнергии, требующие обязательного питания электроэнергией для своей работы. Определены расчетные электрические нагрузки, согласно которым выбрано электрооборудование системы электроснабжения. Рассчитаны рабочие и аварийные режимы электрической сети, выбранное оборудование проверено по допустимым параметрам.

Содержание ВКР включает вопросы: систематизация и анализ исходных данных по микрорайону и зданиям; определение электрических нагрузок по зданиям и микрорайону; выбор числа и номинальной мощности трансформаторов подстанций; расчет электрической сети, выбор кабелей; определение токов короткого замыкания ; выбор аппаратов защиты линий; выбор и проверка электрооборудования подстанций ; релейная защита и автоматика, расчет уставок защит; расчет заземляющих устройств подстанций, молниезащита подстанций.

Содержание

Введение	4
1 Исходные данные по микрорайону и зданиям	7
2 Разработка системы электроснабжения микрорайона	10
2.1 Определение электрических нагрузок по зданиям и микрорайону	10
2.2 Выбор числа и номинальной мощности трансформаторов подстанций	14
2.3 Расчет электрической сети, выбор кабелей	17
2.4 Расчет системы освещения территории	22
2.5 Определение токов короткого замыкания	23
2.6 Выбор аппаратов защиты линий	29
2.7 Выбор и проверка электрооборудования подстанций	32
2.8 Релейная защита и автоматика, расчет уставок защит	37
2.9 Расчет заземляющего устройства подстанций, молниезащита подстанций	41
Заключение	45
Список используемых источников	47

Введение

Новые городские микрорайоны (МКР) представляют собой жилые комплексы, построенные в рамках крупного проекта по застройке городской территории, отличаются от традиционных жилых массивов тем, что они спроектированы с учётом современных требований к комфорту, безопасности и экологии. В отличие от плотной застройки центральных районов, новые МКР создаются с учётом широких дворов, просторных детских площадок, парковых зон и удобных транспортных развязок. Такие жилые комплексы часто включают в себя не только многоквартирные дома, но и коммерческие объекты, такие как магазины, кафе, спортивные и развлекательные центры, что способствует созданию более насыщенной социальной и коммерческой инфраструктуры. Микрорайоны часто становятся местами притяжения для людей, желающих жить в комфортных и безопасных условиях, представляя собой перспективное направление в градостроительстве, которое позволяет создать более гармоничную и удобную среду для жизни, улучшая качество жизни горожан и способствуя устойчивому развитию городов.

Инфраструктура МКР, а также зданий в их составе включает значительное число разнообразных потребителей электроэнергии: «электроприводы санитарно-технических устройств (СТУ) – вентиляции, водоснабжения и канализации, осветительную нагрузку, электроприводы лифтов, многочисленные бытовые электроприборы и оргтехнику и т.д. Очевидно, что современные жилые микрорайоны и здания в их составе (многоквартирные жилые дома, различные коммерческие, общественные и административные объекты) нуждаются в качественном обеспечении электрической энергией в обязательном порядке. При разработке систем электроснабжения микрорайонов необходимо учитывать требования по обеспечению надежности питания электроэнергией в соответствии с указаниями Правил устройства электроустановок (ПУЭ)» [12]. Например,

электроснабжение особо ответственных объектов (больниц, госпиталей, систем пожаротушения, лифтов, важных административных зданий и т.д.) должно выполняться от двух взаиморезервируемых источников питания, предусматривается также резервный источник в виде, например, дизельной электростанции (ДЭС) или газопоршневой электростанции (ГПЭ).

Системы электроснабжения городских микрорайонов играют ключевую роль в обеспечении жизнедеятельности современных мегаполисов, обеспечивая освещение улиц, работу общественного транспорта, функционирование медицинских учреждений, торговых центров и других инфраструктурных объектов. Эти системы включают в себя не только традиционные электрические сети, но и инновационные технологии, такие как умные сети (smart grids), которые позволяют более эффективно распределять и управлять энергией. В больших городах электроснабжение осуществляется с помощью крупных подстанций и распределительных узлов, которые обеспечивают стабильное напряжение и минимизируют потери энергии. В последние годы активно внедряются системы интеллектуального управления сетями, что позволяет оперативно реагировать на изменения в потреблении энергии и предотвращать перегрузки, способствуя повышению надежности и безопасности электроснабжения, а также снижая затраты на эксплуатацию и обслуживание. СЭС микрорайонов являются неотъемлемой частью современного городского планирования и требуют комплексного подхода для обеспечения устойчивого и эффективного функционирования городских инфраструктур. Внедрение инновационных технологий и совершенствование систем управления, при разработке СЭС, позволяет снизить затраты на эксплуатацию и обслуживание городских сетей.

Актуальность темы работы состоит в том, что в рамках развития общегородской инфраструктуры планируется постройка нового микрорайона с большим числом жилых, коммерческих, административных и общественных зданий со значительным числом электроприемников внутри них. В состав электроприемников будут входить различные электроприводы

санитарно-технических устройств, электронно-бытовая техника, освещение, оргтехника и другие потребители электроэнергии, требующие обязательного питания электроэнергией для своей работы. Для ввода в эксплуатацию зданий и МКР в целом в данной работе проводится разработка системы электроснабжения, при реализации предлагаемого проекта СЭС будет обеспечено качественное и надежное электроснабжение потребителей электроэнергии микрорайона. Предложенные технические решения возможно использовать при разработке новых СЭС микрорайонов и реконструкции действующих СЭС.

Цель работы: реализация качественного, надежного и безопасного в эксплуатации электроснабжения микрорайона.

Задачи работы:

- согласно проектной документации по микрорайону систематизировать исходные данные по инфраструктуре и параметрам зданий, составить генеральный план микрорайона с расположением всех зданий;
- рассчитать электрические нагрузки по зданиям и микрорайону в целом;
- выбрать силовые трансформаторы на подстанциях и марки подстанций;
- выбрать кабели электрической сети, составить план электрических сетей микрорайона;
- рассчитать рабочие и аварийные режимы сети, выбрать и проверить электрооборудование подстанций;
- выбрать оборудования релейной защиты и автоматики (РЗА), определить уставки защит;
- выполнить расчет заземляющих устройств подстанций, рассмотреть молниезащиту подстанций.

1 Исходные данные по микрорайону и зданиям

В рамках развития инфраструктуры г. Владивосток планируется постройка нового микрорайона с большим числом жилых, коммерческих, административных и общественных зданий со значительным числом электроприемников внутри них.

В состав электроприемников будут входить различные электроприводы санитарно-технических устройств, электронно-бытовая техника, освещение, оргтехника и другие потребители электроэнергии, требующие обязательного питания электроэнергией для своей работы. Для ввода в эксплуатацию зданий и МКР в целом в данной работе проводится разработка системы электроснабжения, при реализации предлагаемого проекта СЭС будет обеспечено качественное и надежное электроснабжение потребителей электроэнергии микрорайона.

Генеральный план микрорайона приведен на листе 1 графической части.

Рассматриваемый жилой микрорайон города – это организованная территория, включающая жилые дома, объекты социальной инфраструктуры и благоустройства, он будет являться важной составляющей городской среды, обеспечивая комфортное проживание жителей. Его постройка позволит удовлетворить потребности различных слоёв населения в современном жилье и создать комфортную среду для всех жителей. МКР будет интегрирован в общую структуру города, будет иметь удобные связи с другими районами и объектами инфраструктуры, это обеспечит жителям удобство и комфорт проживания. Надежное электроснабжение жилого микрорайона города является неотъемлемой частью его инфраструктуры, обеспечивающей не только комфорт, но и безопасность его жителей. Этот аспект не только влияет на повседневную жизнь людей, но и напрямую влияет на экономическое развитие региона.

Перечень зданий и их основные параметры приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Перечень зданий и их основные параметры

Здание	Номер на генплане	Число квартир/ площадь/ число мест	Число этажей, шт
Жилой дом (ЖД)	1	129	16
ЖД	1А	129	16
Кафе	1Б	72 м ²	3
ЖД	2	129	16
Магазин	2/1	125 м ²	3
ЖД	3	129	16
	3А	129	16
	3Б	72	9
	3В	129	16
	3Г	72	9
Офисное здание	4	985 м ²	2
ЖД	4/1	129	16
	5	129	16
Супермаркет	5/1	122 м ²	2
Хозтовары	5/2	105 м ²	2
ЖД	5/3	129	16
Детсад	6	395	3
Магазин	6Б	247 м ²	2
ЖД	7	129	16
	7А	129	16
	7Б	72	9
Офисное здание	8	907 м ²	2
Торговый павильон	8А	71 м ²	2
Административное здание	8Б	288 м ²	2
Супермаркет	9	377 м ²	3
ЖД	9А	72	9
	7/1	129	16
Офисное здание	10	1782 м ²	3
Котельная	10А	256 м ²	1
Школа	12	208 мест	3
ЖД	12А	129	16
	14	72	9
Супермаркет	17	377 м ²	2
Котельная	22	370 м ²	1
	22А	438 м ²	1
Школа	24	1205 мест	3
ЖД	37	72	9
	39А	72	9
Школа	43	295 мест	2
ЖД	43/1	129	16
Оздоровительный комплекс	45	242 м ²	1
ЖД	47	129	16
	47А	129	16
	49	129	16

В основном, инфраструктура МКР включает современные многоэтажные жилые дома (ЖД) из кирпича, с газовыми плитами. В каждом подъезде предусмотрены пассажирские лифты. Также имеются различные социально-общественные и торгово-административные здания (кафе, магазины, офисные здания, супермаркеты, детсад, школы, котельные, оздоровительный комплекс). Основная часть зданий относится к первой категории надежности электроснабжения – жилые дома ввиду наличия лифтов, детсад, школы и оздоровительный комплекс ввиду систем пожаротушения, котельные ввиду важности обеспечения их бесперебойной работы для отопления МКР. Остальные здания относятся ко второй категории надежности электроснабжения.

Источником питания МКР является подстанция (ПС) 110/10/6 кВ энергосистемы, расположенная на расстоянии 1,21 км.

Электроснабжение жилого микрорайона должно быть организовано с учетом его специфики и потребностей жителей. Оно обеспечивает комфорт и безопасность жизни горожан, поддерживает функционирование всех сфер деятельности – от бытовых нужд до промышленных процессов. Важно, чтобы система была надежной, безопасной и эффективной. Для этого необходимо провести тщательное проектирование, которое включает в себя анализ потребления электроэнергии, выбор оптимальных источников и маршрутов распределения электричества. Необходимо предусмотреть защитные меры, которые предотвратят аварийные ситуации и обеспечат бесперебойное электроснабжение. Это включает в себя регулярное техническое обслуживание оборудования, установку автоматизированных систем мониторинга и реагирования на аварии.

Вывод по разделу.

Систематизированы исходные данные по микрорайону, зданиям и источнику питания. Приведены основные параметры зданий, рассмотрены категории по обеспечению надежности электроснабжения. Приведены основные требования к системе электроснабжения микрорайона.

2 Разработка системы электроснабжения микрорайона

2.1 Определение электрических нагрузок по зданиям и микрорайону

Электрические нагрузки микрорайона – это важный аспект проектирования и эксплуатации электрических сетей, который напрямую влияет на надежность и эффективность энергоснабжения, их правильный расчет позволяет избежать перегрузок, обеспечить стабильное электроснабжение и оптимизировать расходы на электроэнергию. Электрическая нагрузка – это потребление электроэнергии различными устройствами и системами, которые функционируют в заданной зоне, в микрорайоне «нагрузки могут быть как постоянными, так и переменными, в зависимости от времени суток, сезона и других факторов» [12]. Основные категории нагрузок включают жилые, коммерческие и производственные [1]. Для каждого типа здания рассчитывается расчетная нагрузка, это может быть сделано с использованием стандартных норм и коэффициентов, которые учитывают среднее потребление электроэнергии на квадратный метр или на человека.

«Активная нагрузка квартир МЖД:

$$P = P_{уд.кв} \cdot n, \quad (1)$$

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

n – число квартир, шт.

Полная нагрузка МЖД состоит из нагрузки квартир и силовых электроприемников (ЭП) (лифтов, насосов и др.):

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

$$Q_C = P_C \cdot \operatorname{tg} \varphi_C, \quad (3)$$

$$P_L = k_{C.L.} \cdot \sum_1^{n_l} P_{n.i}, \quad (4)$$

$$Q_L = P_L \cdot \operatorname{tg} \varphi_L, \quad (5)$$

$$P_p = P + (P_L + P_C) \cdot K_y, \quad (6)$$

$$Q_p = Q + (Q_L + Q_C) \cdot K_y, \quad (7)$$

где $P_{дв.н}$ – номинальные мощности электродвигателей (ЭД) силовых

ЭП, кВт/этаж;

n – число ЭД, шт.;

$k_{C.дв}$, $k_{C.л.}$ – коэффициенты спроса нагрузки ЭД силовых ЭП и лифтов;

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

P_C – нагрузка силовых ЭП, кВт;

N_{ε} , $N_{л}$ – число этажей и подъездов, шт.;

$\operatorname{tg} \varphi_C$, $\operatorname{tg} \varphi_L$ – тангенс, соответствующие нормативному $\cos \varphi$ ЭД силовых ЭП и лифтов.

K_y – коэффициент участия силовых ЭП в максимуме нагрузок.

Полная нагрузка МЖД:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}, \quad (8)$$

где $\operatorname{tg} \varphi$ – тангенс, соответствующий нормативному $\cos \varphi$ [12].

1) Расчет для ЖД № 1.

Для 129 квартир, $P_{y\partial} = 0,82$ кВт/кв [15].

$$P = 0,82 \cdot 129 = 105,78 \text{ кВт.}$$

По (2-8):

$$P_{\text{л}} = 0,7 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 4,5 = 25,2 \text{ кВт},$$

$$Q_{\text{л}} = 25,2 \cdot 1,17 = 29,48 \text{ квар},$$

$$P_{\text{с}} = 0,65 \cdot 1,5 \cdot 16 = 15,6 \text{ кВт},$$

$$Q_{\text{с}} = 15,6 \cdot 0,75 = 11,7 \text{ квар},$$

$$P_p = 105,78 + (25,2 + 15,6) \cdot 0,9 = 142,5 \text{ кВт},$$

$$Q_p = 54,19 + (29,48 + 11,7) \cdot 0,9 = 91,26 \text{ квар},$$

$$S_p = \sqrt{142,5^2 + 91,26^2} = 169,22 \text{ кВА}.$$

2) Расчет по вместимости. Для детского сада, здание №6:
 $P_{\text{уд.}} = 0,26 \text{ кВт/место}$ [15].

$$P_p = 0,26 \cdot 395 = 102,7 \text{ кВт},$$

$$Q_p = 102,7 \cdot 0,54 = 55,43 \text{ квар},$$

$$S_p = \sqrt{102,7^2 + 55,43^2} = 116,7 \text{ кВА}.$$

3) Расчет по удельной мощности и площади. Для кафе, здание №1Б:
 $P_{\text{уд.}} = 0,48 \text{ кВт/м}^2$ [15].

$$P_p = 0,48 \cdot 72 = 34,56 \text{ кВт},$$

$$Q_p = 34,56 \cdot 0,4 = 13,66 \text{ квар},$$

$$S_p = \sqrt{34,56^2 + 13,66^2} = 37,16 \text{ кВА}.$$

Результаты расчета нагрузок сведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчета электрических нагрузок

Здания	Руд, кВт/кв (кв.м, чел)	tgφ	Рр, кВт	Qp, квар	Sp, кВА
ЖД	0,82	0,51	142,50	91,26	169,22
ЖД	0,82	0,51	142,50	91,26	169,22
Кафе	0,48	0,40	34,56	13,66	37,16
ЖД	0,82	0,51	142,50	91,26	169,22
Магазин	0,22	0,75	27,50	20,63	34,38
ЖД	0,82	0,51	142,50	91,26	169,22
ЖД	0,82	0,51	142,50	91,26	169,22
ЖД	0,98	0,51	96,08	62,43	114,58
ЖД	0,82	0,51	142,50	91,26	169,22
ЖД	0,98	0,51	96,08	62,43	114,58
Офисное здание	0,16	0,54	157,60	85,06	179,09
ЖД	0,82	0,51	142,50	91,26	169,22
ЖД	0,82	0,51	142,50	91,26	169,22
Супермаркет	0,22	0,75	26,84	20,13	33,55
Хозтовары	0,22	0,75	23,10	17,33	28,88
ЖД	0,82	0,51	142,50	91,26	169,22
Детсад	0,26	0,54	102,70	55,43	116,70
Магазин	0,22	0,75	54,34	40,76	67,93
ЖД	0,82	0,51	142,50	91,26	169,22
ЖД	0,82	0,51	142,50	91,26	169,22
ЖД	0,98	0,51	96,08	62,43	114,58
Офисное здание	0,16	0,54	145,12	78,33	164,91
Торговый павильон	0,16	0,54	11,36	6,13	12,91
Административное здание	0,16	0,54	46,08	24,87	52,36
Супермаркет	0,14	0,48	52,78	25,56	58,64
ЖД	0,98	0,51	96,08	62,43	114,58
ЖД	0,82	0,51	143,58	92,07	170,56
Офисное здание	0,16	0,59	285,12	169,18	331,53
Котельная	0,25	0,62	64,00	39,66	75,29
Школа	0,22	0,65	45,76	29,56	54,48
ЖД	0,82	0,51	142,50	91,26	169,22
ЖД	0,98	0,51	96,08	62,43	114,58
Супермаркет	0,14	0,48	52,78	25,56	58,64
Котельная	0,25	0,62	92,50	57,33	108,82
Котельная	0,25	0,62	109,50	67,86	128,82
Школа	0,18	0,65	216,90	140,10	258,21
ЖД	0,98	0,51	96,08	62,43	114,58
ЖД	0,98	0,51	84,74	49,16	97,96
Школа	0,25	0,65	73,75	47,64	87,80
ЖД	0,82	0,51	142,50	91,26	169,22
Оздоровительный комплекс	0,14	0,59	33,88	20,10	39,40
ЖД	0,82	0,51	142,50	91,26	169,22
ЖД	0,82	0,51	142,50	91,26	169,22
ЖД	0,82	0,51	142,50	91,26	169,22
Территория, освещение	0,1 Вт/м ²	0,33	11,99	3,94	12,62
Итого	-	0,63	4752,93	2964,76	5605,59

Силовые трансформаторы и прочее оборудование ТП выбираются с учетом данных нагрузок согласно зонам охвата по нагрузкам питаемых зданий.

2.2 Выбор числа и номинальной мощности трансформаторов подстанций

Выбор силовых трансформаторов подстанций играет важную роль в системах электроснабжения, он зависит от категории надёжности электроснабжения потребителей, компенсации реактивных нагрузок, перегрузочной способности трансформаторов и экономических режимов работы. Обычно на подстанции устанавливают один или два трансформатора, однострановые ТП применяют для питания электроприёмников III категории или через замкнутые сети, подключённые к нескольким подстанциям. Два трансформатора устанавливают на ТП, питающих электроприёмники I и II категории [14]. Номинальная мощность трансформатора определяется исходя из допустимой относительной аварийной нагрузки. Правильный выбор числа и номинальной мощности трансформаторов обеспечивает надёжное и эффективное функционирование подстанции и системы электроснабжения в целом. Таким образом, выбор силовых трансформаторов ТП является многогранным процессом, требующим учета множества факторов, включая технические характеристики оборудования, «условия эксплуатации и требования к надёжности и безопасности энергосистемы» [12].

«Оптимальная мощность силовых трансформаторов:

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

где β – нормативный коэффициент загрузки;

N – количество трансформаторов, шт;

S_p – расчетная 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 – расчетная активная 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» [9]:

$$Q_{HH} = Q_p - Q_{БК} \quad (12)$$

Для ТП-1 нагрузки, с учетом зоны охвата: 840,1 кВт; 514,5 квар; 985,14 кВА. Проводятся расчеты по (9-12).

$$S_o = \frac{985,14}{0,7 \cdot 2} = 703,7 \text{ кВА}$$

Будет установлена КТПН с энергоэффективными трансформаторами ТМГ12-1000/10 [16].

$$Q_1 = \sqrt{(2 \cdot 0,7 \cdot 1000)^2 - 840,1^2} = 1119,9 \text{ квар},$$

$$Q_{0,4} = 514,5 - 1119,9 = -605,4 \text{ квар} < 0.$$

КРМ не требуется.

«Коэффициент загрузки трансформатора в послеаварийном режиме:

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

$$K_n = \frac{985,14}{1000} = 0,99 \leq 1,4.$$

Послеаварийный режим работы является допустимым» [8].

Для всех ТП расчеты – в таблице 3.

Таблица 3 – Выбор трансформаторов

Подстанции	Sp.т, кВА	S.т, кВА	Qк, квар	Кп
ТП-1	703,7	1000	-605,4	0,99
ТП-2	1336,1	1600	-585,6	1,17
ТП-3	705,6	1000	-616,9	0,99
ТП-4	1153,9	1250	-230,7	1,29

«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 XX, 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 ХХ, %» [4].

Для ТП-1:

$$\Delta P_m = 10,5 / 2 \cdot [(840,1^2 + 514,5^2) / 1,0^2] + 2 \cdot 1,1 = 3,47 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_m = (5,5 / 2 \cdot 100) \cdot [(840,1^2 + 514,5^2) / 1,0] + (2 \cdot 0,6 \cdot 1,0) / 100 = 38,69 \text{ квар}.$$

Расчеты сведены в таблице 4.

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
ТП-1	3,47	38,69	843,58	553,21	1008,79
ТП-2	6,13	81,61	1584,60	1085,35	1920,66
ТП-3	3,48	38,83	861,56	528,15	1010,56
ТП-4	5,52	75,13	1369,29	941,05	1661,49
Σ	18,6	234,26	4659,03	3107,76	5600,4

Далее выбираются кабели электрической сети.

2.3 Расчет электрической сети, выбор кабелей

Необходимо обеспечить возможность индивидуального отключения и вывода в ремонт всех участков электрической сети по отдельным потребителям, ввиду этого принимается радиальная схема питания зданий от ТП и кольцевая схема питания ТП [18].

План прокладки кабельных линий (КЛ) приведен на листе 2 графической части.

Радиальная схема электроснабжения микрорайона представляет собой систему распределения электрической энергии, в которой потребители подключены к источнику питания через отдельные линии. Эта схема применяется для обеспечения надёжного и безопасного электроснабжения, особенно в МКР с плотной застройкой и большим количеством потребителей. «Основным преимуществом данной схемы является её высокая надёжность, в случае аварии на одной из линий, питание остальных потребителей не нарушается, так как они подключены к разным источникам, это снижает риск длительных отключений и перебоев в электроснабжении» [12]. Кроме того, радиальная схема позволяет легко модернизировать и расширять систему электроснабжения, добавление новых потребителей или изменение схемы подключения не требует значительных затрат и времени, так как линии питания уже разделены и независимы друг от друга. Радиальная схема электроснабжения микрорайона является одним из наиболее надёжных и эффективных способов обеспечения электрической энергией жилых и общественных зданий, она обеспечивает стабильность и безопасность электроснабжения, а также позволяет легко модернизировать и расширять систему в будущем.

«Выбор кабелей сети 10 кВ.

Для сети 10 кВ применяется кольцевая схема с двухсторонним питанием, поэтому параметры работы линий и выбора кабелей одинаковы для всей сети 10 кВ.

Расчетный рабочий ток линий:

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

где n – число цепей, шт.

$$I_p = 5600,4 / (\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 2) = 161,7 \text{ А}$$

Аварийный ток:

$$I_{ав} = 5600,4 / (\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 1) = 323,3 \text{ А}$$

Экономическое сечение жил:

$$F_{эк} = I_p / j_{эк}, \quad (17)$$

где $j_{эк}$ – экономическая плотность тока, А/мм²» [13].

$$F_{эк} = 161,7 / 1,4 = 115,5 \text{ мм}^2$$

По аварийному току выбирается кабель АПВБП-3·185, $I_{дон} = 360 \text{ А}$ [20].

$$I_{ав} = 323,3 \text{ А} < I_{дон} = 360 \text{ А}$$

«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, Ом/км;

$\cos \varphi$ – средневзвешенный коэффициент мощности нагрузки» [19].

Наибольшие потери напряжения в КЛ в наиболее протяженной линии до ТП-1:

$$\Delta U_{л} = \frac{\sqrt{3} \cdot 323,3 \cdot 1,21 \cdot 100}{10000} (0,167 \cdot 0,832 + 0,077 \cdot 0,555) = 1,2 \% \leq 5 \%$$

Потери не превышают допустимые 5%.

Выбор кабелей сети 0,4 кВ.

Расчет для участка ТП-1—здание 7/1.

Расчетный ток КЛ, по (16):

$$I_{\max} = 170,6 / (\sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 1) = 246,2 \text{ А}$$

Принимается кабель АВБШв 4×120, $I_{\text{дон}} = 270 \text{ А}$ [20]. «Индуктивным сопротивлением для сети 0,4 кВ можно пренебречь» [3].

Потери напряжения в КЛ, по (18):

$$\Delta U_{\text{л}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 246,2 \cdot 0,106 \cdot 100}{400} (0,258 \cdot 0,89 + 0 \cdot 0,272) = 1,23 \% < 5 \%$$

Выбранные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) являются одним из наиболее современных и перспективных решений в области передачи электроэнергии, они обладают рядом уникальных свойств, которые делают их незаменимыми в различных сферах, от строительства крупных энергетических объектов до бытового использования. Одним из ключевых преимуществ СПЭ-кабелей является их высокая изоляционная способность. В отличие от традиционных кабелей с бумажной или резиновой изоляцией, СПЭ-изоляция устойчива к механическим повреждениям и химическим воздействиям, что значительно увеличивает срок службы кабеля и снижает риск коротких замыканий. Также изоляция из сшитого полиэтилена обладает высокой термостойкостью, что позволяет использовать её при температурах до 90°C. Ещё одним важным преимуществом СПЭ-кабелей является их высокая гибкость и эластичность. Это делает их удобными для прокладки в труднодоступных местах, таких как подземные тоннели или траншеи. Выбор кабелей 0,4 кВ сведен в таблице 5.

Таблица 5 – Выбор кабелей 0,4 кВ

Участок	I_p , А	Сечение жил кабеля АВБШв, мм ²	Идоп.кл, А	ΔU ,%
ТП1–7/1	246,2	120	270	1,23
ТП1–9	84,6	16	90	1,11
ТП1–9А	165,4	70	200	0,22
ТП1–10А	108,7	25	115	1,05
ТП1–17	84,6	16	90	1,04
ТП1–22	157,1	50	165	0,42
ТП1–22А	185,9	70	200	0,49
ТП1–24	372,7	240	440	0,41
ТП2–1	244,2	120	270	1,70
ТП2–3	244,2	120	270	1,20
ТП2–5	244,2	120	270	1,41
ТП2–5/1	48,4	16	90	1,19
ТП2–5/2	41,7	16	90	1,26
ТП2–5/3	244,2	120	270	1,52
ТП2–7	244,2	120	270	1,17
ТП2–7А	244,2	120	270	1,03
ТП2–7Б	165,4	70	200	0,49
ТП2–12А	244,2	120	270	1,97
ТП2–14	165,4	70	200	1,81
ТП2–45	56,9	16	90	0,84
ТП2–47	244,2	120	270	1,30
ТП2–47А	244,2	120	270	0,49
ТП2–49	244,2	120	270	1,97
ТП3–4	258,5	120	270	0,82
ТП3–6	168,4	70	200	0,64
ТП3–6Б	98,0	25	115	0,86
ТП3–8	238,0	120	270	0,67
ТП3–8А	18,6	16	90	0,66
ТП3–8Б	75,6	16	90	1,66
ТП3–10	478,5	2·95	480	1,39
ТП3–12	78,6	16	90	1,16
ТП4–1А	244,2	120	270	1,00
ТП4–1Б	53,6	16	90	1,37
ТП4–2	244,2	120	270	0,91
ТП4–2/1	49,6	16	90	1,84
ТП4–3А	244,2	120	270	0,94
ТП4–3Б	165,4	70	200	0,29
ТП4–3В	244,2	120	270	1,50
ТП4–3Г	165,4	70	200	0,22
ТП4–4/1	244,2	120	270	1,08
ТП4–37	165,4	70	200	1,44
ТП4–39А	141,4	50	165	1,81
ТП4–43	126,7	35	135	0,29
ТП4–43/1	244,2	120	270	1,34
ТП1–7/1	246,2	120	270	1,23

2.4 Расчет системы освещения территории

Светодиодное освещение, или LED, представляет собой одну из самых перспективных технологий в области светотехники, в отличие от традиционных источников света, таких как лампы накаливания и люминесцентные лампы, светодиоды обладают рядом неоспоримых преимуществ, которые делают их использование выгодным и экологически безопасным [5]. Светодиоды обладают высокой энергоэффективностью, они потребляют в несколько раз меньше энергии по сравнению с лампами накаливания и люминесцентными лампами, что позволяет значительно снизить затраты на электроэнергию [17]. Это особенно важно в условиях постоянного роста тарифов на электроэнергию и необходимости сокращения углеродного следа. Также светодиоды долговечны и надежны, срок службы светодиодных ламп может достигать 100,000 часов, что в десятки раз превышает срок службы ламп накаливания и люминесцентных ламп. Это означает, что светодиодное освещение требует минимальных затрат на обслуживание и замену, что способствует снижению эксплуатационных расходов. Наконец, светодиоды обеспечивают высокую яркость и равномерность светового потока, обеспечивая комфортное и безопасное освещение, что особенно важно при высокой интенсивности движения.

«В системе освещения территории используются светодиодные модули уличного освещения 3xSVT-96W.

Требуемое число светильников для освещения территории определяется исходя из расчетной активной мощности системы внешнего освещения:

$$N = \frac{P_{po}}{P_{св}}, \quad (19)$$

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

$$N = \frac{11,99}{0,288} \approx 42 \text{ шт.}$$

Светильники устанавливаются на опорах ОГКл-9 вдоль автомобильных дорог и ОГКл-6 в отдалении от дорог» [12]. План системы освещения территории микрорайона приведен на листе 3 графической части.

2.5 Определение токов короткого замыкания

«Расчет токов короткого замыкания (КЗ) в ключевых точках электрической сети необходим для выбора и проверки электрооборудования по допустимым параметрам. Составляется схема замещения, куда вносятся элементы сети, значимо влияющие на величину токов КЗ, наносятся точки КЗ» [12]. Схема замещения сети показана на рисунке 1.

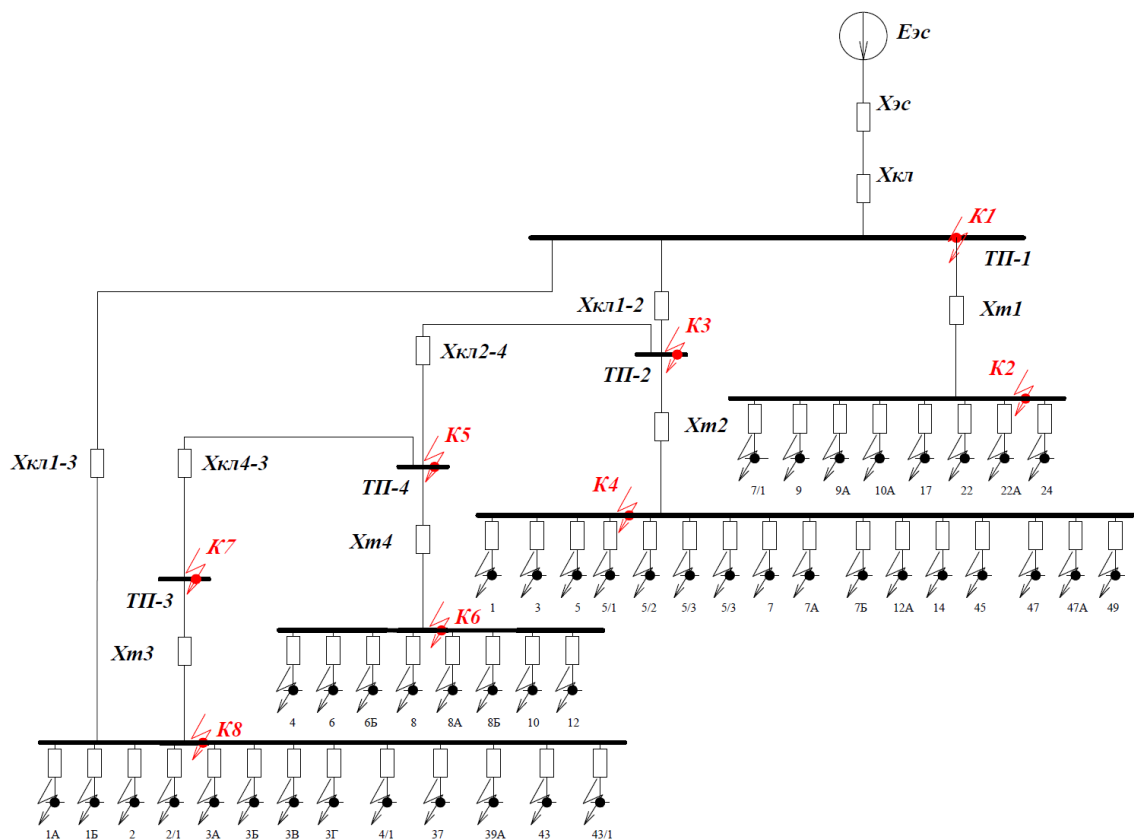


Рисунок 1 – Схема замещения сети

«Полное сопротивление цепи:

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

где Σr , Σx – активное и индуктивное сопротивления цепи, Ом

Приведенное сопротивление участков:

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

где x – действительное сопротивление участка, Ом;

U_{δ} – базисное напряжение, кВ;

U_n – напряжение участка, кВ.

Сопротивление трансформаторов:

$$x_m^o = \frac{U_{\kappa} \%}{100} \cdot \frac{U_{\delta}^2}{S_{nm}}, \quad (22)$$

Приведенное сопротивление линий:

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

где x_0 – удельное сопротивление, Ом/км;

l – длина линии, км;

U_{nl} – номинальное напряжение участка, кВ.

Трёхфазный, двухфазный и однофазный токи КЗ:

$$I_{\kappa 3}^{(3)} = \frac{U_{\delta}}{\sqrt{3z}}, \quad (24)$$

$$I_{\kappa 3}^{(2)} = I_{\kappa 3}^{(3)} \cdot \sqrt{3} / 2, \quad (25)$$

$$I_{\kappa 3}^{(1)} = 0,55 \cdot I_{\kappa 3}^{(3)}, \quad (26)$$

Ударный ток КЗ:

$$I_y = I_{\kappa 3}^{(3)} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (\kappa_y - 1)^2}, \quad (27)$$

где κ_y – ударный коэффициент;

T_a – постоянная затухания апериодической слагающей, с» [18].

$$\kappa_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}, \quad (28)$$

$$T_a = \sum R / 314 \cdot \sum X. \quad (29)$$

«Переходное сопротивление в местах присоединения низковольтных проводов учитывается добавкой активного сопротивления 15 мОм и индуктивного 5 мОм» [18]. Сопротивления КЛ приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Сопротивления линий

Участок	$R'_{(0,4)}$, мОм	$X'_{(0,4)}$, мОм
ТП1–7/1	27,34	6,83
ТП1–9	143,23	35,81
ТП1–9А	3,50	0,87
ТП1–10А	105,96	26,49
ТП1–17	135,27	33,82
ТП1–22	7,63	1,91
ТП1–22А	7,27	1,82
ТП1–24	3,00	0,75
ТП2–1	19,22	4,81
ТП2–3	33,69	8,42

Продолжение таблицы 6

Участок	$R'_{(0,4)}$, МОм	$X'_{(0,4)}$, МОм
ТП2-5	39,68	9,92
ТП2-5/1	347,47	86,87
ТП2-5/2	265,24	66,31
ТП2-5/3	17,11	4,28
ТП2-7	20,81	5,20
ТП2-7А	12,17	3,04
ТП2-7Б	8,18	2,04
ТП2-12А	33,86	8,47
ТП2-14	43,00	10,75
ТП2-45	115,38	28,85
ТП2-47	14,64	3,66
ТП2-47А	5,47	1,37
ТП2-49	22,22	5,56
ТП3-4	16,58	4,14
ТП3-6	9,99	2,50
ТП3-6Б	169,83	42,46
ТП3-8	21,69	5,42
ТП3-8А	98,14	24,54
ТП3-8Б	222,81	55,70
ТП3-10	7,80	1,95
ТП3-12	216,17	54,04
ТП4-1А	16,93	4,23
ТП4-1Б	140,58	35,14
ТП4-2	25,57	6,39
ТП4-2/1	257,29	64,32
ТП4-3А	10,41	2,60
ТП4-3Б	4,85	1,21
ТП4-3В	16,93	4,23
ТП4-3Г	3,63	0,91
ТП4-4/1	29,63	7,41
ТП4-37	23,92	5,98
ТП4-39А	35,18	8,79
ТП4-43	6,08	1,52
ТП4-43/1	14,99	3,75
ТП1-ТП-2	1,81	0,45
ТП2-ТП-4	0,55	0,14
ТП3-ТП-4	1,32	0,33
ТП1-ТП-3	1,28	0,32
КЛ до ТП-1	4,04	1,01

Сопротивления трансформаторов (приведенные к ступени 0,4 кВ) сведены в таблице 7.

Таблица 7 – Сопротивления трансформаторов

Подстанции	Марка	$R'_{(0,4)}, \text{МОм}$	$X'_{(0,4)}, \text{МОм}$
ТП-1	ТМГ12-1000/10	1,68	8,80
ТП-2	ТМГ12-1600/10	1,60	6,00
ТП-3	ТМГ12-1000/10	1,68	8,80
ТП-4	ТМГ12-1250/10	1,73	7,68

Расчет для участка ТП-1–здание №7/1 (КЗ на вводе РП здания №7/1).
«Сопротивления КЛ 0,4 кВ с учетом сопротивлений контактов:

$$R_{КЛ0,4} = 27,34 + 15 = 42,34 \text{ МОм},$$

$$X_{КЛ0,4} = 6,83 + 5 = 11,83 \text{ МОм}.$$

С учетом сопротивлений трансформатора, КЛ 10 кВ и энергосистемы, сопротивления цепи» [12]:

$$R_{\Sigma} = 42,34 + 1,68 + 23,57 = 67,59 \text{ МОм},$$

$$X_{\Sigma} = 11,83 + 8,8 + 70,36 = 90,99 \text{ МОм},$$

$$z = \sqrt{67,59^2 + 90,99^2} = 113,35 \text{ МОм}$$

По формулам (24–29):

$$I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{0,4 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 113,35} = 2,037 \text{ кА},$$

$$T_a = 67,59 / (314 \cdot 90,99) = 0,0237,$$

$$\kappa_y = 1 + e^{\frac{0,01}{0,0237}} = 1,53,$$

$$I_y = 2,037 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (1,53 - 1)^2} = 3,604 \text{ кА},$$

$$I_{кз}^{(2)} = 2,037 \cdot \sqrt{3} / 2 = 1,764 \text{ кА},$$

$$I_{кз}^{(1)} = 0,55 \cdot 2,037 = 1,121 \text{ кА}.$$

Расчет токов КЗ сведен в таблице 8.

Таблица 8 – Расчет токов КЗ, результаты

Участок / точка КЗ	$I_{кз}^{(3)}$, кА	I_y , кА	$I_{кз}^{(2)}$, кА	$I_{кз}^{(1)}$, кА
К1	2,869	3,359	2,485	-
К2	2,585	2,991	2,239	1,422
К3	2,832	3,358	2,452	-
К4	2,555	2,992	2,213	1,405
К5	1,121	1,712	0,971	-
К6	1,096	1,666	0,949	0,603
К7	1,114	1,703	0,965	-
К8	1,084	1,646	0,939	0,596
ТП1–7/1	2,037	2,538	1,764	1,121
ТП1–9	1,037	1,574	0,898	0,570
ТП1–9А	2,295	2,866	1,987	1,262
ТП1–10А	1,234	1,838	1,069	0,679
ТП1–17	1,074	1,625	0,930	0,591
ТП1–22	2,233	2,837	1,934	1,228
ТП1–22А	2,238	2,840	1,938	1,231
ТП1–24	2,302	2,869	1,994	1,266
ТП2–1	2,066	2,732	1,789	1,136
ТП2–3	2,815	3,858	2,438	1,548
ТП2–5	2,707	3,755	2,345	1,489
ТП2–5/1	0,541	0,857	0,469	0,298
ТП2–5/2	1,008	1,579	0,873	0,555
ТП2–5/3	2,095	2,753	1,814	1,152
ТП2–7	3,066	4,073	2,655	1,686
ТП2–7А	2,166	2,800	1,876	1,191
ТП2–7Б	2,225	2,833	1,926	1,223
ТП2–12А	1,875	2,570	1,623	1,031
ТП2–14	1,767	2,465	1,530	0,972
ТП2–45	1,178	1,765	1,020	0,648
ТП2–47	2,130	2,777	1,845	1,172
ТП2–47А	2,265	2,853	1,962	1,246
ТП2–49	3,037	3,168	2,630	1,670
ТП3–4	2,103	2,758	1,821	1,156
ТП3–6	2,198	2,818	1,903	1,209
ТП3–6Б	1,393	2,136	1,206	0,766

Продолжение таблицы 8

Участок / точка КЗ	$I^{(3)}_{кз}, \text{кА}$	$I_y, \text{кА}$	$I^{(2)}_{кз}, \text{кА}$	$I^{(1)}_{кз}, \text{кА}$
ТПЗ–8	2,032	2,706	1,760	1,118
ТПЗ–8А	1,284	1,903	1,112	0,706
ТПЗ–8Б	1,151	1,788	0,996	0,633
ТПЗ–10	2,230	2,836	1,931	1,227
ТПЗ–12	0,784	1,217	0,679	0,431
ТП4–1А	2,098	2,755	1,817	1,154
ТП4–1Б	1,049	1,591	0,908	0,577
ТП4–2	2,970	3,996	2,572	1,633
ТП4–2/1	0,688	1,077	0,596	0,379
ТП4–3А	2,192	2,815	1,898	1,205
ТП4–3Б	2,274	2,857	1,970	1,251
ТП4–3В	2,098	2,755	1,817	1,154
ТП4–3Г	2,293	2,865	1,986	1,261
ТП4–4/1	2,891	3,928	2,504	1,590
ТП4–37	2,002	2,682	1,734	1,101
ТП4–39А	1,858	2,555	1,609	1,022
ТП4–43	2,256	2,849	1,954	1,241
ТП4–43/1	2,125	2,774	1,840	1,169

Результаты расчетов будут использоваться для расчета уставок РЗА и выбор ЭО подстанций.

2.6 Выбор аппаратов защиты линий

Автоматические выключатели (АВ) являются неотъемлемой частью современных электрических систем, обеспечивая безопасность и надежность в эксплуатации электрических установок, эти устройства предназначены для защиты электрических цепей от перегрузок и коротких замыканий, что делает их важным элементом как в бытовых, так и в промышленных условиях. АВ работают на основе электромеханических или электронных принципов, в случае перегрузки или короткого замыкания, ток в цепи превышает установленный предел, что приводит к срабатыванию устройства. В традиционных автоматах используется биметаллическая пластина, которая при нагревании изгибается и размыкает цепь, в более современных моделях

применяются электронные схемы, которые обеспечивают более точное и быстрое срабатывание. Одним из главных преимуществ автоматических выключателей является их способность автоматически отключать электрическую цепь в случае аварийной ситуации, что предотвращает повреждение оборудования и минимизирует риск возникновения пожара. Кроме того, АВ легко восстанавливаются после срабатывания – достаточно вернуть рычаг в исходное положение, что делает их удобными в эксплуатации.

«Условия выбора АВ:

– по напряжению:

$$U_{ном} \geq U_c, \quad (30)$$

– по номинальному току:

$$I_{ном} > 1,1 \cdot I_p, \quad (31)$$

– по числу полюсов и виду тока (постоянный или переменный)» [1].

АВ для защиты КЛ к зданию № 16 выбираем марки ВА-52-39/320.

Проверка по (30,31):

$$U_{ном} = 400 \geq 400 \text{ В},$$

$$1,1 \cdot 246,2 = 270,8 \text{ А},$$

$$I_{ном} = 320 > 270,8 \text{ А}.$$

Выбор АВ сведен в таблице 9.

Таблица 9 – Выбор аппаратов защиты линий 0,4 кВ

Участок	I_p , А	$1,1 \cdot I_p$, А	Марка авт. выкл.	$I_{ном}$, А
ТП1–7/1	246,2	270,8	ВА-52-39	320
ТП1–9	84,6	93,1	ВА-51-35	100
ТП1–9А	165,4	181,9	ВА-52-39	250
ТП1–10А	108,7	119,5	ВА-51-35	125
ТП1–17	84,6	93,1	ВА-51-35	100
ТП1–22	157,1	172,8	ВА-52-39	250
ТП1–22А	185,9	204,5	ВА-52-39	250
ТП1–24	372,7	410,0	ВА-52-39	500
ТП2–1	244,2	268,7	ВА-52-39	320
ТП2–3	244,2	268,7	ВА-52-39	320
ТП2–5	244,2	268,7	ВА-52-39	320
ТП2–5/1	48,4	53,3	ВА-51-35	63
ТП2–5/2	41,7	45,8	ВА-51-35	50
ТП2–5/3	244,2	268,7	ВА-52-39	320
ТП2–7	244,2	268,7	ВА-52-39	320
ТП2–7А	244,2	268,7	ВА-52-39	320
ТП2–7Б	165,4	181,9	ВА-52-39	250
ТП2–12А	244,2	268,7	ВА-52-39	320
ТП2–14	165,4	181,9	ВА-52-39	250
ТП2–45	56,9	62,5	ВА-51-35	63
ТП2–47	244,2	268,7	ВА-52-39	320
ТП2–47А	244,2	268,7	ВА-52-39	320
ТП2–49	244,2	268,7	ВА-52-39	320
ТП3–4	258,5	284,3	ВА-52-39	320
ТП3–6	168,4	185,3	ВА-52-39	250
ТП3–6Б	98,0	107,8	ВА-51-35	125
ТП3–8	238,0	261,8	ВА-52-39	320
ТП3–8А	18,6	20,5	ВА-51-35	25
ТП3–8Б	75,6	83,1	ВА-51-35	100
ТП3–10	478,5	526,4	ВА-52-39	630
ТП3–12	78,6	86,5	ВА-51-35	100
ТП4–1А	244,2	268,7	ВА-52-39	320
ТП4–1Б	53,6	59,0	ВА-51-35	63
ТП4–2	244,2	268,7	ВА-52-39	320
ТП4–2/1	49,6	54,6	ВА-51-35	63
ТП4–3А	244,2	268,7	ВА-52-39	320
ТП4–3Б	165,4	181,9	ВА-52-39	250
ТП4–3В	244,2	268,7	ВА-52-39	320
ТП4–3Г	165,4	181,9	ВА-52-39	250
ТП4–4/1	244,2	268,7	ВА-52-39	320
ТП4–37	165,4	181,9	ВА-52-39	250
ТП4–39А	141,4	155,5	ВА-51-35	160
ТП4–43	126,7	139,4	ВА-51-35	160
ТП4–43/1	244,2	268,7	ВА-52-39	320

Далее выбирается основное ЭО для подстанций.

2.7 Выбор и проверка электрооборудования подстанций

Будут установлены современные комплектные ТП марки 2КТПН-ПК.

Комплектные трансформаторные подстанции (КТП) представляют собой важный элемент электрических сетей, «обеспечивающий преобразование и распределение электрической энергии, они играют ключевую роль в обеспечении надежности и эффективности электроснабжения. КТП состоят из нескольких основных компонентов: трансформаторов, распределительных устройств, защитного оборудования и систем управления» [16]. Основная функция заключается в преобразовании высоковольтного тока, поступающего из электрических сетей, в низковольтный, который может быть использован для питания потребителей. КТП могут быть установлены как на открытых площадках, так и в закрытых помещениях, что позволяет адаптировать их под различные условия эксплуатации. Они обеспечивают не только трансформацию напряжения, но и распределение электроэнергии между различными потребителями, что делает их незаменимыми в современных энергетических системах. Одним из главных преимуществ КТП является их компактность, в отличие от традиционных подстанций, которые требуют значительных площадей для установки, КТП занимают гораздо меньше места, что особенно важно в условиях городской застройки.

Выбор и проверка электрооборудования на подстанции ТП-1.

«Критерии выбора выключателей нагрузки (ВН):

$$U_{ном} \geq U_{раб}, \text{ кВ}, \quad (32)$$

$$I_{ном} \geq I_{раб}, \text{ кВ}, \quad (33)$$

$$i_{np.c} \geq i_y, \text{ кА}, \quad (34)$$

где $i_{np.c}$ – предельный сквозной ток, кА.

$$I_m^2 \cdot t_m \geq B_\kappa, \text{ кА}^2 \cdot \text{с}, \quad (35)$$

где I_m – ток термической стойкости, кА;

t_m – время протекания тока, с;

B_κ – тепловой импульс, $\text{кА}^2 \cdot \text{с}$.

$$B_\kappa = I_\kappa^2 \cdot (t_{откл} + T_a), \text{ кА}^2 \cdot \text{с}, \quad (36)$$

где $t_{откл}$ – время КЗ, с.

$$t_{откл} = t_{p.з.} + t_{откл.B}, \text{ с}, \quad (37)$$

где $t_{p.з.}$ – время срабатывания защиты, с;

$t_{откл.B}$ – время отключения выключателя, с» [11].

$$t_{откл} = 0,025 + 0,1 = 0,125 \text{ с},$$

$$B_\kappa = 2,869^2 \cdot (0,125 + 0,07) = 8,4 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

«Наибольший ток на РУ 10 кВ подстанции, при перегрузке трансформатора 40 %:

$$I_{\text{макс}} = \frac{S_{н.т.} \cdot 1,4}{\sqrt{3} \cdot U_n}, \quad (38)$$

$$I_{\text{макс}} = \frac{1000 \cdot 1,4}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 77 \text{ А}.$$

Выбираются выключатели нагрузки ВНРп-10/400-10з, внешний вид показан на рисунке 2.

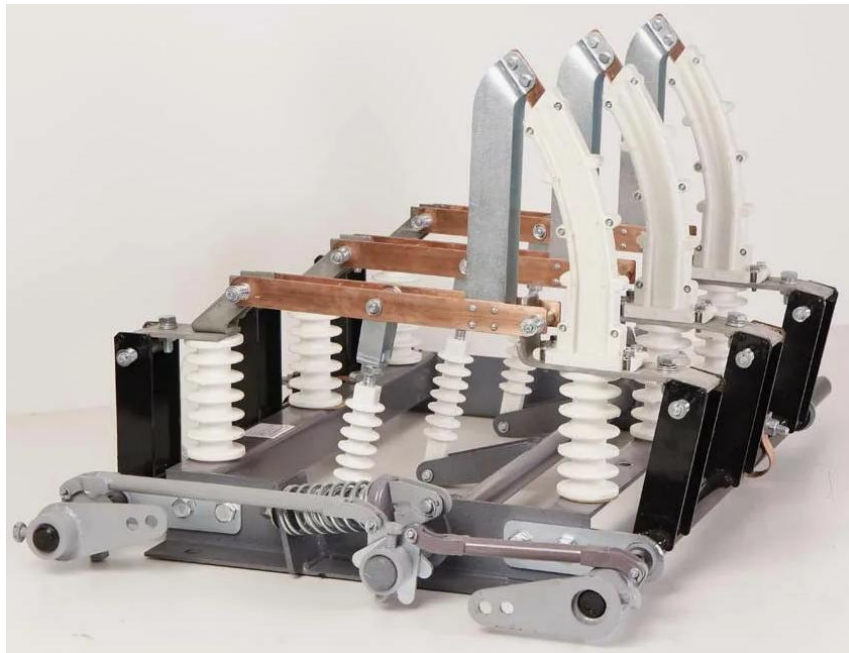


Рисунок 2 – Выключатель нагрузки ВНРП-10/400-10з

Проверка ВН по условиям выбора (32-35):

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

$$I_{ном} = 400 \text{ А} \geq I_{раб} = 77 \text{ А},$$

$$I_{ном.откл} = 20 \text{ кА} \geq I_{к} = 2,869 \text{ кА},$$

$$i_{пр.с} = 31,5 \text{ кА} \geq i_{у} = 3,359 \text{ кА},$$

$$I_m^2 \cdot 3 = 1200 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \geq B_{к} = 8,4 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

ВН подходят по всем условиям» [11].

Принимаются ТТ марки ТШЛ-0,66/2500.

«Условия выбора ТТ:

$$U_{н.ант.} \geq U_{н.уст.}, \quad (39)$$

$$I_{1н.} \geq I_{раб. max.}, \quad (40)$$

$$Z_{н} \geq Z_{2\Sigma}. \quad (41)$$

Проверка на термическую и динамическую стойкость:

$$(\kappa_{тер.} \cdot I_{1н.})^2 \cdot t_{тер.} \geq B_{\kappa}, \quad (42)$$

$$i_{дин.} = \kappa_{эд} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1н.} \geq i_y, \quad (43)$$

где $\kappa_{тер.}$, $\kappa_{эд}$ – кратности стойкости;

$I_{1н.}$ – номинальный ток ТТ, кА» [11].

Проверка выбранных ТТ:

$$U_{н.анп.} = 0,66 \text{ кВ} \geq U_{н.уст.} = 0,4 \text{ кВ},$$

$$I_{1н.} = 2500 \text{ А} \geq I_{раб.мах.} = 2021 \text{ А},$$

$$(60 \cdot 2,5)^2 \cdot 3 = 67500 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} > 3,1 \text{ кА}^2 \cdot \text{с},$$

$$65 \cdot \sqrt{2} \cdot 2,5 = 230 \text{ кА} > 2,991 \text{ кА}.$$

«Сопротивление нагрузки:

$$Z_{2\Sigma} = Z_{приб.} + Z_{пров.} + Z_{конт.}, \quad (44)$$

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

$$Z_{пров.} = \frac{l_{пров.} \cdot \rho}{S_{пров.}}, \quad (45)$$

где $l_{пров.}$ – длина проводов, м;

ρ – удельное сопротивление, Ом·мм²/м;

$S_{пров.}$ – сечение, мм².

$$Z_{\text{приб.}} = \frac{S_{\text{приб.}}}{I_{\text{н.приб}}^2}, \quad (46)$$

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

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

$$Z_{\text{пров.}} = \frac{25 \cdot 0,0175}{4} = 0,109 \text{ Ом},$$

$$Z_{2\Sigma} = 0,04 + 0,109 + 0,1 = 0,249 \text{ Ом}.$$

Погрешность ТТ составит менее 10%.

ТТ подходят, внешний вид ТТ показан на рисунке 3.



Рисунок 3 – Трансформаторы тока ТШЛ-0,66

Новые современные ТТ обеспечат высокую точность и надежность системы измерений» [11].

2.8 Релейная защита и автоматика, расчет уставок защит

Микропроцессорная релейная защита и автоматика (МРЗА) представляют собой важный элемент современных электрических систем, обеспечивая надежность, безопасность и эффективность работы энергетических объектов. С развитием технологий и увеличением сложности электрических сетей необходимость в высокотехнологичных решениях становится все более актуальной. МРЗА основана на использовании микропроцессоров для обработки информации о состоянии электрической сети. В отличие от традиционных реле, которые работают на основе электромеханических принципов, МРЗА использует цифровые технологии для анализа параметров сети, таких как ток, напряжение, частота и другие, это позволяет значительно повысить точность и скорость срабатывания защитных устройств. Микропроцессорные терминалы способны выполнять множество функций, включая защиту от перегрузок, коротких замыканий, асимметрии фаз и других аварийных ситуаций, они могут также осуществлять мониторинг состояния оборудования, что позволяет заранее выявлять потенциальные проблемы и предотвращать аварии. В условиях растущих потребностей в электроэнергии и увеличения нагрузки на сети, автоматизация процессов защиты сетей становится необходимостью.

Защита питающей сети 10 кВ будет обеспечиваться терминалами марки Сириус-2МЛ-02, их ключевые преимущества:

- отечественное производство;
- надежный и проверенный производитель и поставщик;
- поставляемое производителем удобное и интуитивно понятно программное обеспечение (ПО);
- данные терминалы хорошо зарекомендовали себя в электрических сетях городов и предприятий;
- современная элементная база, высокое качество изготовления.

Внешний вид терминала показан на рисунке 4.



Рисунок 4 – Терминал Сириус-2МЛ-02

Определяются уставки защит.

«Токовая отсечка (ТО):

$$I_{C3} \geq K_{отс} \cdot I_{НОМ.ЛЭП}, \quad (47)$$

где $K_{отс}$ – коэффициент отстройки;

$I_{НОМ.ЛЭП}$ – номинальный ток линии электропередачи, кА.

$$I_{C3} \geq 5 \cdot 0,1617 = 0,8085 \text{ кА}$$

МТЗ:

$$I_{C3} \geq \frac{K_H \cdot K_{C3}}{K_B} \cdot I_{p.макс}, \quad (48)$$

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

K_H , K_{C3} , K_B – коэффициенты надежности, самозапуска и возврата.

$$I_{C3} \geq \frac{1,1 \cdot 1,18}{0,935} \cdot 161,7 = 1,388 \cdot 161,7 = 224,48 \text{ А}$$

Ток срабатывания реле:

$$I_{CP} = I_{C3} \cdot \frac{k_{cx}}{n_T}, \quad (49)$$

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

Коэффициент чувствительности защиты» [2]:

$$k_{\eta} = \frac{I_K^{(2)}}{I_{C3}}, \quad (50)$$

$$I_{CP} = 224,48 \cdot \frac{1}{200 / 5} = 5,61 \text{ А},$$

$$k_{\eta} = \frac{2485}{224,48} = 11,1 \geq 1,5.$$

«Защита от замыканий на землю (ЗНЗ).

Ток срабатывания:

$$I_{C.3.} \geq k_{OTC} \cdot k_B \cdot I_C, \quad (51)$$

где k_{OTC} , k_B – коэффициенты отстройки и броска емкостного тока,

I_C – ёмкостный ток присоединения, А.

$$I_C = I_{CO} \cdot L, \quad (52)$$

где I_{CO} – удельный емкостный ток, А/км;

L – длина линии, км» [6].

$$I_C = 1,47 \cdot 1,21 = 1,779 \text{ A},$$

$$I_{C.3.} \geq 1,2 \cdot 2,5 \cdot 1,779 = 5,336 \text{ A}.$$

«АВР на шинах 0,4 кВ подстанций выполняется на терминале Сириус-АВР.

Уставка АВР:

$$U_{C.P} = 0,7 \cdot U_{НОМ}, \quad (53)$$

где $U_{НОМ}$ – напряжение сети, В.

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

Уставка реле контроля напряжения на резервном вводе:

$$U_{C.P} = (0,6 \div 0,65) \cdot U_{НОМ}, \quad (54)$$

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

Уставка реле времени:

$$t_{C.P.ABP} = t_1 + \Delta t, \quad (55)$$

где t_1 – время срабатывания АВ, с;

Δt – ступень селективности, с» [10].

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

Одним из главных преимуществ МРЗА является высокая степень автоматизации, микропроцессорные реле могут быть интегрированы в системы управления, что позволяет осуществлять удаленный мониторинг и управление защитными функциями. Это значительно упрощает

эксплуатацию и «обслуживание электрических сетей, а также повышает их надежность. Кроме того, микропроцессорные реле обладают возможностью программирования и настройки под конкретные условия эксплуатации, это позволяет адаптировать защитные функции под требования конкретного объекта, что делает их универсальными и эффективными» [2]. Системы МРЗА могут быть интегрированы в более широкие системы управления, такие как SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), что позволяет осуществлять комплексный мониторинг и управление энергетическими объектами. Это способствует повышению уровня надежности и безопасности, а также снижению затрат на эксплуатацию и обслуживание.

2.9 Расчет заземляющего устройства подстанций, молниезащита подстанций

Эффективное заземляющее устройство подстанций необходимо для надежной и безопасной работы электрооборудования и обеспечения электробезопасности.

«Удельное сопротивление грунта для вертикальных (ВЭ) и горизонтальных (ГЭ) электродов:

$$\rho_p = \rho \cdot K_c, \quad (56)$$

где ρ – удельное сопротивление грунта, Ом · м;

K_c – коэффициент сезонности.

$$\rho_{pв} = 500 \cdot 1,1 = 550 \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

$$\rho_{pг} = 500 \cdot 1,4 = 700 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Для ВЭ используем угловую сталь 50х50 мм, для ГЭ используем полосовую сталь 50х5 мм. Сопротивление растеканию для одного ВЭ:

$$R_{\text{огэ}} = \frac{\rho_{\text{пв}}}{2 \cdot \pi \cdot l} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot l}{d} \right) + 0,5 \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot t + l}{4 \cdot t - l} \right) \right], \quad (57)$$

где l – длина ВЭ, м;

d – приведенный диаметр, м;

t – расстояние от поверхности до центра ВЭ, м.

$$d = 0,95 \cdot b, \quad (58)$$

где b – ширина уголка, м.

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

$$t = 3 / 2 + 0,8 = 2,3 \text{ м},$$

$$R_{\text{огэ}} = \frac{550}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot 3}{0,0475} \right) + 0,5 \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot 2,3 + 3}{4 \cdot 2,3 - 3} \right) \right] = 62,195 \text{ Ом}.$$

Расчетное число ВЭ:

$$n' = R_{\text{огэ}} / R_{\text{н}}, \quad (59)$$

где $R_{\text{н}}$ – наибольшее допустимое сопротивление ЗУ, Ом» [7].

$$n' = 62,195 / 4 \approx 16 \text{ шт.}$$

«Длина ГЭ:

$$l_z = 1,05 \cdot a \cdot n', \quad (60)$$

где a – расстояние между ВЭ, м.

$$a = l_{\text{пер}} / n', \quad (61)$$

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

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

$$a = 32,6 / 16 = 2,04 \text{ м},$$

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

Сопротивление растеканию ГЭ:

$$R_{z3} = \frac{\rho_{pz}}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left(\frac{l^2}{d \cdot t} \right), \quad (62)$$

$$d = 0,5 \cdot b, \quad (63)$$

где b – ширина полосы, м.

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

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

$$R_{z3} = \frac{700}{2 \cdot 3,14 \cdot 34,27} \cdot \ln \left(\frac{34,27^2}{0,025 \cdot 0,825} \right) = 2,624 \text{ Ом}.$$

Эквивалентное сопротивление ЗУ:

$$R_{zp} = \frac{R_{ог3} \cdot R_{z3}}{R_{ог3} \cdot \eta_6 \cdot n + R_{z3} \cdot \eta_z}, \quad (64)$$

где η_6 , η_z – коэффициенты использования ВЭ и ГЭ.

$$R_{zp} = \frac{62,195 \cdot 2,625}{62,195 \cdot 0,51 \cdot 16 + 2,624 \cdot 0,3} = 3,805 \text{ Ом} < 4 \text{ Ом}.$$

Расчетное сопротивление ЗУ менее предельно допустимого, надежная защита людей и оборудования будет обеспечиваться» [7].

Заземляющие электроды устанавливаются в грунт на определенной глубине и расстоянии друг от друга, важно обеспечить хороший контакт с

землей, чтобы снизить сопротивление заземления. После установки электродов производится соединение заземляющих проводников с оборудованием подстанции, все соединения должны быть надежными и защищенными от коррозии. После завершения монтажа необходимо провести тестирование системы заземления, чтобы убедиться в ее эффективности. Измеряется сопротивление заземления, и при необходимости вносятся коррективы. При монтаже системы заземления необходимо соблюдать требования и нормы, установленные национальными и международными стандартами. Это включает в себя правила по минимальному сопротивлению заземления, выбор материалов, а также требования к безопасности и надежности. Эффективная система заземления обеспечивает безопасность работы электрических сетей, защищает оборудование и персонал от аварийных ситуаций, а также способствует стабильной работе энергетических систем.

«Молниезащита ТП является важным аспектом обеспечения безопасности работы СЭС. Она включает в себя комплекс мер, направленных на предотвращение воздействия молнии на оборудование и снижение риска аварийных ситуаций. В данном случае выбраны комплектные ТП в цельнометаллическом корпусе, соединенном с ЗУ, в этом случае, согласно ПУЭ, дополнительные меры по молниезащите не требуются» [16].

Вывод по разделу.

Выполнена разработка системы электроснабжения микрорайона. Определены электрические нагрузки по зданиям и микрорайону в целом, согласно которым выбраны силовые трансформаторы на подстанциях и кабели электрической сети. Рассчитаны рабочие и аварийные режимы сети, выбрано электрооборудование подстанций, оборудование и уставки микропроцессорной релейной защиты и автоматики. Проведен расчет заземляющего устройства подстанций, эквивалентное сопротивление будет менее предельно допустимого.

Заключение

В рамках развития инфраструктуры г. Владивосток планируется постройка нового микрорайона с большим числом жилых, коммерческих, административных и общественных зданий со значительным числом электроприемников внутри них. В состав электроприемников будут входить различные электроприводы санитарно-технических устройств, электронно-бытовая техника, освещение, оргтехника и другие потребители электроэнергии, требующие обязательного питания электроэнергией для своей работы. Для ввода в эксплуатацию зданий и микрорайона в целом в данной работе проведена разработка системы электроснабжения, при реализации предлагаемого проекта СЭС будет обеспечено качественное и надежное электроснабжение потребителей электроэнергии микрорайона. Рассматриваемый жилой микрорайон города – это организованная территория, включающая жилые дома, объекты социальной инфраструктуры и благоустройства, он будет являться важной составляющей городской среды, обеспечивая комфортное проживание жителей. Его постройка позволит удовлетворить потребности различных слоёв населения в современном жилье и создать комфортную среду для всех жителей. Надежное электроснабжение микрорайона является неотъемлемой частью его инфраструктуры, обеспечивающей не только комфорт, но и безопасность его жителей. Этот аспект не только влияет на повседневную жизнь людей, но и напрямую влияет на экономическое развитие региона. В основном, инфраструктура МКР включает современные многоэтажные жилые дома из кирпича, с газовыми плитами. В каждом подъезде предусмотрены пассажирские лифты. Также имеются различные социально-общественные и торгово-административные здания (кафе, магазины, офисные здания, супермаркеты, детсад, школы, котельные, оздоровительный комплекс). Основная часть зданий относится к первой категории надежности электроснабжения – жилые дома ввиду наличия лифтов, детсад, школы и

оздоровительный комплекс ввиду систем пожаротушения, котельные ввиду важности обеспечения их бесперебойной работы для отопления микрорайона. Остальные здания относятся ко второй категории надежности электроснабжения.

Определены электрические нагрузки по зданиям и микрорайону в целом, согласно которым выбраны энергоэффективные силовые трансформаторы серии ТМГ12 на подстанциях и кабели электрической сети марок АПвБП и АВБШв. Необходимо обеспечить возможность индивидуального отключения и вывода в ремонт всех участков электрической сети по отдельным потребителям, ввиду этого принимается радиальная схема питания зданий от ТП и кольцевая схема питания ТП. «Основным преимуществом данной схемы является её высокая надёжность, в случае аварии на одной из линий, питание остальных потребителей не нарушается, это снижает риск длительных отключений и перебоев в электроснабжении» [12]. Кроме того, радиальная схема позволяет легко модернизировать и расширять систему электроснабжения, добавление новых потребителей или изменение схемы подключения не потребует значительных затрат и времени, так как линии питания уже разделены и независимы друг от друга. Одним из ключевых преимуществ выбранных кабелей является их высокая изоляционная способность. В отличие от традиционных кабелей с бумажной или резиновой изоляцией, СПЭ-изоляция устойчива к механическим повреждениям и химическим воздействиям, что значительно увеличивает срок службы кабеля и снижает риск коротких замыканий.

Рассчитаны рабочие и аварийные режимы сети, выбрано электрооборудование подстанций, оборудование и уставки РЗА. Проведен расчет заземляющего устройства подстанций, эквивалентное сопротивление будет менее предельно допустимого. Реализация электроснабжения микрорайона согласно предложенному проекту обеспечит надежное и эффективное питание электрической энергией всех потребителей и позволит ввести данный 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. Галишников Ю. П. Трансформаторы и электрические машины : курс лекций. М. : Инфра-Инженерия, 2021. 216 с.
5. Головатый С. Е. Охрана окружающей среды и энергосбережение : учебное пособие. Минск : РИПО, 2021. 304 с.
6. Горемыкин С. А. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем : учебное пособие. М. : ИНФРА-М, 2023. 191 с.
7. Грунтович Н. В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования : учебное пособие. М. : ИНФРА-М, 2023. 271 с.
8. Иванов С.Н. Надежность электроснабжения : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2022. 164 с.
9. Кобозев В.А. Качество электроэнергии и энергоэффективность систем электроснабжения потребителей : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2022. 356 с.
10. Куксин А. В. Релейная защита электроэнергетических систем : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2021. 200 с.
11. Немировский А. Е. Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2023. 176 с.
12. Ополева Г.Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов: Учебное пособие. М. : Форум, 2022. 416 с.

13. Петухов Р.А. Электроснабжение : учебное пособие. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2022. 328 с.
14. Правила устройства электроустановок: действующие разделы 6-го и 7-го изданий. М. : ИНФРА-М, 2023. 832 с.
15. 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 07.05.2024).
16. Сибикин Ю. Д. Современные электрические подстанции : учебное пособие. – 2-е изд., доп. М. : ИНФРА-М, 2023. 417 с.
17. Сибикин Ю. Д. Технология энергосбережения : учебник. – 4-е изд., перераб. и доп. М. : ИНФРА-М, 2023. 336 с.
18. Сибикин Ю.Д. Электроснабжение : учебное пособие. – 2-е изд., стер. М. : ИНФРА-М, 2023. 328 с.
19. 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.
20. Шеховцов В.П. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению : учебное пособие. – 3-е изд. М. : ИНФРА-М, 2023. 136 с.