

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

К.А. Ланкин

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., Д.А. Кретов

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

Аннотация

Актуальность работы усиливается и глобальными вызовами: необходимостью снижения потерь электроэнергии в условиях роста тарифов, внедрения возобновляемых источников энергии и повышения экологической ответственности городов. Разработка системы электроснабжения микрорайона напрямую связана с решением этих проблем, предлагая энергоэффективные решения, которые могут сократить углеродный след и повысить устойчивость городской среды. Кроме того, проект имеет социальное значение, так как обеспечивает жителям доступ к стабильному энергоснабжению, что особенно важно для семей с детьми, пожилых людей и учреждений здравоохранения.

Целью данной выпускной квалификационной работы (ВКР) является разработка системы электроснабжения микрорайона города на 10000 жителей, которая обеспечит стабильное питание всех потребителей, оптимальное распределение электрических нагрузок и соответствие современным нормативным требованиям.

В соответствии с поставленной целью задачи ВКР:

- анализ характеристик микрорайона города на 10000 жителей;
- определение ожидаемых электрических нагрузок;
- разработка схем и выбор оборудования сетей внешнего и внутреннего электроснабжения.

ВКР представляет собой пояснительную записку, состоящую из введения, пяти разделов, заключения, списка используемой литературы и используемых источников и графической части на 6 листах формата А1. Пояснительная записка выполнена на 72 листах формата А4, содержит 16 таблиц и 7 рисунков.

Содержание

Введение	4
1 Характеристика проектируемого микрорайона	6
2 Расчёт электрических нагрузок	10
2.1 Определения расчётных нагрузок потребителей микрорайона	10
2.1.1 Определение расчётных нагрузок жилых зданий	10
2.1.2 Определения расчётных нагрузок общественных зданий	12
2.1.3 Графики электрических нагрузок микрорайона	14
2.2 Расчёт сетей наружного освещения	18
2.3 Построение картограммы электрических нагрузок	19
3 Выбор и расчёт схем сетей внешнего и внутреннего электроснабжения	22
3.1 Выбор числа и мощности трансформаторов	22
3.2 Расчёт электрических сетей низкого напряжения	29
3.3 Расчёт электрических сетей высокого напряжения	37
4 Расчёт токов короткого замыкания	42
5 Выбор электрооборудования микрорайона	54
5.1 Выбор и проверка оборудования на напряжение 10 кВ	54
5.2 Выбор и проверка оборудования на напряжение 0,4 кВ	61
Заключение	68
Список используемой литературы и используемых источников	70

Введение

Электроснабжение жилых микрорайонов является одной из ключевых задач современной энергетики, обеспечивающей комфортные условия жизни, функционирование коммунальной инфраструктуры и развитие городской среды. Микрорайон на 10 000 жителей представляет собой сложный объект, включающий жилые дома, общественные здания, уличное освещение и инженерные системы, что требует разработки надежной, эффективной и безопасной системы энергоснабжения. Рост урбанизации, увеличение плотности населения и повышение требований к качеству электроэнергии делают проектирование таких систем актуальной инженерной задачей, связанной с обеспечением бесперебойности питания и минимизацией эксплуатационных затрат.

Актуальность работы усиливается и глобальными вызовами: необходимостью снижения потерь электроэнергии в условиях роста тарифов, внедрения возобновляемых источников энергии и повышения экологической ответственности городов. Разработка системы электроснабжения микрорайона напрямую связана с решением этих проблем, предлагая энергоэффективные решения, которые могут сократить углеродный след и повысить устойчивость городской среды. Кроме того, проект имеет социальное значение, так как обеспечивает жителям доступ к стабильному энергоснабжению, что особенно важно для семей с детьми, пожилых людей и учреждений здравоохранения.

Объектом исследования в данной работе является микрорайон города, рассчитанный на проживание 10 000 человек, включающий жилые здания, объекты социальной инфраструктуры и уличное освещение, а предметом исследования – система электроснабжения этого микрорайона, охватывающая ее архитектуру, параметры и технические решения.

Целью данной выпускной квалификационной работы является разработка системы электроснабжения микрорайона города на 10 000

жителей, которая обеспечит стабильное питание всех потребителей, оптимальное распределение электрических нагрузок и соответствие современным нормативным требованиям.

В соответствии с поставленной целью задачи ВКР:

- анализ характеристик микрорайона города на 10000 жителей;
- определение ожидаемых электрических нагрузок;
- разработка схем и выбор оборудования сетей внешнего и внутреннего электроснабжения.

В процессе исследования применяются разнообразные методы. Расчет электрических нагрузок выполняется аналитическим способом с использованием коэффициентов спроса и данных о типичном энергопотреблении жилых домов, основанных на нормах ПУЭ и СП. Выбор трансформаторов и кабельных линий осуществляется путем сравнительного анализа их характеристик с применением технико–экономического обоснования.

Результаты работы обладают практической ценностью для реализации проектов электроснабжения жилых зон и могут стать отправной точкой для исследований в области интеграции "зеленых" технологий в городскую энергетику.

1 Характеристика проектируемого микрорайона

Проектируемый микрорайон представляет собой жилую территорию городского типа, рассчитанную на проживание 10000 жителей. Расположенный в черте города, он включает разнообразные объекты жилой и социальной инфраструктуры, что определяет его как многофункциональный комплекс с повышенными требованиями к системе электроснабжения. Общая площадь микрорайона условно составляет около 50–60 гектаров, что соответствует типичным параметрам застройки для такого числа жителей, с учетом плотности населения примерно 200 человек на гектар.

Основу жилого фонда составляют пятиэтажные дома с различным числом подъездов и квартир. В микрорайоне расположено около 47 таких зданий, преимущественно панельных или кирпичных, построенных по нетиповым проектам, обеспечивающим комфортную жизнь жителям. Количество подъездов в домах варьируется от 3 до 9, а число квартир в каждом доме — от 54 до 170. Средняя площадь квартиры составляет 50–60 м², что соответствует стандартам для семейного жилья. Общее число квартир в микрорайоне оценивается в 3600 единиц, что обеспечивает проживание 10 000 человек при средней численности семьи 3 человека.

На территории микрорайона также расположены общественные здания, выполняющие социальные и образовательные функции. К ним относятся нижеприведенные учреждения.

Детские сады – 3 учреждения, каждое рассчитано на 320 мест (общая вместимость около 960 детей). Площадь каждого детского сада составляет примерно 1500–2000 м², включая игровые зоны и хозяйственные помещения.

Среднеобразовательные школы – 2 школы, каждая на 900 учащихся (общая вместимость около 1800 человек). Площадь зданий – около 5000–6000 м² с учетом классов, спортзалов и столовых.

Торговый центр – одно здание площадью 1500 м², включающее магазины, зоны отдыха и административные помещения, обслуживающее жителей микрорайона.

Начальная школа – образовательное учреждение, рассчитанное на одновременное пребывание 180 обучающихся младших классов и расчетной площадью здания около 2000 м².

Вечерняя школа – объект для обучения взрослых или учащихся с особым графиком, вместимостью до 90 человек, площадью около 1500 м².

Техникум – профессиональное учебное заведение на 300 студентов, площадь около 4000 м², с учебными мастерскими и аудиториями.

Кроме того, в микрорайоне предусмотрены зоны общего пользования: парки, детские площадки, автомобильные парковки и сеть уличного освещения, охватывающая основные дороги и пешеходные пути. Общая протяженность дорог оценивается в 10–15 км. Условия эксплуатации характеризуются умеренным климатом с температурой от –20 °С зимой до +35 °С летом, что влияет на выбор оборудования и материалов для системы электроснабжения.

Электрические потребители микрорайона включают бытовые нагрузки (освещение, бытовая техника), системы отопления и вентиляции в общественных зданиях, а также наружное освещение. Жилые дома, детские сады и школы относятся ко второй категории надежности электроснабжения (перерыв до 24 часов). Торговый центр и уличное освещение требуют стабильного питания с учетом пиковых нагрузок в вечернее время. Характеристики микрорайона определяют необходимость разработки системы электроснабжения с высокой степенью резервирования и энергоэффективности, что будет учтено в последующих разделах работы.

Ландшафт микрорайона без сильных неровностей. Для электроснабжения потребителей используются отдельно стоящие трансформаторные подстанции. План микрорайона приведен на рисунке 1.

Таблица 2 – Характеристики общественных зданий рассматриваемого микрорайона

Номер здания на плане	Название	Место	м ²
16,13а,20а	Детский сад	320	–
23,29	Среднеобразовательная школа	900	–
22а	Торговый центр	–	1500
16а.	Начальная школа	180	–
12а.	Вечерняя школа	90	–
41.	Техникум	300	–

Выводы по разделу 1

В первом разделе ВКР проведена детальная характеристика проектируемого микрорайона на 10 000 жителей, что позволило сформировать полное представление о его составе и потребностях в электроснабжении. Установлено, что микрорайон включает 47 пятиэтажных жилых домов с общим числом квартир 3600, обеспечивающих жилье для населения, а также ряд общественных зданий: три детских сада, две среднеобразовательные школы, торговый центр, начальную и вечернюю школы и техникум. Эти объекты определяют разнообразие электрических потребителей – от бытовых нагрузок в квартирах до мощных систем вентиляции и освещения в общественных зданиях, что подчеркивает сложность задачи проектирования энергоснабжения.

Анализ показал, что микрорайон требует дифференцированного подхода к электроснабжению с учетом категорий надежности: жилые дома и социальные учреждения относятся ко второй категории, а торговый центр и уличное освещение нуждаются в стабильном питании в пиковые часы. Площадь микрорайона (50–60 га) и протяженность дорог (10–15 км) указывают на необходимость рационального размещения подстанций и линий электропередачи. Полученные данные о структуре, размерах зданий и условиях эксплуатации стали основой для последующих расчетов электрических нагрузок и выбора оборудования, обеспечивая разработку эффективной и надежной системы энергоснабжения.

2 Расчёт электрических нагрузок

2.1 Определения расчётных нагрузок потребителей микрорайона

2.1.1 Определение расчётных нагрузок жилых зданий

«Электрические нагрузки жилых квартир являются случайными, зависят от уклада жизни различных семей, набора электроприёмников. Нагрузка жилых зданий существенно меняется в течении суток в зависимости от времени года» [24].

«Принято нормировать электрические нагрузки в киловаттах на квартиру (семью), причём по мере увеличения количества квартир, присоединённых к данному элементу сети, удельная нагрузка снижается» [5].

«Утверждённые расчётные удельные нагрузки на квартиру приняты для периода зимнего максимума, т.е. для периода наибольших нагрузок в жилых зданиях. В значениях удельных нагрузок отдельных фаз, что особенно важно для жилых домов с электроплитами, где ток в нулевом проводе может достигать 50%, тока в фазе. Удельная нагрузка квартир включает в себя нагрузку освещения общедомовых помещений» [25].

Расчётные нагрузки определяются согласно [14] и [11].

«Расчётная электрическая нагрузка от жилых квартир на вводах в здание, линиях, питающих жилой дом или группы жилых домов, определяется в зависимости от числа квартир» [22]:

$$P_{p.kv.} = P_{kv.уд.} \cdot n, \quad (1)$$

где $P_{kv.уд.}$ – удельная нагрузка электроприёмников квартир жилых домов,

кВт/кв., принимается в зависимости от числа квартир [14];

n – число квартир, шт.

Расчётная реактивная нагрузка жилого дома квартир определяется по формуле [11]:

$$Q_{p.ж.д.} = P_{p.кв.} \cdot \operatorname{tg}\varphi_{кв.}, \quad (2)$$

где $\cos\varphi_{кв.}$ – расчётный коэффициент мощности для квартир с электрическими плитами принимаемый 0,98.

Полная нагрузка жилого дома:

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

Определяется расчётную нагрузку на ввод в жилой пятиэтажный дом №5 на 56 квартир с электрическими плитами.

Для 56 квартир дома №5 удельная мощность с учётом интерполяции составит $P_{кв.уд.} = 1,75$ кВт/кв.

Определения удельной мощности электроприёмников квартир следующих жилых домов, аналогичен предыдущему. Результаты расчёта сведены в таблицу 3.

Расчётная электрическая нагрузка квартир.

Согласно [14] удельная расчётная нагрузка, используется для квартир общей площадью до 55 м². При общей площади квартир более 55 м² удельная нагрузка увеличивается на 0,5% на каждый 1 м² дополнительной площади в домах с электрическими плитами.

Расчётная активная нагрузка жилого дома:

$$P_{p.ж.д.} = 1,57 \cdot 56 = 98 \text{ кВт.}$$

Расчётная реактивная нагрузка жилого дома:

$$Q_{p.ж.д.} = 98 \cdot \operatorname{tg}(\cos(0,98)) = 19,6 \text{ квар.}$$

Полная нагрузка жилого дома:

$$S_{p.ж.д.} = \sqrt{98^2 + 19,6^2} = 99,9 \text{ кВА.}$$

Расчёт полной электрической мощности для следующих жилых домов аналогичен предыдущему. Результаты расчёта сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Результаты расчёта нагрузок жилых зданий

Потребители с номером на генплане	п, шт	Ркв.уд, кВ/кВ	Ркв, кВт	Qp.ж.д., квар	Sp.ж.д., кВ А
10,14,18,22	54	1,76	102,24	27,432	105,86
5,19ч,18,15,	56	1,75	98	19,6	99,9
14/4,14/5,6,12,16,20,24	70	1,65	115,5	23,1	117,78
28а,27	72	1,64	118,08	23,62	120,42
7,11,13,15,12,14,14/1,14/6,16,20,22,24,2 6,28,30,32,30а,37,39,17,19,21,25,35,33,3 1,8	80	1,6	128	25,6	130,53
14/2.	96	1,52	145,92	29,184	148,81
14/3.	100	1,5	150	30	152,97
18/1.	170	1,402	238,34	47,67	243,06

2.1.2 Определения расчётных нагрузок общественных зданий

«Электрические нагрузки любого общественного здания состоят из нагрузок электрического освещения и силового электрооборудования. Установленная мощность ламп электрического освещения определяется на основании светотехнических расчётов» [24].

Расчётная силовая электрическая нагрузка на вводах в общественное здание определяется по проектам электрооборудования этих зданий. Для ориентировочных расчётов усреднённые удельные нагрузки допускаются принимать по таблицам удельных показателей нагрузок, приведённых в [14] с учётом внутреннего освещения.

Методика расчёта электрических нагрузок общественных зданий приведена в [14].

Расчётная активная нагрузка общественного здания, кВт, определяется по формуле:

$$P_{\text{р.об.зд.}} = P_{\text{уд.}} \cdot n, \quad (4)$$

где $P_{\text{уд.}}$ – удельная нагрузка электроприёмников общественных зданий, кВт, [14];

n – количество мест, учащихся и т.д.

Расчётная реактивная нагрузка общественного здания:

$$Q_{\text{р.об.зд.}} = P_{\text{р.об.зд.}} \cdot \text{tg}(\arccos(\cos\varphi)), \quad (5)$$

где $\cos\varphi$ – принимается по [1].

Полная нагрузка общественного здания:

$$S_{\text{р.об.зд.}} = \sqrt{P_{\text{р.об.зд.}}^2 + Q_{\text{р.об.зд.}}^2}. \quad (6)$$

Для детского сада на 320 мест удельная мощность с учётом интерполяции по [14] составит:

$$P_{\text{уд.дс.}} = 0,46 \text{ кВт/место.}$$

Определяется расчётную активную нагрузку парикмахерской

$$P_{\text{р.об.зд.}} = 0,46 \cdot 320 = 147,2 \text{ кВт.}$$

Расчётная реактивная нагрузка детского сада

$$\operatorname{tg} \varphi = 0,25,$$

$$Q_{p.об.зд.} = 147,2 \cdot 0,25 = 36,8 \text{ квар.}$$

Полная нагрузка общественного здания составит

$$S_{p.об.зд.} = \sqrt{147,2^2 + 36,8^2} = 151,73 \text{ квар.}$$

Результаты расчёта сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Результаты расчёта нагрузки общественных зданий

Потребители с номером на генплане	Название	Место	м ²	Руд., кВт/мест	Руд., кВт/м ²	Робз., кВт	cosφ	Qp.обз., квар	Sp.обз., кВА
16,13а,20а	Детский сад	320		0,46	–	147,2	0,97	36,8	151,73
23,29.	Средняя школа	900		0,25		225	0,95	85,5	240,7
22а	Торговый центр		1500	–	0,16	240	0,9	115,2	266,22
16а.	Начальная школа	180		0,25	–	45	0,95	17,1	48,14
12а.	Вечерняя школа	90		0,17		15,3	0,92	6,58	16,66
41.	Техникум	300		0,46		138	0,8	69	154,29

2.1.3 Графики электрических нагрузок микрорайона

«Графики нагрузок микрорайона в целом дают возможность определить потребление активной энергии микрорайона, правильно и рационально выбирать силовые трансформаторы и питающие линии и, кроме того, выполнить наиболее рациональную схему электроснабжения. Зная максимум нагрузки и её колебания за сутки, можно установить максимальную мощность трансформаторной подстанции и выбрать число и мощность трансформаторов» [5].

Площадь суточного графика в определённом масштабе выражает количество электрической энергии, использованной потребителем за сутки.

По графикам планируется текущий и капитальный ремонт элементов систем электроснабжения. Суточный график (зимний и летний) построен с учётом типовых графиков нагрузки. Типовые усредненные графики приведены в [2], также в типовых проектах микрорайона.

Результаты расчёта суточных графиков нагрузки приведены в таблице 5.

По данным графика определяем число часов использования максимума нагрузки:

$$T_m = \frac{W_{\text{год}}}{P_{\text{мах.з.}}}, \quad (7)$$

где $W_{\text{год}}$ – годовой расход электроэнергии, кВт·ч;

$P_{\text{мах.з.}}$ – максимальная нагрузка за зимний период, кВт.

Определяется годовой расход электроэнергии:

$$\begin{aligned} W_{\text{год}} &= \sum P_i \cdot t_i, \\ W_{\text{год}} &= 21881773 \text{ кВт·ч}, \\ T_m &= \frac{21881773}{5298,7} = 4129,6 \text{ ч} \end{aligned} \quad (8)$$

Определим время максимальных потерь:

$$\begin{aligned} \tau_m &= (0,124 + T_m \cdot 10^{-4})^2 \cdot 8760, \\ \tau_m &= (0,124 + 4129,6 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 8760 = 2525,8 \text{ ч}. \end{aligned} \quad (9)$$

Таблица 5 – Результаты расчёта суточных графиков нагрузки

Часы	Жилые дома				Детский сад 16,13а,20а				школа 23,29.16а техникум				Торговый центр				Вечерняя школа				Суммарна я	
	Зима		Лето		Зима		Лето		Зима		Лето		Зима		Лето		Зима		Лето			
	%	Р	%	Р	%	Р	%	Р	%	Р	%	Р	%	Р	%	Р	%	Р	%	Р	Зима	Лето
0–1	15	630,11	15	504,08	20	23,7	20	79,2	10	63,3	10	50,64	60	144	60	115,2	10	1,53	10	1,22	863	750
1–2	15	630,11	15	504,08	20	23,7	20	79,2	10	63,3	10	50,64	60	144	60	115,2	10	1,53	10	1,22	863	750
2–3	15	630,11	15	504,08	20	23,7	20	79,2	10	63,3	10	50,64	60	144	60	115,2	10	1,53	10	1,22	863	750
3–4	15	630,11	15	504,08	20	23,7	20	79,2	10	63,3	10	50,64	60	144	60	115,2	10	1,53	10	1,22	863	750
4–5	15	630,11	15	504,08	20	23,7	20	79,2	10	63,3	10	50,64	60	144	60	115,2	10	1,53	10	1,22	863	750
5–6	15	630,11	15	504,08	20	23,7	20	79,2	10	63,3	10	50,64	60	144	60	115,2	10	1,53	10	1,22	863	750
6–7	60	2520,42	60	2016,34	35	173,25	35	138,6	20	126,6	20	101,28	60	144	60	115,2	10	1,53	10	1,22	2966	2373
7–8	60	2520,42	60	2016,34	35	173,25	35	138,6	20	126,6	20	101,28	60	144	60	115,2	10	1,53	10	1,22	2966	2373
8–9	50	2100,35	50	1680,28	65	321,75	65	257,4	60	376,8	60	303,84	90	216	90	172,8	10	1,53	10	1,22	3016	2416
9–10	50	2100,35	50	1680,28	65	321,75	65	257,4	100	633	60	303,84	90	216	90	172,8	10	1,53	10	1,22	3273	2416
10–11	50	2100,35	50	1680,28	100	495	100	396	100	633	60	303,84	100	240	100	192	10	1,53	10	1,22	3470	2573
11–12	50	2100,35	50	1680,28	100	495	100	396	70	443,1	100	506,4	100	240	100	192	10	1,53	10	1,22	3280	2776
12–13	50	2100,35	50	1680,28	85	420,75	85	336,6	40	253,2	100	506,4	90	216	90	172,8	10	1,53	10	1,22	2992	2697
13–14	50	2100,35	50	1680,28	85	420,75	85	336,6	40	253,2	70	354,48	80	192	80	153,6	20	3,06	20	2,44	2969	2527
14–15	40	1680,28	40	1344,22	85	420,75	85	336,6	40	253,2	40	202,56	90	216	90	172,8	20	3,06	20	2,44	2573	2059
15–16	40	1680,28	40	1344,22	85	420,75	85	336,6	40	253,2	40	202,56	90	216	90	172,8	60	9,18	60	7,34	2579	2064
16–17	50	2100,35	50	1680,28	80	396	80	316	60	376,8	40	202,56	90	216	90	172,8	60	9,18	60	7,34	3098	2379
17–18	50	2100,35	50	1680,28	80	396	80	316	90	569,7	40	202,56	90	216	90	172,8	100	15,3	60	7,34	3297	2379
18–19	100	4200,7	50	1680,28	60	297	60	237,6	90	569,7	60	303,84	90	216	90	172,8	100	15,3	100	12,24	5299	2407
19–20	100	4200,7	50	1680,28	60	297	60	237,6	90	569,7	90	455,76	90	216	90	172,8	100	15,3	100	12,24	5299	2559
20–21	100	4200,7	100	3360,56	30	148,5	30	118,8	50	316,6	90	455,76	80	192	80	153,6	70	10,71	70	8,57	4869	4097
21–22	90	3780,63	100	3360,56	30	148,5	30	118,8	50	316,6	90	455,76	80	192	80	153,6	60	9,18	60	7,34	4447	4096
22–23	30	1260,21	100	3360,56	30	148,5	30	118,8	10	63,3	50	253,2	60	144	60	115,2	30	4,58	50	6,12	1621	3854
23–24	30	1260,21	90	3024,5	30	148,5	30	118,8	10	63,3	50	253,2	60	144	60	115,2	10	1,53	50	6,12	1618	3518

Зимний и летний суточный график потребления электроэнергии построены на рисунке 2.

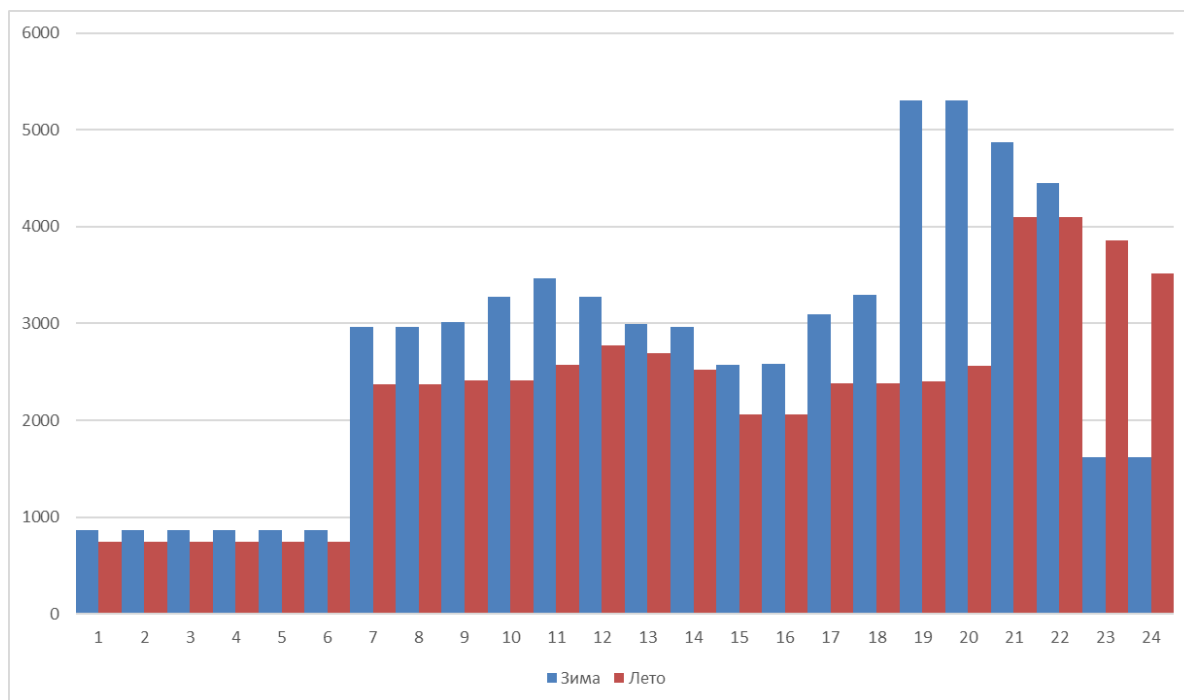


Рисунок 2 – Суммарные суточные графики активной мощности

Годовой график по продолжительности нагрузок приведен на рисунке 3.

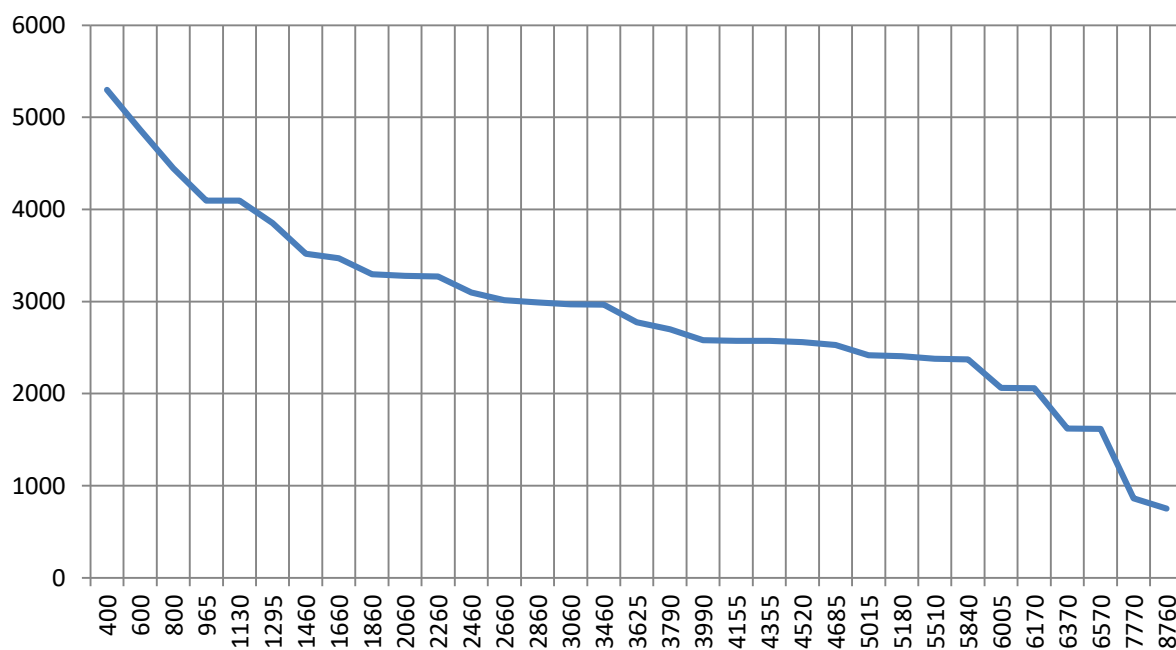


Рисунок 3 – Годовой график по продолжительности нагрузок

2.2 Расчёт сетей наружного освещения

«Основной задачей наружного освещения улиц и внутрирайонных проездов является обеспечение безопасности движения в тёмное время суток. Уличное освещение должно обеспечивать нормированную величину освещённости или средней яркости дорожного покрытия. Освещённость должна быть по возможности равномерной» [22].

Расчётная нагрузка $P_{p.o.}$ питающей осветительной сети с учётом потерь в пускорегулирующем аппарате определяется как [8]:

$$P_{p.o.} = P_{уст.} \cdot K_c \cdot K_{п.р.а.}, \quad (10)$$

где $P_{уст.}$ – установленная мощность ламп, Вт;

K_c – коэффициент спроса (одновременности), $K_c = 1$ – для наружного освещения;

$K_{п.р.а.} = 1,1$ – для ламп типа ДРЛ.

Расчётный ток осветительной сети.

«Выбор сечения проводников осветительной сети должно обеспечивать: достаточную механическую прочность, прохождения тока нагрузки без перегрева сверх допустимых температур, необходимые уровни напряжения у источников света, срабатывания защитных аппаратов при К.З» [6].

Нагрев проводников вызывается прохождением по ним тока $I_{p.o.}$ значения которого при равномерной нагрузке фаз определяется по формуле:

$$I_{p.o.} = \frac{P_{p.o.}}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos\varphi}, \quad (11)$$

где U_n – номинальное напряжение сети, $U_n = 380$ В;

$\cos\varphi$ – коэффициент мощности нагрузки, $\cos\varphi = 0,9$.

Расчёт наружного освещения рассматриваемого микрорайона.

Согласно [15] средняя горизонтальная освещённость составляет 4 лк.

Для обеспечения освещённости в 4 лк и ширине дорожного покрытия 3,5 м, по типовым решениям [13] выбираем схему расположения светильников одностороннюю, тип светильника РКУ01–125–008, тип источника света ДРЛ 125, высоту светового центра светильника 8, шаг 38 м.

Надо отметить, что расстояние между светильниками варьируется от ландшафта самой местности, где они устанавливаются, т.е. от наличия откосов, скосов и т.д. С учётом вышесказанного намечаем на генплане к установке 33 светильников общей мощностью 4375 Вт.

Расчётная нагрузка питающей линии составит для участка линии ТП – №1:

$$P_{p.o.} = 4375 \cdot 1 \cdot 1,1 = 4812,5 \text{ Вт.}$$

Определяется расчетный ток осветительной сети:

$$I_{p.o.} = \frac{4812,5}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,9} = 3,249 \text{ А.}$$

По [13] согласно расчетному току, выбирается сечение головного участка линии 2,5 мм². Допустимый длительный ток для этого сечения 31 А.

Все проектируемые сети исполнены четырехжильным кабелем марки ААБл. Для осветительных линий микрорайона используем напряжения при переменном токе и заземленной нейтралью.

2.3 Построение картограммы электрических нагрузок

«Для определения оптимального местоположения трансформаторных подстанций при проектировании систем электроснабжения на генплане наносится картограмма электрических нагрузок. Картограмма нагрузок – план территориального размещения потребителей электрической энергии» [7].

«Картограмма нагрузок микрорайона представляет собой размещённые по генплану окружности, площадь которых в выбранном масштабе равна расчётной нагрузки потребителей. В качестве центра окружностей выбирают центр электрической нагрузки потребителей (для общественно–бытовых зданий центр окружности совмещают с ВРУ).

Трансформаторные подстанции располагают как можно ближе к центру нагрузок, это позволяет приблизить высокое напряжение к центру потребления электрической энергии и значительно сократить протяжённость распределительных сетей низкого напряжения, уменьшить расход цветного материала и снизить потери электрической энергии» [25].

Координаты центра электрической нагрузки определяется по формуле:

$$X_i = \frac{\sum P_i \cdot X_i}{\sum P_i}; Y_i = \frac{\sum P_i \cdot Y_i}{\sum P_i}, \quad (12)$$

где P_i – активная мощность i -го объекта, подключённого к шинам ТП, кВт;

X_i, Y_i – координаты центра нагрузок отдельных потребителей, см.

Расчёт центра электрических нагрузок сведены в таблицу 6.

Таблица 6 – Расчёт центра электрических нагрузок

№ ТП	№ по генплану	Р _{кв} , кВт	X0	Y0	№ ТП	№ по генплану	Р _{кв} , кВт	X0	Y0
ТП №1	12	115,5	2,5	6,2	ТП №7	32	128	2,1	10,3
–	5	98	8,1	4,1	–	30	128	5,5	5
–	7	128	14,5	8,2	–	6	115,5	9	14,5
–	16	147,2	21,3	13,5	–	8	128	10,4	8,5
–	11	128	23	3,6	–	30а	128	14,3	4,3
Итого	–	616,5	14,63	7,48	–	10	102,24	17,5	13,7
ТП №2	18	128	35	40	–	12	128	18,6	7,9
–	13а	147,2	115	40	Итого	–	857,74	10,7	8,9
–	15	128	205	40	ТП №8	26	128	1,2	13
–	17	128	205	100	–	28	128	4,2	18,7
Итого	–	531,2	12	9,55	–	20	115,5	3,8	4,5
ТП №3	64	34,4	190	185	–	22	128	7,6	6,7

Продолжение таблицы 6

№ ТП	№ по генплану	Р _{кв} , кВт	X0	Y0	№ ТП	№ по генплану	Р _{кв} , кВт	X0	Y0
–	21	128	9,25	11,75	–	24	115,5	11	9
–	19	128	16,2	1,55	–	28а	118,08	14	14
–	15	98	19	6,6	–	12а	15,3	19,4	17,9
–	17	128	19,2	16	–	16а	45	23,5	13,7
–	19	128	12,75	14	Итого	–	748,38	10,1	12
–	23	225	1,6	21,5	ТП №9	16	128	2,2	14,2
Итого	–	835	11,46	13,2	–	14	128	4,6	4,8
ТП №4	29	225	5,1	13,8	–	14\1	128	8	7,2
–	27	118,08	14,8	8	–	14\2	145,92	11,2	10
–	31	128	17,1	13,3	–	18	98	20,5	5,5
–	33	128	20,9	16,1	–	18\1	238,34	2,5	26,4
–	37	128	26,3	19,7	Итого	–	115,5	7,1	13,4
–	35	128	26,3	7	ТП №10	14\3	150	4,6	7,7
–	25	128	23,8	1	–	14\4	115,5	9,5	9,2
Итого	–	983,08	17,8	11,6	–	22а	240	5,1	18,6
ТП №5	39	128	9,6	1,2	–	14\6	128	13,4	3,5
–	41	138	11,2	13,8	–	14\5	115,5	13,8	10,5
Итого	–	266	10,4	12,9	Итого	–	749	8,4	11,1
ТП №6	16	115,5	4	20,2	–	24	115,5	16,5	20,2
–	14	102,24	3,1	25,9	–	6	102,24	16,2	25,9
–	20	115,5	10,4	20,2	–	20а	147,2	13,7	8,2
–	18	102,24	9,5	25,9	Итого	–	800,42	10,5	20,98

Выводы по разделу 2.

Во втором разделе ВКР выполнен комплексный расчёт электрических нагрузок для системы электроснабжения микрорайона на 10 000 жителей. Определены суммарные мощности жилых и общественных зданий с учётом их специфики и режимов потребления. Построены графики нагрузок, отражающие суточные и сезонные колебания, что позволяет оптимизировать энергоснабжение. Рассчитаны сети наружного освещения, обеспечивающие безопасность и комфорт. Составлена картограмма нагрузок, иллюстрирующая их распределение по территории. Результаты создают основу для проектирования надёжной, экономичной и масштабируемой системы электроснабжения микрорайона.

3 Выбор и расчёт схем сетей внешнего и внутреннего электроснабжения

3.1 Выбор числа и мощности трансформаторов

Раздел посвящён выбору оптимального числа и мощности силовых трансформаторов для системы электроснабжения микрорайона города на 10 000 жителей. На основе ранее выполненных расчётов электрических нагрузок определяется суммарная мощность, необходимая для обеспечения надёжного и эффективного энергоснабжения всех потребителей, включая жилые, общественные здания и сети наружного освещения. Выбор трансформаторов осуществляется с учётом текущих и перспективных потребностей микрорайона, требований к резервированию мощности, а также экономических и технических критериев, обеспечивающих устойчивую работу системы электроснабжения.

«В распределительных сетях 6 – 20 кВ выбор числа и мощности трансформаторов определяется характером нагрузки и схемой сети. В системах электроснабжения потребителей со значительной нагрузкой, а также при выполнении сети по дуговой схеме с АВР при напряжении до 1 кВ применяют двухтрансформаторные подстанции» [22].

Согласно ПУЭ [9], потребители рассматриваемого микрорайона относятся ко второй категории, которых рекомендуется обеспечивать электрической энергией от двухтрансформаторной подстанции.

«При отключении одного из работающих трансформаторов, второй принимает на себя нагрузку отключившегося в результате включения секционного автомата. Выбор трансформаторов выполняется с учётом требований ГОСТ 14209–85 [3]» [25].

«Мощность трансформаторов принимается на основании расчётов электрической нагрузки» [22].

Расчётная активная нагрузка шин ТП при смешанном питании потребителей различного назначения (общественные здания, жилые дома) определяются по формуле:

$$P_{p.тп.} = P_{max} + P_{p.i}, \quad (13)$$

где P_{max} – наибольшая активная нагрузка зданий, питаемых от шин ТП, кВт;

$P_{p.i}$ – расчётная активная нагрузка остальных зданий, кВт.

«При расчёте активной нагрузки всех жилых домов, питающихся по разным кабельным линиям количество их квартир, суммируется и для полученного значения находится удельная мощность» [22].

Расчётная реактивная нагрузка линии при смешанном питании потребителей различного назначения, определяется по формуле:

$$Q_{p.тп.} = Q_{max} + Q_{p.i}, \quad (14)$$

где Q_{max} – наибольшая реактивная нагрузка зданий, питаемых от шин ТП, кВар;

$Q_{p.i}$ – расчётная реактивная нагрузка всех остальных зданий, квар,

$$Q_{p.i} = P_{p.i} \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (15)$$

где $\operatorname{tg} \varphi$ – расчётный коэффициент мощности [5].

Полная нагрузка подстанции определяется по формуле:

$$S_{p.тп.} = \sqrt{P_{p.тп.}^2 + Q_{p.тп.}^2}. \quad (16)$$

Коэффициент мощности ТП определяется по формуле:

$$\cos\varphi = \frac{P_{p.тп.}}{S_{p.тп.}}, \quad (17)$$

Коэффициент загрузки трансформаторов

$$K_3 = \frac{S_{p.тп.}}{\Sigma S_{н.тп.}}, \quad (18)$$

где $\Sigma S_{н.тп.}$ – суммарная номинальная мощность трансформаторов, установленных на ТП, кВА.

Мощность трансформаторов, принимаемых к установке на ТП, должна удовлетворять условию

$$\Sigma S_{н.тп.} > S_{p.тп.} \quad (19)$$

Нагрузка ТП №1 представляет собой сумму нагрузок:

- жилых домов №12, 5, 7, 11. Общее количество квартир $n = 296$ штук.
- детский сад №16а на 320 мест – 147,2 кВт.

Активная расчётная нагрузка квартир жилых домов без учёта нагрузки силовых электроприёмников, при общем количестве квартир 296 штук, составляет 389.24 кВт.

Коэффициент мощности составляет: жилые дома – $\tan\varphi = 0,2$; Детский сад №16 – $\tan\varphi = 0.25$.

Расчётная активная нагрузка шин 0,4 кВ ТП составит:

$$P_{p.тп.} = 389,24 + 147,2 = 536,44 \text{ кВт.}$$

Расчётная реактивная нагрузка шин 0,4 кВ ТП составит:

$$Q_{p.тп.} = 389,24 \cdot 0,2 + 147,2 \cdot 0,25 = 114,65 \text{ квар.}$$

Определяется полную нагрузку подстанции

$$S_{p.тп.} = \sqrt{536,44^2 + 114,65^2} = 548,55 \text{ кВА.}$$

Коэффициент мощности трансформаторной подстанции №5 составит:

$$\cos\varphi = \frac{536,44}{548,55} = 0,98.$$

Мощность трансформаторов выбирается исходя из полной нагрузки подстанции 548,55 кВА. Принимается к установке 2 трансформатора мощностью $S_{н.тр.} = 400$ кВА каждый.

Коэффициент загрузки:

$$K_{зав} = \frac{548,55}{2 \cdot 400} = 1,37.$$

$$1,37 \leq 1,4 - \text{условие выполняется.}$$

Недостаточная загрузка трансформаторов объясняется удалённостью других потребителей.

Для безопасности эксплуатации во всех ТП используются специальные трансформаторы марки ТМГ с естественной циркуляцией воздуха и масла при защищённом исполнении.

Силовые трансформаторы имеют глухозаземлённую нейтраль, присоединённую к общему контуру заземления.

Схема соединения обмоток трансформатора, треугольник – звезда с нулём.

Выбор числа и мощности трансформаторов для других ТП аналогичен предыдущему. Результаты расчёта сведены в таблицу 7.

Таблица 7 – Выбор числа и мощности трансформаторов

Номер ТП	Номер по генплану	Наименование объекта	Количество квартир	P, кВт	tgφ	Q, квар	Pp, кВт	Qp, квар	S _{расч.тп} , кВА	cosφ	S _{н.тр.} , кВА	Кз
ТП №1	12	Жилые дома	80	128	0,2	25,6	–	–	–	–	–	–
–	5		56	98	0,2	19,6	–	–	–	–	–	–
–	7		80	128	0,2	25,6	–	–	–	–	–	–
–	11		80	128	0,2	25,6	–	–	–	–	–	–
Общественные здания	16	Детский сад	–	147,2	0,25	36,8	–	–	–	–	–	–
Итого по ТП №1	–		–	–	–	–	536,44	114,65	548,55	0,98	2×400	0,68
ТП №2	13	Жилые дома	80	128	0,2	25,6	–	–	–	–	–	–
–	15		80	128	0,2	25,6	–	–	–	–	–	–
–	17		80	128	0,2	25,6	–	–	–	–	–	–
Общественные здания	–	Детский сад	–	147,2	0,25	36,8	–	–	–	–	–	–
Итого по ТП №2	–		–	–	–	–	466,4	36,8	467,85	0,99	2×400	0,58
ТП №3	21	Жилые дома	80	128	0,2	25,6	–	–	–	–	–	–
–	19		80	128	0,2	25,6	–	–	–	–	–	–
–	19		80	128	0,2	25,6	–	–	–	–	–	–
–	15		56	98	0,2	19,6	–	–	–	–	–	–
–	17		56	98	0,2	19,6	–	–	–	–	–	–
Общественные здания	23	Школа	–	225	0,38	85,5	–	–	–	–	–	–
Итого по ТП №3	–	–	–	–	–	–	688,23	178,15	710,9	0,97	2х630	0,56
ТП №4	37	Жилые дома	80	128	0,2	25,6	–	–	–	–	–	–
–	33		80	128	0,2	25,6	–	–	–	–	–	–
–	31		80	128	0,2	25,6	–	–	–	–	–	–
–	27		80	128	0,2	25,6	–	–	–	–	–	–
–	35		80	128	0,2	25,6	–	–	–	–	–	–
–	25		72	118,08	0,2	23,62	–	–	–	–	–	–

Продолжение таблицы 7

Номер ТП	Номер по генплану	Наименование объекта	Кол-во квартир	P, кВт	tgφ	Q, квар	Pp, кВт	Qp, квар	S _{расч.тп} , кВА	cosφ	S _{н.тр.} , кВА	Kз
Общественные здания	29	Школа	—	225	0,38	85,5	—	—	—	—	—	—
Итого по ТП №4	—	—	—	—	—	—	815,61	203,62	840,64	0,97	2х630	0,67
ТП №5	39	Жилые дома	80	128	0,2	25,6	—	—	—	—	—	—
Общественные здания	41	Техникум	—	138	0,75	69	—	—	—	—	—	—
Итого по ТП №5	—	—	—	—	—	—	226	94,6	245	0,92	2х160	0,77
ТП №6	14	Жилые дома	54	102,24	0,2	47,432	—	—	—	—	—	—
—	18		54	102,24	0,2	47,432	—	—	—	—	—	—
—	22		54	102,24	0,2	47,432	—	—	—	—	—	—
—	16		70	115,5	0,2	23,1	—	—	—	—	—	—
—	20		70	115,5	0,2	23,1	—	—	—	—	—	—
—	24		70	115,5	0,2	23,1	—	—	—	—	—	—
Общественные здания	20а	Детский сад	—	147,2	0,25	36,8	—	—	—	—	—	—
Итого по ТП №6	—	—	—	—	—	—	679,34	143,23	694,34	0,98	2х630	0,55
ТП №7	32	Жилые дома	80	128	0,2	25,6	—	—	—	—	—	—
—	30		80	128	0,2	25,6	—	—	—	—	—	—
—	8		70	115,5	0,2	23,1	—	—	—	—	—	—
—	6		80	128	0,2	25,6	—	—	—	—	—	—
—	30а		80	128	0,2	25,6	—	—	—	—	—	—
—	12		80	128	0,2	25,6	—	—	—	—	—	—
—	10		54	102,24	0,2	47,432	—	—	—	—	—	—
Итого по ТП №7	—	—	524	—	—	—	669,43	133,89	682,69	0,98	2х603	0,54
ТП №8	28	Жилые дома	80	128	0,2	25,6	—	—	—	—	—	—
—	26		80	128	0,2	25,6	—	—	—	—	—	—
—	20		80	128	0,2	25,6	—	—	—	—	—	—

Продолжение таблицы 7

Номер ТП	Номер по генплану	Наименование объекта	Кол-во квартир	P, кВт	tgφ	Q, квар	Pp, кВт	Qp, квар	S _{расч.тп} , кВА	cosφ	S _{н.тр.} , кВА	Kз
–	22		80	128	0,2	25,6	–	–	–	–	–	–
–	24		80	128	0,2	25,6	–	–	–	–	–	–
–	28а		72	118,08	0,2	23,62	–	–	–	–	–	–
Общественные здания	12а	Вечерняя школа	–	15,3	0,43	6,58	–	–	–	–	–	–
–	16а	Начальная школа	–	45	0,38	17,1	–	–	–	–	–	–
Итого по ТП №8	–	–	472				650,91	141,8	666,18	0,98	2х400	0,83
ТП №9	18/1	Жилые дома	170	238,34	0,2	47,67	–	–	–	–	–	–
–	18		80	128	0,2	25,6	–	–	–	–	–	–
–	16		80	128	0,2	25,6	–	–	–	–	–	–
–	14		80	128	0,2	25,6	–	–	–	–	–	–
–	14/1		96	145,92	0,2	29,18	–	–	–	–	–	–
–	14/2		54	102,24	0,2	27,432	–	–	–	–	–	–
Итого по ТП №9	–	–	560				693,28	138,66	707,01	0,98	2х630	0,56
ТП №10	14/3	Жилые дома	100	150	0,2	30	–	–	–	–	–	–
–	14/4		80	128	0,2	25,6	–	–	–	–	–	–
–	14/5		70	115,5	0,2	23,1	–	–	–	–	–	–
–	14/6		70	115,5	0,2	23,1	–	–	–	–	–	–
Общественные здания	22а	Торговый центр	–	240	0,48	115,2	–	–	–	–	–	–
Итого по ТП №8	–	–	472				657,92	198,784	687,29	0,96	2х630	0,55

Каталожные данные силовых трансформаторов приведены в таблице 8 [16].

Таблица 8 – Каталожные данные трансформаторов, принимаемых к установке на ТП

Тип трансформатора	Sn.тр	Uвн.	Uнн.	Pх.х.	Pк.з.	Uк.з.	Iх.х.
	кВА	кВ	кВ	Вт	Вт	%	%
ТМГ – 160/10	160	10	0,4	565	2650	4,5	2,4
ТМГ – 250/10	250	10	0,4	740	3700	4,5	2,3
ТМГ – 400/10	400	10	0,4	950	5500	4,5	2,1

3.2 Расчёт электрических сетей низкого напряжения

Раздел посвящён расчёту электрических сетей низкого напряжения (0,4 кВ), обеспечивающих распределение электроэнергии от трансформаторных подстанций до конечных потребителей микрорайона на 10 000 жителей. На основе ранее определённых электрических нагрузок жилых, общественных зданий и сетей наружного освещения выполняются расчёты параметров сетей, включая выбор сечений кабелей, определение потерь электроэнергии и проверку на допустимые токовые нагрузки. Целью раздела является разработка надёжной, эффективной и экономичной системы распределения электроэнергии, соответствующей нормативным требованиям и обеспечивающей стабильное энергоснабжение всех объектов микрорайона.

Линии электропередачи до 20 кВ на застроенной преимущественно жилыми домами территории городов, в районах застройки зданиями высотой 4 и выше этажа должны выполняться, как правило, кабельными, с алюминиевыми жилами.

Кабельные линии прокладываются в земляных траншеях под тротуарами или под пешеходными дорожками внутри квартала.

Здания, которые находятся в непосредственной близости от ТП, следует питать по отдельным линиям.

При глухозаземлённой нейтрали трансформатора напряжения электрической сети принимается 380/220 В. Это напряжение является экономичным для жилых и общественных зданий.

Расчётная активная электрическая нагрузка линии до 1 кВ при смешанном питании потребителей жилых домов и общественных зданий $P_{р.л.}$ определяется по формуле:

$$P_{р.л.} = P_{зд.мах} + P_{зд.i}, \quad (20)$$

где $P_{зд.мах}$ – активная наибольшая нагрузка зданий из числа зданий, питаемых по линии, кВт,

$P_{зд.i}$ – активная расчётная нагрузка всех остальных зданий, питаемых по линии, кВт.

При расчёте активной нагрузки всех жилых домов, питающихся по одной кабельной линии, количество их квартир суммируются и для полученного значения находится удельная мощность [14].

Рабочий ток в линии определяется по формуле:

$$I_{р.л.} = \frac{P_{р.л.}}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi \cdot n}, \quad (21)$$

где n – количество кабелей, проложенных в траншее к объекту. Для потребителей 2 категории, принимают к прокладке начальное количество кабелей равное 2 [9];

U_n – номинальное напряжение сети, $U_n = 380$ В.

Сечение кабеля определяется с учётом выполнения условия:

$$I_{доп} \geq \frac{I_{п.ав.}}{1.3 \cdot K}, \quad (22)$$

где $I_{доп}$ – допустимый продолжительный ток, А;

K – поправочный коэффициент, учитывающий число кабелей, проложенных в одной траншее;

$I_{п.ав.}$ – расчётная токовая нагрузка линии в послеаварийном режиме, А.

$$I_{п.ав.} = 2 \cdot I_{р.л.}, \quad (23)$$

Потери мощности в линии:

$$\Delta P_{л.} = 3 \cdot I_{р.л.}^2 \cdot R_0 \cdot L_{уч} \cdot n, \quad (24)$$

где R_0 – активное сопротивление жил кабеля соответствующего участка на 1 км длины при 20 °С, Ом [20];

$L_{уч}$ – длина участка кабельной линии, км. Определяется с генплана микрорайона в соответствующем масштабе.

Потери напряжения на участке кабельной линии определяется по формуле:

$$\Delta U_p = \frac{A \cdot P_p \cdot L_{уч.}}{n \cdot Q_{ст.}}, \quad (25)$$

где A – коэффициент, зависящий от принятых единиц измерения, определяется по [6], $A = 21,9$ – для сети 0,4 кВ. $A = 0,0316$ – для сети 10 кВ.

Далее потери на участках линии суммируются и сравниваются с располагаемыми потерями напряжения от шин ТП до наиболее удалённого электроприёмника.

Располагаемые (допустимые) потери напряжения $\Delta U_{доп}$ в % задается в зависимости от коэффициента загрузки трансформатора и коэффициента мощности ТП, рассчитанных выше.

В результате должно выполняться условие

$$\Delta U_{\text{доп}} > \Delta U_{\text{р}}. \quad (26)$$

В качестве примера произведём расчёт кабельной линии, отходящей от трансформаторной подстанции №1 и питающей жилой дом №7, 5 и 12.

Расчётные нагрузки зданий составят:

- жилой дом №7 – 272,76 кВт;
- жилой дом №5 – 197,15 кВт;
- жилой дом №12 – 128 кВт.

Схема соединения на стороне 0,4 кВ магистральная.

Расчётная активная электрическая нагрузка кабельной линии до 1 кВ.

Активная расчётная нагрузка квартир жилых домов без учёта нагрузки силовых электроприёмников, при общем количестве квартир 216 штук:

$$P_{\text{р.л.}} = 216 \cdot 1,2628 = 272,76 \text{ кВт.}$$

Расчётный ток кабельной линии составит:

$$I_{\text{р.л.}} = \frac{272,76}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,98 \cdot 4} = 105,7 \text{ А.}$$

Определяется сечение кабеля:

$$I_{\text{п.ав.}} = 2 \cdot 105,7 = 211,44 \text{ А.}$$

Проверка условия (22), $K = 0,8$ – для четырех кабелей проложенных в одной траншее, $I_{\text{доп.}} = 240 \text{ А}$ – для выбранного стандартного сечения кабеля $Q_{\text{ст.}} = 95 \text{ мм}^2$.

$$240 \text{ A} \geq \frac{211,44}{1,3 \cdot 0,8} = 203,3 \text{ A},$$

условие выполняется.

Потери мощности в кабельной линии составят:

$L = 0,05$ км с учётом 6% на изгибы.

$R_0 = 0,326$ Ом для выбранного стандартного сечения кабеля $Q_{\text{ст.}} = 95 \text{ мм}^2$.

$$\Delta P_{\text{л.}} = 3 \cdot 105,7^2 \cdot 0,326 \cdot 0,05 \cdot 4 = 1,092 \text{ кВт.}$$

Потери напряжения в кабельной линии составят:

$$\Delta U_{\text{р.}} = \frac{21,9 \cdot 272,76 \cdot 0,05}{4 \cdot 95} = 0,785 \text{ \%}.$$

После аналогичных расчётов для других участков кабельной линии определяется суммарные потери напряжения, которые составят $\Delta U_{\text{р.}\Sigma} = 3,7 \text{ \%}$.

Проверка условий (26)

Данный трансформаторной подстанции, согласно таблице 7.

Мощность установленных трансформаторов 2×400 кВА.

Коэффициент загрузки трансформаторов $K_z = 0,68$.

Коэффициент мощности ТП $\cos \varphi = 0,98$.

Согласно вышеуказанным данным, определяется располагаемые потери напряжения, которые составят $\Delta U_{\text{доп.}} \leq 4,67 \text{ \%}$ – условие выполняется.

Кабельная сеть 0,4 кВ выполнена четырёхжильным кабелем ААБл (кабель в алюминиевой оболочке с бумажной изоляцией, пропитанной маслосканифольным составом, со слоем поливинилхлоридного пластиката, бронированный стальными лентами). В качестве нулевого провода используется алюминиевая оболочка кабеля.

Расчёт других кабельных линий аналогичен предыдущему. Результаты расчёта сведены в таблицу 9.

Таблица 9 – Расчёт кабельной сети низшего напряжения (0,4 кВ)

№ лин ии	N _к	Наименование объекта	Ист очн ик	Потреб итель	P _{р.л.} , кВт	cosφ	I _{р.л.} , А		Q _{ст} , мм ²	I _{доп} , А	I _{доп} , А	L _{уч} , км	R ₀ , Ом/м	Марка и сечения кабеля	ΔP _л , Вт	ΔU _р , %
							Раб.	Авар								
ТП №1																
1	4	Жилые дома	ТП1	7	272,76	0,98	105,7	105,7	150	240	205,3	0,05	0,326	4×ААБ–(4×95)	1,092	1,17
2	2		7	5	197,15	0,98	152,82	305,64	120	200	261,23	0,07	0,206	2×ААБ–(4×120)	2,02	1,56
3	2		5	12	115,5	0,98	89,53	179,07	70	305	153,05	0,052	0,443	2×ААБ–(4×70)	1,107	0,94
1	2	Жилой дом	ТП1	11	47,75	0,98	99,22	198,44	70	200	169,6	0,115	0,443	2×ААБ–(4×70)	3	1,26
1	2	Детский сад	ТП1	16	147,2	0,97	115,3	230,6	95	240	197,09	0,041	0,326	2×ААБ–(4×95)	1,066	0,785
ТП №2																
1	2	Жилой дом	ТП2	13	128	0,98	99,22	198,44	70	200	169,6	0,052	0,443	2×ААБ–(4×70)	1,361	1,04
1	2	Детский сад	ТП2	13а	147,2	0,92	115,3	230,6	95	240	196,58	0,045	0,326	2×ААБ–(4×95)	1,17	0,76
1	2	Жилой дом	ТП2	15	128	0,98	99,22	198,44	70	200	169,6	0,045	0,443	2×ААБ–(4×70)	1,17	0,9
1	2	Жилой дом	ТП2	17	128	0,98	99,22	198,44	70	200	169,6	0,065	0,443	2×ААБ–(4×70)	1,7	1,3
ТП №3																
1	2	Школа	ТП3	23	225	0,92	179,92	359,84	185	345	307,55	0,085	0,258	2×ААБ–(4×185)	4,259	1,13
1	2	Жилой дом	ТП3	21	128	0,98	99,22	198,44	70	200	169,6	0,015	0,443	2×ААБ–(4×70)	0,392	0,3
1	2	Жилой дом	ТП3	19	128	0,98	99,22	198,44	70	200	169,6	0,01	0,443	2×ААБ–(4×70)	0,261	0,2
3	2	Жилые дома	15	19ч	98	0,98	75,96	151,93	50	165	129,85	0,052	0,62	2×ААБ–(4×50)	1,116	1,12
2	2		15	17ч	128	0,98	99,22	198,44	70	200	169,6	0,095	0,443	2×ААБ–(4×70)	2,486	1,9
1	2		ТП3	15	272,76	0,98	105,7	211,44	95	240	205,3	0,09	0,326	2×ААБ–(4×95)	1,966	1,414
ТП №4																
1	2	Школа	31	29	225	0,92	179,92	359,84	185	345	307,55	0,085	0,258	2×ААБ–(4×185)	4,61	1,23
2	2	Жилые дома	31	27	118,08	0,98	91,53	183,06	70	200	156,47	0,054	0,258	2×ААБ–(4×70)	1,2	0,997
3	4		ТП4	31	441,9	0,98	173,04	346,08	185	345	332,8	0,065	0,443	4×ААБ–(4×185)	3,9	0,85
2	2	Жилые дома	33	37	128	0,98	99,22	198,44	70	200	169,6	0,051	0,443	2×ААБ–(4×70)	1,334	1,021
1	2		ТП4	33	128	0,98	99,22	198,44	70	200	169,6	0,079	0,62	2×ААБ–(4×70)	3,012	1,31
2	2	Жилые дома	35	25	128	0,98	99,22	198,44	70	200	169,6	0,061	0,443	2×ААБ–(4×70)	1,59	1,22
1	2		ТП4	35	226,56	0,98	175,62	175,62	150	305	300,2	0,055	0,326	2×ААБ–(4×150)	2,096	0,9
ТП №5																

Продолжение таблицы 9

№ лин ии	N _k	Наименование объекта	Исто чник	Потреб итель	P _{р.л.} , кВт	cosφ	I _{р.л.} , А		Q _{ст} , мм ²	I _{доп} , А	I _{доп} , А	L _{уч} , км	R ₀ , Ом/м	Марка и сечения кабеля	ΔP _л , Вт	ΔU _р , %
							Раб.	Авар								
1	2	Техникум	ТП5	41	138	0,92	131,04	262,08	95	240	224	0,01	0,326	2×ААБ–(4×95)	0,336	0,159
1	2	Жилой дом	ТП5	39	128	0,98	99,22	198,44	70	200	169,1	0,09	0,443	2×ААБ–(4×70)	2,355	1,8
ТП №6																
2	2	Жилой дом	16	14	102,24	0,98	79,25	158,5	50	165	135,5	0,08	0,258	2×ААБ–(4×50)	1,87	1,79
2	2	Жилой дом	29	18	102,24	0,98	79,25	158,5	50	165	135,5	0,08	0,258	2×ААБ–(4×50)	1,87	1,79
2	2	Жилой дом	24	22	102,24	0,98	79,25	158,5	50	165	135,5	0,08	0,443	2×ААБ–(4×50)	1,87	1,79
1	2	Жилой дом	ТП6	16	189,83	0,98	147,15	294,3	120	270	251,54	0,136	0,443	2×ААБ–(4×120)	4,558	2,35
1	2	Жилой дом	ТП6	20	189,83	0,8	147,15	294,3	120	270	251,54	0,066	0,62	2×ААБ–(4×120)	2,212	1,14
1	2	Жилой дом	ТП6	24	189,83	0,98	147,15	294,3	120	270	251,54	0,044	0,443	2×ААБ–(4×120)	1,474	0,76
1	2	Детский сад	ТП6	20а	147,2	0,92	115,3	230,6	95	240	196,58	0,057	0,326	2×ААБ–(4×95)	1,482	0,967
ТП №7																
3	2	Жилой дом	30	32	128	0,98	99,22	198,44	70	200	169,6	0,061	0,258	2×ААБ–(4×70)	1,59	1,22
2	4	Жилой дом	8	30	226,56	0,98	175,62	351,25	150	305	300,2	0,055	0,258	4×ААБ–(4×150)	2,096	0,9
1	4	Жилой дом	ТП7	8	322,08	0,98	125,11	250,23	120	270	240,6	0,048	0,443	4×ААБ–(4×120)	2,326	0,7
1	2	Жилой дом	ТП7	6	115,5	0,98	89,53	179,07	70	200	153,05	0,045	0,443	2×ААБ–(4×70)	0,959	0,81
2	2	Жилой дом	30а	12	115,5	0,98	89,53	179,07	70	200	153,05	0,051	0,62	2×ААБ–(4×70)	1,086	0,921
1	2	Жилой дом	ТП7	30а	214,5	0,98	166,3	332,6	150	305	284,23	0,061	0,443	2×ААБ–(4×150)	2,187	1
1	2	Жилой дом	ТП7	10	102,24	0,98	79,25	158,5	50	165	135,5	0,043	0,326	2×ААБ–(4×50)	1,004	0,96
ТП №8																
3	2	Жилой дом	26	20	128	0,98	99,22	198,44	70	200	169,6	0,096	0,258	2×ААБ–(4×70)	2,512	1,92
2	4	Жилой дом	28	26	226,56	0,98	175,62	351,25	150	305	300,2	0,056	0,258	4×ААБ–(4×150)	2,134	0,926
1	4	Жилой дом	ТП8	28	322,08	0,98	125,11	250,23	120	270	240,6	0,078	0,443	4×ААБ–(4×120)	3,779	1,146
2	2	Жилой дом	24	22	128	0,98	99,22	198,44	70	200	169,6	0,029	0,443	2×ААБ–(4×70)	0,759	0,58
1	2	Жилой дом	ТП8	24	226,56	0,98	175,62	351,25	150	305	300,2	0,056	0,62	2×ААБ–(4×70)	2,135	0,926
2	2	Вечерняя школа	16а	12а	15,3	0,92	12,63	25,27	10	65	21,6	0,046	0,443	2×ААБ–(4×10)	0,136	0,77

Продолжение таблицы 9

№ лин ии	N _k	Наименование объекта	Исто чник	Потреб итель	P _{р.л.} , кВт	cosφ	I _{р.л.} , А		Q _{ст} , мм ²	I _{доп} , А	I _{доп} , А	L _{уч} , км	R ₀ , Ом/м	Марка и сечения кабеля	ΔP _л , Вт	ΔU _р , %
							Раб.	Авар								
1	2	Начальная школа	ТП8	16а	60,3	0,92	50,34	100,68	35	135	86,05	0,137	0,326	2×ААБ–(4×35)	1,854	2,58
1	2	Жилые дома	ТП8	28а	118,08	0,98	91,53	183,6	70	200	169,6	0,027	0,62	2×ААБ–(4×70)	0,601	0,498
ТП №9																
1	2	Жилой дом	ТП9	16	128	0,98	99,22	198,44	70	200	169,6	0,04	0,326	2×ААБ–(4×70)	1,046	0,8
1	2	Жилой дом	ТП9	14	128	0,98	99,22	198,44	70	200	169,6	0,069	0,206	2×ААБ–(4×70)	1,805	1,381
1	2	Жилой дом	ТП9	14/1	128	0,98	99,22	198,44	70	200	169,6	0,05	0,443	2×ААБ–(4×70)	1,31	1
1	2	Жилой дом	ТП9	14/2	145,92	0,98	113,11	226,23	70	200	169,6	0,045	0,443	2×ААБ–(4×70)	1,53	1,027
1	2	Жилой дом	ТП9	18	98	0,98	75,96	151,93	50	165	129,85	0,071	0,326	2×ААБ–(4×50)	1,52	1,482
1	2	Жилой дом	ТП9	18/1	238,34	0,98	184,8	369,6	185	345	315,9	0,162	0,206	2×ААБ–(4×185)	5,543	2,29
ТП №10																
1	4	Торговый центр	ТП10	22а	240	0,92	101,29	202,58	70	200	194,78	0,036	0,443	4×ААБ–(4×70)	1,963	0,675
1	2	Жилой дом	ТП10	14/3	150	0,98	116,3	232,6	95	240	198,76	0,05	0,326	2×ААБ–(4×95)	1,322	0,86
1	2	Жилой дом	ТП10	14/5	115,5	0,98	89,53	179,07	70	200	153,05	0,058	0,443	2×ААБ–(4×70)	1,235	1,047
2	2	Жилой дом	14/4	14/6	128	0,98	99,22	198,44	70	200	169,6	0,065	0,443	2×ААБ–(4×70)	1,7	1,3
1	2	Жилой дом	ТП10	14/4	214,5	0,98	166,3	332,6	150	305	284,23	0,045	0,206	2×ААБ–(4×150)	1,538	0,7

3.3 Расчёт электрических сетей высокого напряжения

Раздел посвящён расчёту электрических сетей высокого напряжения (10 кВ), обеспечивающих передачу электроэнергии от источников питания к трансформаторным подстанциям микрорайона на 10 000 жителей. На основе данных о расчётных нагрузках и картограммы их распределения определяются параметры сетей, включая выбор типов и сечений проводников, расчёт токов нагрузки, потерь мощности и напряжения. Особое внимание уделяется обеспечению надёжности, устойчивости и резервирования системы. Цель раздела – разработка эффективной и безопасной сети высокого напряжения, соответствующей нормативным требованиям и способной удовлетворить текущие и перспективные потребности микрорайона в электроэнергии.

Схему электроснабжения микрорайона выбирают в зависимости от категории присоединённых к электрической сети электроприёмников и на основе данных о времени ликвидации перерывов в электроснабжении.

Большинство располагаемых в микрорайоне зданий относятся ко второй категории надёжности. «Для этой категории электроприёмников перерыв в электроснабжении допускается на время, необходимое для включения резервного питания» [9].

Допускается питание одной кабельной линией, но расщеплённой не менее чем на два кабеля, присоединённых через самостоятельные разъединители.

«Для соединения городских подстанций с двумя трансформаторными подстанциями применяется двухлучевая схема с автоматическим вводом резерва (АВР) на стороне низкого напряжения и контактной автоматикой. При отключении одного луча высокого напряжения или выходе из строя трансформатора нагрузка автоматически переключается на исправный кабель и второй трансформатор, обеспечивая требуемую надёжность. Схема также обладает функцией самовосстановления: при появлении напряжения на

отключённой линии она возвращается в исходное состояние без вмешательства персонала» [25].

Радиальные и магистрально–радиальные схемы отличаются более простыми конструкциями подстанций и гибкостью для наращивания нагрузок в заданных точках. Петлевые схемы, несмотря на большую пропускную способность, требуют ручного переключения с выездом персонала, повышенного расхода материалов, усложнённой эксплуатации и специализированной релейной защиты. Ответственные объекты в таких схемах выделяются на отдельные линии.

С учётом вышеизложенного расчёт выполнен для двухлучевой схемы, как оптимальной по надёжности и эксплуатационным характеристикам.

Схема показана на рисунке 4. Двухлучевая схема с АВР на стороне низшего напряжения имеет значительные преимущества, надёжна в эксплуатации, обладает быстродействием.

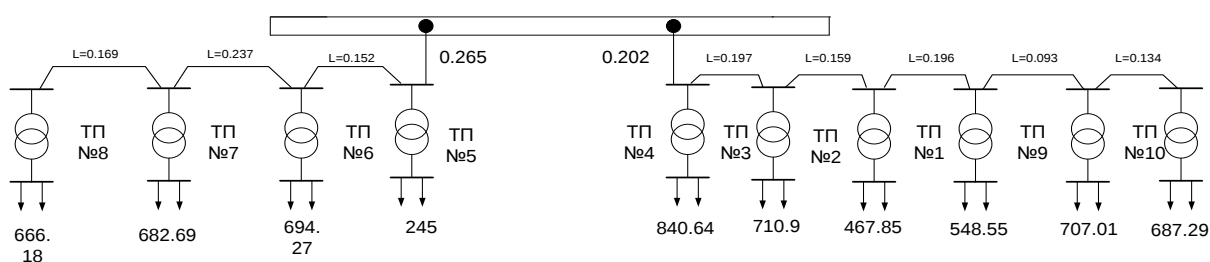


Рисунок 4 – Схема сетей высокого напряжения

Расчётная активная нагрузка сетей 10 кВ определяется умножением расчётных активных нагрузок трансформаторов отдельных ТП, присоединённых к данному элементу сети (ЦП, РП, линии и д.р.), на коэффициент учитывающий совмещения максимумов их нагрузок (K_y), принимаем в зависимости от количества трансформаторов и характеристики нагрузки. Расчётная активная нагрузка составит:

$$P_{p.l.} = \sum K_{y,i} \cdot P_{p.тп,i}, \quad (27)$$

Коэффициент мощности в период максимума нагрузки принимается $\cos\varphi = 0,92$.

Характера нагрузки – жилая застройка (70 % и более нагрузки жилых домов и до 30 % нагрузки общественных зданий).

Экономическое сечение кабеля определяется по формуле:

$$Q_{\text{эк}} = \frac{I_{\text{р.л.}}}{j_{\text{эк}}}, \quad (28)$$

где $j_{\text{эк}}$ – экономическая плотность тока, А/мм². Принимается по ПУЭ [9], в зависимости от металла кабелей, способа его изоляции и числа часов использования максимума нагрузки ($T_{\text{м}}$). Далее по [9] выбирается ближайшее стандартное сечение кабеля ($Q_{\text{ст}}$), мм².

Дальнейший ход расчёта аналогичен расчёту сети низшего напряжения.

Расчёт ведём в табличной форме. Результаты расчёта сведены в таблицу

10.

Таблица 10 – Расчёт сетей высокого напряжения (10 кВ)

№ линии	Источник	Потребитель	Расчётная нагрузка линии			cosφ	I _{р.л.} , А		Q _{ст} , мм ²	K _п	I _{доп} , А	$I_{доп} \geq \frac{I_{п.ав.}}{1.3 \cdot K'}$	L _{уч} , км	R ₀ , Ом/м	Марка и сечение кабеля	ΔP _л , Вт	ΔU _р , %
			P _{р.тр.} , кВт	Q _{р.тр.} , кВар	S _{р.тр.} , кВА		Раб.	Авар.									
1	РП	ТП №5	226	94,6	245	0,92	59,36	118,72	185	0,9	340	101,47	0,265	0,257	2×ААБ– (3×185)	0,935	0,04
2	ТП №5	ТП №6	679,37	143,23	694,27	0,98	53,33	106,66	185	0,85	340	91,16	0,152	0,257	2×ААБ– (3×185)	0,433	0,023
3	ТП №6	ТП №7	669,43	133,89	682,69	0,98	37,29	74,57	185	0,85	340	63,74	0,257	0,257	2×ААБ– (3×185)	0,358	0,026
4	ТП №7	ТП №8	650,91	141,8	666,18	0,977	18,38	36,76	185	0,85	340	31,42	0,163	0,257	2×ААБ– (3×185)	0,055	0,008
1	РП	ТП №4	815,61	203,62	840,64	0,97	102,89	205,8	185	0,9	340	175,9	0,202	0,257	2×ААБ– (3×185)	2,143	0,06
2	ТП №4	ТП №3	688,232	178,147	710,9	0,97	81,14	162,28	185	0,85	340	138,7	0,197	0,257	2×ААБ– (3×185)	1,602	0,046
3	ТП №3	ТП №2	466,4	36,8	467,85	0,99	62,78	125,57	185	0,85	340	107,32	0,159	0,257	2×ААБ– (3×185)	0,628	0,029
4	ТП №2	ТП №1	536,44	114,65	548,55	0,98	50,35	100,69	185	0,85	340	86,06	0,196	0,257	2×ААБ– (3×185)	0,497	0,028
5	ТП №1	ТП №9	694,28	138,66	707,01	0,98	36,04	72,08	185	0,85	340	61,6	0,093	0,257	2×ААБ– (3×185)	0,121	0,0097
6	ТП №9	ТП №10	657,92	198,784	687,29	0,96	18,57	37,16	185	0,85	340	31,76	0,134	0,257	2×ААБ– (3×185)	0,046	0,0067

Выводы по разделу 3.

В третьем разделе ВКР выполнен комплексный расчёт и выбор схем сетей внешнего и внутреннего электроснабжения микрорайона на 10 000 жителей. Определены число и мощность трансформаторов, обеспечивающие баланс надёжности, экономичности и перспективного роста нагрузок. Выбраны силовые трансформаторы типа ТМГ различных мощностей.

Рассчитаны сети низкого напряжения (0,4 кВ) с выбором сечений кабелей, учётом потерь и проверкой токовых нагрузок, что гарантирует стабильное питание жилых, общественных объектов и наружного освещения. Кабельная сеть 0,4 кВ выполнена четырёхжильным кабелем ААБл различных сечений.

Для сетей высокого напряжения (10 кВ) определены параметры проводников, токи, потери мощности и напряжения, сформирована устойчивая и резервированная система. Кабельная сеть 0,4 кВ выполнена четырёхжильным кабелем ААБ различных сечений.

Итоговые решения обеспечивают надёжное, эффективное и соответствующее нормативам энергоснабжение микрорайона с учётом текущих и будущих потребностей.

4 Расчёт токов короткого замыкания

Раздел посвящён расчёту токов короткого замыкания (ТКЗ) в системе электроснабжения микрорайона на 10 000 жителей. На основе данных о схемах сетей высокого и низкого напряжения, а также характеристик оборудования, определяются значения токов короткого замыкания в различных точках сети. Целью расчёта является обеспечение правильного выбора защитной аппаратуры, настройки релейной защиты и подтверждения устойчивости системы к аварийным режимам. Это позволяет гарантировать безопасность эксплуатации, минимизировать риски повреждения оборудования и обеспечить надёжное энергоснабжение микрорайона.

«Воздействия ТКЗ учитывают только при выборе сечения кабельной линии на стороне 10 кВ, защищаемой релейной защитой. Кабели на стороне 0,4 кВ защищаемые плавкими предохранителями, на термическую стойкость не проверяются, т.к. время срабатывания предохранителя мало и выделившиеся тепло не в состоянии нагреть кабель до опасной температуры» [10].

Расчёт тока трёхфазного КЗ на стороне 10 кВ.

Мощность КЗ на шинах определяется по формуле [10]:

$$S_{\text{к.з.}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{н.}} \cdot I_{\text{к.з.}}, \quad (29)$$

где $U_{\text{н.}}$ – номинальное напряжение сети, $U_{\text{н.}} = 10$ кВ;

$I_{\text{к.з.}}$ – ток КЗ на шинах РП согласно исходным данным равен 11,7 кА.

Сопротивление системы определяется по формуле [10]:

$$X_{\text{с}} = \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{к.з.}}}, \quad (30)$$

где $S_{\text{б}}$ – базисная мощность, принимается 100 мВА.

Базисный ток системы определяется по формуле:

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6}, \quad (31)$$

где U_6 – базисное напряжение ступени, на которой рассчитывается ток КЗ, кВ.

Ток КЗ определяется по формуле [10]:

$$I_{\text{к.з.}}^{(3)} = \frac{S_6}{Z_6}, \quad (32)$$

где Z_6 – полное базисное сопротивление до точки КЗ, о.е.,

$$Z_6 = \sqrt{R^{\Sigma \cdot 2} + X^{\Sigma \cdot 2}}, \quad (33)$$

где $R^{\Sigma \cdot 2}$, $X^{\Sigma \cdot 2}$ – активное и индуктивное суммарное сопротивление, соответственно, до точки КЗ элементов сети в о.е.

Для кабельной линии базисное активное и индуктивное сопротивление составит:

$$R_6 = R_{0.i} \cdot L_{\text{уч.}i} \cdot \frac{S_6}{U_{\text{н.}}}; \quad (34)$$

$$X_6 = X_{0.i} \cdot L_{\text{уч.}i} \cdot \frac{S_6}{U_{\text{н.}}}, \quad (35)$$

где $R_{0.i}$ – погонное активное сопротивление участка кабельной линии соответствующего сечения, выбранного по $j_{\text{эк.}}$;

$X_{0.i}$ – погонное индуктивное сопротивление участка кабельной линии, Ом [20];

$L_{\text{уч.}}$ – длина участка кабельной линии, км.

Проверка кабеля на термическую стойкость производится исходя из условия [7]:

$$I_{\text{т}} > I_{\text{к.з.}}, \quad (36)$$

где I_T – ток термической стойкости, кА.

$$I_T = Q_{ст} \cdot \frac{K_T \cdot 10^{-3}}{\sqrt{t_{\phi}}}, \quad (37)$$

где K_T – температурный коэффициент. Для напряжения 10 кВ и кабелей с бумажной изоляцией $K_T = 95 \text{ А} \cdot \text{с}^2$;

t_{ϕ} – время действия тока КЗ, определяется по формуле, с [7],

$$t_{\phi} = t_{р.з.} + t_{в.} + T_a, \quad (38)$$

где $t_{р.з.}$ – время действия релейной защиты, принимается равным 2 – для питающих и 0,5 для распределительных сетей [7], с;

$t_{в.}$ – полное время отключения выключателя, принимается равным (0,04 – 0,2) [7], с;

T_a – постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ, $T_a = 0,05 \text{ с}$ [7].

Расчётная схема для определения токов КЗ распределительной сети 10 кВ (линия 1 (РП – ТП5 – ТП8)) рассматриваемого микрорайона приведена на рисунке 5.

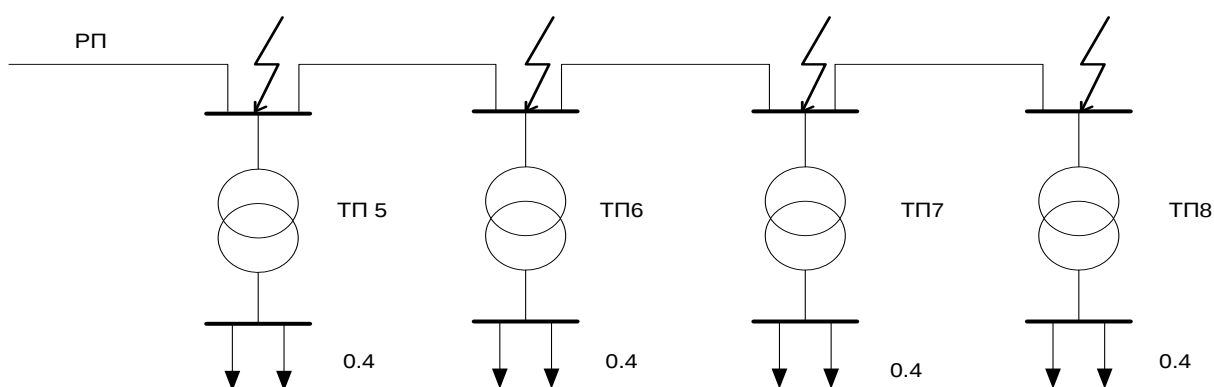


Рисунок 5 – Расчётная схема для определения токов КЗ распределительной сети 10 кВ в указанных точках.

Схема замещения для расчётов токов трёхфазного КЗ на стороне 10 кВ приведена на рисунке 6.

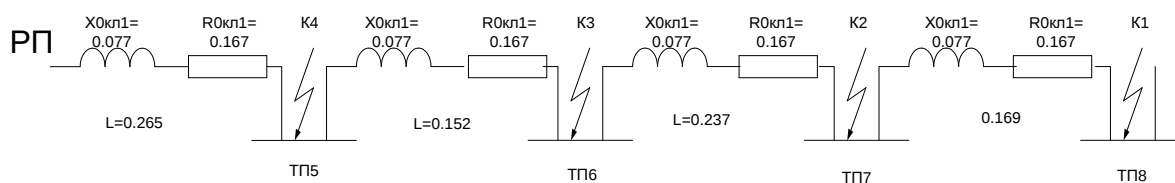


Рисунок 6 – Схема замещения для расчётов токов трёхфазного КЗ на стороне 10 кВ

Параметры необходимые для расчёта приведены на рисунке 6.

Определяется $I_{\text{к.з.}}^{(3)}$ в точке К1.

Мощность КЗ на шинах составит:

$$S_{\text{к.з.}} = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 11,7 = 202,65 \text{ МВА.}$$

Сопротивление системы:

$$X_c = \frac{100}{202,65} = 0,493.$$

Определяется базисный ток системы:

За базисное напряжение принимается номинальное напряжение сети т.е.

$$U_6 = U_n = 10 \text{ кВ.}$$

$$I_6 = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10} = 5,77 \text{ кА.}$$

Определяется базисное сопротивление кабельной линии на участке РП – ТП №5.

Активное:

$$R_{\dot{G}} = 0,167 \cdot 0,169 \cdot \frac{100}{10^2} = 0,028 \text{ о. е.}$$

Индуктивное:

$$X_{\dot{G}} = 0,077 \cdot 0,169 \cdot \frac{100}{10^2} = 0,01 \text{ о. е.}$$

Суммарное сопротивление до точки короткого замыкания К1 составит:

Активное:

$$R^{\Sigma} = R_{\dot{G}} = 0,028 \text{ о. е.}$$

Индуктивное:

$$X^{\Sigma} = X_{\dot{G}} + X_c = 0,01 + 0,493 = 0,503 \text{ о. е.}$$

Определяется полное сопротивление до точки короткого замыкания К1:

$$Z_{\dot{G}} = \sqrt{0,028^2 + 0,503^2} = 0,504 \text{ о. е.}$$

В итоге получим ток КЗ:

$$I_{\text{к.з.}}^{(3)} = \frac{5,77}{0,504} = 11,45 \text{ кА.}$$

Проверка кабеля на термическую стойкость.

Принимаем $t_{\text{р.з.}} = 2 \text{ с.}; t_{\text{в}} = 0,2 \text{ с.}; T_{\text{а}} = 0,05 \text{ с.}$

Время действия тока КЗ составит:

$$t_{\phi} = 0,02 + 2 + 0,05 = 2,07 \text{ с.}$$

Определяется ток термической стойкости:

$$I_T = 185 \cdot \frac{95 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{2,07}} = 12,215 \text{ кА,}$$

12,215 кА > 10,491 кА – условие выполняется.

Расчёт трёхфазного тока КЗ для следующих точек и расчёт термически стойкого сечения для следующих участков кабельной линии аналогичен предыдущему. Результаты расчёта термически стойкого сечения представлены в таблице 10.

Результаты расчёта тока трёхфазного КЗ сведены в таблицу 11.

Таблица 11 – Результаты расчёта тока трёхфазного КЗ

Номер линии	Номер точки К.З.	Источник	Потребитель	R^{Σ} , о. е.	X^{Σ} , о. е.	Z , о. е.	$I_{\text{К.З.}}^{(3)}$, кА
1	K1	РП	ТП №5	0,028	0,503	0,504	11,45
	K1.1			12,544	4,982	13,5	10,69
	K2	ТП №5	ТП №6	0,04	0,511	0,513	11,25
	K2.2			1,925	6,004	6,3	22,92
	K3	ТП №6	ТП №7	0,025	0,504	0,505	11,43
	K3.3			1,94	6,011	6,32	22,84
	K4	ТП №7	ТП №8	0,044	0,512	0,514	11,23
	K4.4			3,447	4,997	6,07	23,78
2	K1	РП	ТП №4	0,034	0,509	0,51	11,34
	K1.1			1,922	6,003	6,3	22,92
	K2	ТП №4	ТП №3	0,033	0,508	0,509	11,34
	K2.2			1,915	6	6,3	22,92
	K1	ТП №3	ТП №2	0,027	0,505	0,506	11,4
	K1.1			3,47	5,002	6,09	23,7
	K2	ТП №2	ТП №1	0,033	0,508	0,509	11,34
	K2.2			3,464	5	6,08	23,75
	K1	ТП №1	ТП №9	0,015	0,5	0,5	11,54
	K1.1			1,933	6,008	6,31	22,88
	K2	ТП №9	ТП №10	0,022	0,503	0,503	11,47
	K2.2			1,934	6,009	6,31	22,88

Расчёт тока трёхфазного КЗ на стороне 0,4 кВ.

Мощность КЗ и сопротивление системы определены при расчёте тока трёхфазного КЗ на стороне 10 кВ.

Базисный ток определяется аналогично базисному току на стороне 10 кВ.

Базисное сопротивление трансформаторов определяется следующим образом.

При мощности трансформаторов $S_{н.тр.} \leq 630$ кВА базисное индуктивное сопротивление $X_{б.тр.}$ определяется по формуле, о.е.:

$$X_{б.тр.} = \sqrt{U_{к.}^2 - R^2 \cdot \frac{S_{б.}}{S_{н.тр.}}}, \quad (39)$$

где $U_{к.}$ – напряжение КЗ трансформатора, %;

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

R – активное сопротивление, о.е.

$$R = \frac{\Delta P_{кз}}{S_{т.ном.}}, \quad (40)$$

где $\Delta P_{кз}$ – потери КЗ, кВт.

Базисное активное сопротивление определяется по формуле:

$$R_{б.тр.} = R \cdot \frac{S_{б.}}{S_{т.ном.}}, \quad (41)$$

Расчётная схема для определения токов КЗ распределительной сети 0,4 кВ (линия 1 (РП – ТП №5 – ТП №6– ТП №7– ТП №8)) рассматриваемого микрорайона приведена на рисунке 7.

Параметры необходимые для расчёта приведены на рисунке 7.

Определяется ток КЗ в точке К1.1.

$S_{к.з.} = 202,65$ МВА.

$$X_c = 0,493 \text{ о. е.}$$

Определяется базисный ток системы.

За базисное напряжение принимается номинальное напряжение сети т.е.

$$U_6 = U_H = 0,4 \text{ кВ},$$

$$I_6 = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 144,337 \text{ кА.}$$

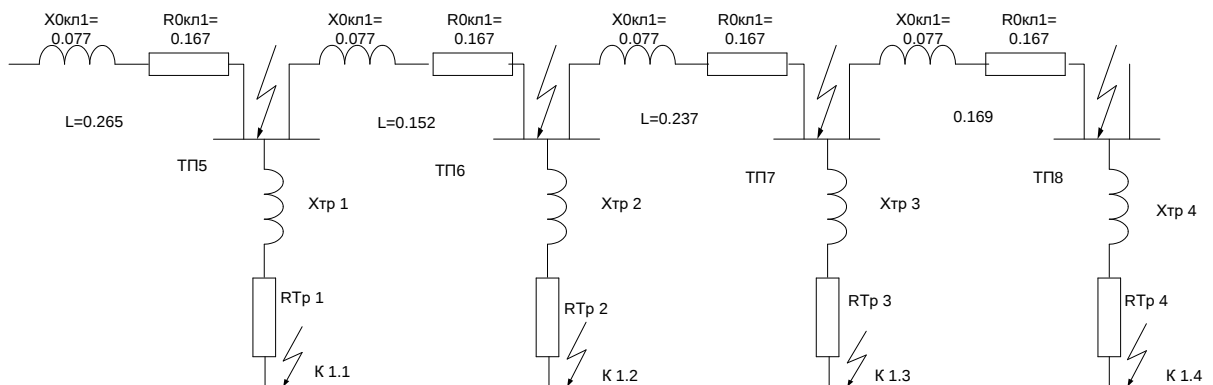


Рисунок 7 – Схема замещения для расчётов токов трёхфазного КЗ на стороне 0,4 кВ

Ток КЗ в точке К1.1 составит.

Определяется базисное сопротивление кабельной линии на участке РП – ТП №5.

Активное: $R'_6 = 0,028 \text{ о. е.}$, индуктивное: $X'_6 = 0,01 \text{ о. е.}$

Определяется базисные сопротивления трансформаторов, установленных на ТП №5. Мощность трансформаторов, установленных на ТП №5 составляет 160 кВА.

Активное сопротивление:

$$R' = \frac{5,5}{400} = 0,02 \text{ о. е.}$$

Базисное активное сопротивление трансформатора составит:

$$R_{\dot{6}.тр.} = 0,02 \cdot \frac{100}{0,16} = 12,5 \text{ о. е.}$$

Базисное индуктивное сопротивление трансформатора составит:

$$X_{\dot{6}.тр.} = \sqrt{4,5^2 - 0,02^2 \cdot \frac{100}{0,16}} = 4,47 \text{ о. е.}$$

Суммарное сопротивление до точки короткого замыкания К1.1. составит.

Активное:

$$R^{\Sigma} = R_{\dot{6}.} + R_{\dot{6}.тр.} = 0,019 + 4,47 = 12,544 \text{ о. е.}$$

Индуктивное:

$$X^{\Sigma} = X_{\dot{c}.} + X_{\dot{6}.} + X_{\dot{6}.тр.} = 0,493 + 0,019 + 4,47 = 4,982 \text{ о. е.}$$

Определяется полное сопротивление до точки КЗ К1.1.:

$$Z = \sqrt{12,544^2 + 4,982^2} = 13,5 \text{ о. е.}$$

В итоге получим ток КЗ:

$$I_{к.з.}^{(3)} = \frac{144,337}{13,5} = 10,69 \text{ кА.}$$

Расчёт трёхфазного тока КЗ на стороне 0,4 кВ трансформатора для следующих точек аналогичен предыдущему.

Результаты расчёта сведены в таблицу 11.

Расчёт токов однофазного КЗ на стороне 0,4 кВ.

Правила устройства электроустановок требуют определения тока, А:

$$I_{\text{к.з.}}^{(1)} = \frac{1}{\frac{K' \cdot U_a}{100 \cdot I_{\text{max.}}} + \frac{Z'_{\text{т.}}}{3 \cdot U_{\text{ф.}}}}, \quad (42)$$

где ΔU_a – активная составляющая потери напряжения, %;

$I_{\text{max.}}$ – максимальный рабочий ток линии, А;

K' – коэффициент определяется по [4] в зависимости от сечения фазного провода, мм² и $\cos\varphi$;

$\frac{Z'_{\text{т.}}}{3 \cdot U_{\text{ф.}}}$ – значение определяется по [4] в зависимости от типа принимаемого трансформатора, номинальной мощности и схемой соединения его обмоток.

$$\Delta U_a = I_{\text{max.}} \cdot R_0 \cdot L_{\text{уч.}} \cdot \cos\varphi \cdot \frac{100}{U_{\text{ф.}}}, \quad (43)$$

где R_0 – активное сопротивление 1 км фазного провода, Ом/м;

$L_{\text{уч.}}$ – длина участка кабельной линии в км;

$\cos\varphi$ – расчётный коэффициент мощности;

$U_{\text{ф}}$ – номинальное фазное напряжение сети, $U_{\text{ф}} = 220 \text{ В}$.

Рассчитается однофазный ток КЗ на участке ТП №1 – 16.

Исходные данные:

- максимальный рабочий ток КЛ на участке ТП №1 – 16 равен 230,6 А;
- сопротивление фазного провода (R_0) на этом участке 0,326 Ом;
- длина участка кабельной линии – 0,041 км;
- коэффициент мощности $\cos\varphi$ – 0,98;
- коэффициент K' принимаем 1,88;
- значение $\frac{Z'_{\text{т.}}}{3 \cdot U_{\text{ф.}}}$ принимаем 0,00029.

Активная составляющая потери напряжения составляет:

$$\Delta U_a = 146,54 \cdot 0,258 \cdot 0,036 \cdot 0,98 \cdot \frac{100}{220} = 0,606 \text{ \%}.$$

Определяется однофазный ток КЗ:

$$I_{\text{к.з.}}^{(1)} = \frac{1}{\frac{1,88 \cdot 0,606}{100 \cdot 147,2} + 0,00029} = 0,325 \text{ кА}.$$

Расчёт однофазных токов короткого замыкания для следующих участков аналогичен предыдущему. Результаты расчёта сведены в таблицу 12.

Таблица 12 – Расчёт токов однофазного КЗ

№ линии	Источник	Потребитель	I _{р.л.} , А		cosφ	Q _{ст} , мм ²	L _{уч} , км	R ₀ , Ом/км	K'	$\frac{Z'_T}{3 \cdot U_{\phi}}$	I _{к.з.} ⁽¹⁾ , кА
			Раб.	Авар.							
ТП №1											
1	ТП	7	152,82	305,64	0,98	150	0,05	0,326	1,73	0,00118	0,33
2	ТП	16	115,3	230,6	0,98	70	0,115	0,443	1,62		0,68
3	ТП	11	99,22	198,44	0,98	95	0,041	0,326	1,62		0,303
ТП №2											
1	ТП	13	99,22	198,44	0,98	70	0,052	0,443	1,62	0,00074	0,325
2	ТП	13а	115,3	230,6	0,98	95	0,045	0,326	1,88		0,325
3	ТП	15	99,22	198,44	0,98	70	0,045	0,443	1,62		0,325
4	ТП	17	99,22	198,44	0,98	70	0,065	0,443	1,88		0,32
ТП №3											
1	ТП	23	179,92	359,84	0,98	185	0,085	0,258	1,8	0,00047	1,24
2	ТП	21	99,22	198,44	0,98	70	0,015	0,443	1,62		1,16
3	ТП	19	99,22	198,44	0,98	70	0,01	0,443	1,67		1,27
4	ТП	15	105,7	211,44	0,8	95	0,09	0,326	1,67		1,39
ТП №4											
1	ТП	31	173,04	346,08	0,98	185	0,065	0,079	1,62	0,00047	0,844
2	ТП	33	99,22	198,44	0,95	70	0,055	0,443	1,67		0,816
3	ТП	35	175,62	175,62	0,9	150	0,62	0,326	1,62		0,82
ТП №5											
1	ТП	41	131,04	262,08	0,98	95	0,01	0,326	1,88	0,00029	0,134
2	ТП	39	99,22	198,44	0,98	70	0,09	0,443	1,62		0,129
ТП №6											
1	ТП	16	79,25	158,5	0,98	50	0,08	0,066	1,8	0,00047	0,729
2	ТП	20	147,15	294,3	0,98	120	0,044	0,057	1,67		0,811

Продолжение таблицы 12

№ линии	Источник	Потребитель	I _{р.л.} , А		cosφ	Q _{ст} , мм ²	L _{уч} , км	R ₀ , Ом/км	K'	$\frac{Z'_T}{3 \cdot U_{\phi}}$	I ⁽¹⁾ _{к.з.} , кА
			Раб.	Авар.							
3	ТП	24	147,15	294,3	0,97	120	0,258	0,62	1,8		0,842
4	ТП	20а	115,3	230,6	0,98	95	0,443	0,326	1,8		0,804
ТП №7											
1	ТП	6	89,53	179,07	0,98	70	0,045	0,443	1,88	0,00029	0,797
2	ТП	8	125,11	250,23	0,98	120	0,048	0,443	1,62		0,836
3	ТП	10	79,25	158,5	0,98	50	0,043	0,326	1,62		0,766
4	ТП	30а	166,3	332,6	0,98	150	0,061	0,443	1,62		0,832
ТП №8											
1	ТП	28	125,11	250,23	0,98	120	0,056	0,326	1,8	0,00047	0,799
2	ТП	24	175,62	351,25	0,98	150	0,056	0,443	1,67		0,841
3	ТП	28а	91,53	183,6	0,98	70	0,027	0,443	1,8		0,839
4	ТП	16а	50,34	100,68	0,97	35	0,137	0,62	1,8		0,49
ТП №9											
1	ТП	16	99,22	198,44	0,98	70	0,04	0,326	1,88	0,00029	0,809
2	ТП	14	99,22	198,44	0,98	70	0,069	0,206	1,62		0,749
3	ТП	14/1	99,22	198,44	0,98	70	0,05	0,443	1,62		0,787
4	ТП	14/2	113,11	226,23	0,98	70	0,045	0,443	1,62		0,796
5	ТП	18	75,96	151,93	0,98	50	0,071	0,326	1,62		0,695
6	ТП	18/1	184,8	369,6	0,98	185	0,162	0,206	1,62		0,764
ТП №10											
1	ТП	22а	101,29	202,58	0,98	70	0,036	0,443	1,8	0,00047	0,817
2	ТП	14/3	116,3	232,6	0,98	95	0,05	0,326	1,67		0,816
3	ТП	14/4	89,53	179,07	0,98	70	0,058	0,443	1,67		0,853
4	ТП	14/5	166,3	332,6	0,97	150	0,045	0,206	1,8		0,771

Выводы по разделу 4

В четвертом разделе ВКР выполнен расчёт токов короткого замыкания в системе электроснабжения микрорайона на 10 000 жителей, охватывающий сети высокого и низкого напряжения. Полученные значения токов позволят в дальнейшем определить параметры защитной аппаратуры, обеспечивающие оперативное выявление и локализацию аварийных ситуаций. Результаты подтверждают устойчивость системы к коротким замыканиям, минимизируют риск повреждения оборудования и гарантируют безопасность эксплуатации. Разработанные решения способствуют надёжному и бесперебойному энергоснабжению микрорайона, соответствуя нормативным требованиям и эксплуатационным условиям.

5 Выбор электрооборудования микрорайона

Все электрические аппараты выбираются по номинальному току и напряжению. И проверяются по всем условиям, обозначенным в [12].

5.1 Выбор и проверка оборудования на напряжение 10 кВ

Со стороны 10 кВ трансформатор подсоединяется к сети через разъединитель РЗ и выключатель нагрузки ВНА со встроенным предохранителем.

Разъединитель предназначен для отключения трансформатора при отключённой нагрузке.

Выключатель нагрузки – аппарат предназначен для включения и отключения нагрузочных цепей, вплоть до номинальных токов аппаратов. Выключатель нагрузки не способен отключать ток КЗ. Эта функция передаётся на последовательно включаемый предохранитель.

Выбор разъединителя.

Условия выбора.

По номинальному напряжению [21]:

$$U_{\text{ном.р.}} \geq U_{\text{с}}, \quad (44)$$

где $U_{\text{ном.р.}}$ – номинальное напряжение разъединителя, принятого к установке, кВ.

По длительному допустимому току [21]:

$$I_{\text{ном.р.}} \geq I_{\text{п.ав.}}, \quad (45)$$

где $I_{\text{п.ав.}}$ – расчётный ток в послеаварийном режиме, А;

$I_{\text{ном.р.}}$ – номинальный ток выбранного разъединителя, А [21].

По длительной стойкости [21]:

$$i_{\text{пр.скв.}} \geq i_y, \quad (46)$$

где $i_{\text{пр.скв.}}$ – предельный сквозной ток выбранного разъединителя кА [16].

По термической стойкости [21]:

$$I_t^2 \cdot t \geq B_k, \quad (47)$$

где I_t – предельный ток термической стойкости выбранного разъединителя, кА [21];

t – время действия термической стойкого тока, с [21];

B_k – тепловой импульс КЗ, кА²·с.

$$B_k = I_{\text{к.з.}}^2 \cdot t_{\text{ф}}, \quad (48)$$

где $I_{\text{к.з.}}$ – периодическая составляющая тока КЗ, кА.

Для приёма электрической энергии и её распределения на трансформаторной подстанции установлены камеры КСО – 386 на напряжение 10 кВ и номинальным током 400 А [17].

Пример выбора для ТП №1.

Принимаем в камерах КСО–386 разъединитель РВЗ – 10/400 УЗ внутренней установки, фигурного исполнения с заземляющими ножами.

По номинальному напряжению

$$10 \text{ кВ} = 10 \text{ кВ.}$$

По длительному допустимому току

$$400 \text{ А} > 31,67 \text{ А.}$$

По динамической стойкости

$$41 \text{ кА} > 6,44 \text{ кА.}$$

По термической стойкости.

Определяется тепловой импульс

$$B_k = 11,4^2 \cdot 2,07 = 269,02 \text{ кА}^2 \cdot \text{с.}$$

Проверка условия (57)

$$16^2 \cdot 4 = 1024 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} > 269,02 \text{ кА}^2 \cdot \text{с.}$$

условие выполняется.

Выбор разъединителя для других ТП микрорайона аналогичен предыдущему. Номинальное напряжение разъединителя для следующих трансформаторных подстанций составляет 10 кВ. Результаты выбора приведены в таблице 13.

Таблица 13 – Выбор разъединителя на ВН трансформаторов

ТП	Проверка разъединителя по длительно допустимому току $I_{ном.р.} \geq I_{п.ав.}$	И.з., кА	Проверка разъединителя на динамическую стойкость $i_{п.скв.} \geq i_{уд.}$	Ит., кА	t, с	Проверка разъединителя на термическую стойкость $I_t^2 \cdot t \geq B_k$	Тип разъединителя принятого к установки
1	$400 > 31,67$	11,4	$41 > 6,44$	16	4	$1024 > 269,02$	РВЗ–10/400 ИУЗ
2	$400 > 27,01$	11,34	$41 > 6,42$			$1024 > 266,2$	
3	$400 > 41,04$	11,54	$41 > 6,48$			$1024 > 275,67$	
4	$400 > 45,53$	11,47	$41 > 6,48$			$1024 > 272,33$	
5	$400 > 14,15$	11,23	$41 > 6,39$			$1024 > 261,05$	
6	$400 > 40,08$	11,43	$41 > 6,44$			$1024 > 270,43$	
7	$400 > 39,42$	11,25	$41 > 6,39$			$1024 > 261,98$	
8	$400 > 38,46$	11,45	$41 > 6,45$			$1024 > 271,38$	
9	$400 > 40,82$	11,34	$41 > 6,42$			$1024 > 266,19$	
10	$400 > 39,68$	11,31	$41 > 6,42$			$1024 > 264,78$	

Со стороны 10 кВ трансформатор подсоединяется к сети через выключатель нагрузки ВНА–10/630 У3 с высоковольтным предохранителем.

Выбор выключателя нагрузки.

Условия выбора выключателя.

По номинальному напряжению [22]:

$$U_{\text{ном.в.н.}} \geq U_{\text{с}}, \quad (49)$$

где $U_{\text{ном.в.н.}}$ – номинальное напряжение выключателя, принятого к установке, кВ [22].

По длительному допустимому току

$$I_{\text{ном.в.н.}} \geq I_{\text{п.ав.}}, \quad (50)$$

где $I_{\text{ном.в.н.}}$ – номинальный ток выключателя нагрузки, принятого к установке, А [22].

По динамической стойкости

$$i_{\text{пр.скв.}} \geq i_{\text{у}}, \quad (51)$$

где $i_{\text{пр.скв.}}$ – предельный сквозной ток выбранного выключателя нагрузки, кА [22].

По термической стойкости

$$I_t^2 \cdot t \geq B_{\text{к.}}, \quad (52)$$

где I_t – предельный ток термической стойкости выбранного выключателя нагрузки, с [22].

Пример выбора для ТП №1.

Принимаем к установке выключатель нагрузки ВНА–10/630 УЗ с ручным приводом, по конструкции исполненного со встроенным предохранителями типа ПКТ и выключающего устройства неавтоматического отключения.

По номинальному напряжению

$$10 \text{ кВ} \geq 10 \text{ кВ.}$$

По длительному допустимому току:

$$200 \text{ А} > 31,67 \text{ А.}$$

По динамической стойкости

$$80 \text{ кА} > 6,44 \text{ кА.}$$

По термической стойкости.

Определяется тепловой импульс:

$$W_k = 11,4^2 \cdot 2,07 = 269,02 \text{ кА}^2 \cdot \text{с.}$$

$$31,67^2 \cdot 1 = 992,25 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} > 269,02 \text{ кА}^2 \cdot \text{с.}$$

Выбор выключателя нагрузки для других трансформаторных подстанций аналогичен предыдущему. Номинальное напряжение выключателей нагрузки для следующих трансформаторных подстанций составляет 10 кВ. Результаты расчёта представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Результаты выбора выключателя нагрузки на стороне ВН трансформатора

Выбор выключателя								Выбор предохранителя		
Номер ввода линии в ТП	Проверка выключателя нагрузки по длительно допустимому току $I_{ном.в.н.} \geq I_{п.ав.}$	$I_{к.з.},$ кА	Проверка выключателя нагрузки на динамическую стойкость $i_{п.скв.} \geq i_{уд}$	$I_t,$ кА	$t,$ с	Проверка выключателя нагрузки на термическую стойкость $I_t^2 \cdot t \geq W_k$	Тип выключателя нагрузки, принятого к установке	Проверка по длительно допустимому току $I_{н.пр.} \geq I_{п.ав.}$	Характеристика токоограничения $I_{н.откл.} \geq I_{к.з.}$	Тип предохранителя, принятого к установке
1	$200 > 31,67$	11,4	$80 > 6,44$	31,5	1	$992,25 > 269,02$	ВНА–10/630 УЗ	$50 > 31,67$	$50 > 11,4$	ПКТ102–10–31,5–31,5УЗ
2	$200 > 27,01$	11,34	$80 > 6,42$	31,5		$992,25 > 266,2$	ВНА–10/630 УЗ	$50 > 27,01$	$50 > 11,34$	ПКТ102–10–31,5–31,5УЗ
3	$200 > 41,04$	11,54	$80 > 6,48$	31,5		$992,25 > 275,67$	ВНА–10/630 УЗ	$50 > 41,04$	$50 > 11,54$	ПКТ102–10–31,5–31,5УЗ
4	$200 > 45,53$	11,47	$80 > 6,48$	31,5		$992,25 > 272,33$	ВНА–10/630 УЗ	$50 > 45,53$	$50 > 11,47$	ПКТ102–10–31,5–31,5УЗ
5	$200 > 14,15$	11,23	$80 > 6,39$	31,5		$992,25 > 261,05$	ВНА–10/630 УЗ	$50 > 14,15$	$50 > 11,23$	ПКТ102–10–31,5–31,5УЗ
6	$200 > 40,08$	11,43	$80 > 6,44$	31,5		$992,25 > 270,43$	ВНА–10/630 УЗ	$50 > 40,08$	$50 > 11,43$	ПКТ102–10–31,5–31,5УЗ
7	$200 > 39,42$	11,25	$80 > 6,39$	31,5		$992,25 > 261,98$	ВНА–10/630 УЗ	$50 > 39,42$	$50 > 11,25$	ПКТ102–10–31,5–31,5УЗ
8	$200 > 38,46$	11,45	$80 > 6,45$	31,5		$992,25 > 271,38$	ВНА–10/630 УЗ	$50 > 38,46$	$50 > 11,45$	ПКТ102–10–31,5–31,5УЗ
9	$200 > 40,82$	11,34	$80 > 6,42$	31,5		$992,25 > 266,19$	ВНА–10/630 УЗ	$50 > 40,82$	$50 > 11,34$	ПКТ102–10–31,5–31,5УЗ
10	$200 > 39,68$	11,31	$80 > 6,42$	31,5		$992,25 > 264,78$	ВНА–10/630 УЗ	$50 > 39,68$	$50 > 11,31$	ПКТ102–10–31,5–31,5УЗ

Выбор предохранителя.

Условия выбора предохранителя.

По номинальному напряжению

$$U_{\text{ном.п.}} \geq U_{\text{с}}, \quad (53)$$

где $U_{\text{ном.п.}}$ – номинальное напряжение предохранителя, принятого к установке, кВ [23].

По длительному допустимому току

$$I_{\text{н.п.}} \geq I_{\text{п.ав.}}, \quad (54)$$

где $I_{\text{н.п.}}$ – номинальный ток выбранного предохранителя, А [23].

Характеристика токоограничения:

$$I_{\text{н.откл.}} > I_{\text{к.з.}}, \quad (55)$$

где $I_{\text{к.з.}}$ – ток КЗ, кА;

$I_{\text{н.откл.}}$ – номинальный ток отключения в кА, для выбранного предохранителя, [23].

Пример выбора для ТП №1.

Принимаем к установки предохранитель кварцевый типа ПКТ102–10–50–12,5 УЗ для защиты силовых трансформаторов линий.

По номинальному напряжению

$$10 \text{ кВ} = 10 \text{ кВ.}$$

По длительно допустимому току

$$50 \text{ кА} > 31,67 \text{ кА.}$$

Характеристика токоограничения

$$12,5 \text{ кА} > 11,4 \text{ кА}.$$

Выбор предохранителя для других трансформаторных подстанций аналогичен предыдущему. Номинальное напряжение предохранителей для следующих трансформаторных подстанций составляет 10 кВ. Результаты расчёта представлены в таблице 14.

5.2 Выбор и проверка оборудования на напряжение 0,4 кВ

Со стороны 0,4 кВ устанавливают автоматические выключатели ВА, которые защищают трансформатор от токов КЗ и перегрузки на стороне низшего напряжения.

На отходящих линиях устанавливают блок разъединитель – предохранитель для защиты от однофазных токов КЗ.

Выбор распределительных панелей на 0,4 кВ.

Для приёма и распределения электрической энергии на напряжение 0,4 кВ выбираем панели ЩО–70. В качестве вводной панели выбираем панель ЩО–70–2–44УЗ [18] с автоматическим выключателем ВА55–43 [19].

Выбор автоматического выключателя.

Условия выбора.

«По номинальному напряжению:

$$U_{\text{ном.а}} \geq U_{\text{с}}, \quad (56)$$

где $U_{\text{ном.а}}$ – номинальное напряжение автоматического выключателя, принятого к установке, кВ;

$U_{\text{с}}$ – напряжение сети, $U_{\text{с}} = 0,4 \text{ кВ}$ » [24].

«По длительному допустимому току.

Проверка автоматического выключателя:

$$I_{\text{ном.а}} \geq I_{\text{п.ав.}}, \quad (57)$$

где $I_{\text{п.ав.}}$ – расчётный ток в послеаварийном режиме, А;

$I_{\text{ном.а.}}$ – номинальный ток выбранного автоматического выключателя, А» [24].

«Проверка расцепителя:

$$I_{\text{ном.расц.}} \geq I_{\text{п.ав.}}, \quad (58)$$

где $I_{\text{ном.расц.}}$ – номинальный ток расцепителя, А» [24].

«Проверка автоматического выключателя на коммутационную способность:

$$I_{\text{откл.а.}} \geq I_{\text{к.з.}}, \quad (59)$$

где $I_{\text{откл.а.}}$ – номинальный ток отключения автоматического выключателя, кА» [24];

$I_{\text{к.з.}}$ – ток КЗ, кА.

Приведём пример расчёта ТП №1.

Принимаем к установке автоматический выключатель ВА55–43.

По номинальному напряжению

$$0,38 \text{ кВ} = 0,38 \text{ кВ.}$$

По длительному допустимому току.

Проверка автоматического выключателя.

$$1000 \text{ А} > 791,76 \text{ А.}$$

Проверка расцепителя

$$800 \text{ A} > 791,76 \text{ A}.$$

Проверка автоматического выключателя на коммутационную способность.

Ток КЗ на стороне 0,4 кВ трансформатора $I_{к.з.} = 23,75 \text{ кА}$.

$$35 \text{ кА} > 23,75 \text{ кА}.$$

Выбор автоматического выключателя для других трансформаторных подстанций аналогичен предыдущему. Автоматические выключатели, устанавливаемые на следующих трансформаторных подстанциях, имеют номинальное напряжение 0,38 кВ. Результаты расчёта представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Выбор автоматического выключателя на вводе 0,4 кВ

Номер ТП	Проверка по длительно допустимому току		Проверка автоматического выключателя на коммутационную способность	Тип автоматического выключателя, принятого к установке
	Автоматического выключателя $I_{ном.а.} \geq I_{п.ав.}$	Расцепителя $I_{ном.р.} \geq I_{п.ав.}$		
1	$1000 > 791,76$	$800 > 791,76$	$35 > 23,75$	ВА55–41
2	$1000 > 675,3$	$800 > 675,3$	$35 > 23,7$	ВА55–41
3	$1600 > 1026,1$	$1200 > 1026,1$	$35 > 22,92$	ВА55–43
4	$1600 > 1213,36$	$1500 > 1213,36$	$35 > 22,92$	ВА55–43
5	$400 > 353,63$	$400 > 353,63$	$20 > 10,69$	ВА57–37
6	$1600 > 1002,1$	$1500 > 1002,1$	$35 > 22,92$	ВА55–43
7	$1000 > 985,38$	$1000 > 985,38$	$35 > 22,89$	ВА55–41
8	$1000 > 951,55$	$1000 > 951,55$	$35 > 23,78$	ВА55–41
9	$1600 > 1020,48$	$1500 > 1020,48$	$35 > 22,88$	ВА55–43
10	$1000 > 992,02$	$1000 > 992,02$	$35 > 22,88$	ВА55–41

В качестве линейных панелей выбираем панели ЩО–70–2–03УЗ с разъединителем–предохранителем на номинальные токи 400 А и 250 А [18].

Выбор блока рубильник–предохранитель.

Предельный ток, при котором аппарат – разъединитель–предохранитель размыкает цепь, зависит от типа применяемого предохранителя.

Условия выбора предохранителя.

«По номинальному напряжению:

$$U_{\text{ном.рпс.}} \geq U_{\text{с}}, \quad (60)$$

где $U_{\text{ном.рпс.}}$ – номинальное напряжение разъединителей–предохранителей, кВ» [25].

По длительно допустимому току.

«Проверка предохранителя:

$$I_{\text{ном.пр.}} \geq I_{\text{п.ав.}}, \quad (61)$$

где $I_{\text{ном.пр.}}$ – номинальный ток выбранного предохранителя, А» [25].

«Проверка плавкой вставки

$$I_{\text{ном.пл.вст.}} \geq I_{\text{п.ав.}}, \quad (62)$$

где $I_{\text{ном.пл.вст.}}$ – номинальный ток плавкой вставки, А» [18].

«Кроме того, ток плавкой вставки должен соответствовать кратностям токов однофазных КЗ в сетях с заземлённой нейтралью т.е.,

$$I_{\text{к.з.}}^{(1)} \geq K_{\text{з.о.}} \cdot I_{\text{ном.пл.вст.}}, \quad (63)$$

где $I_{\text{к.з.}}^{(1)}$ – ток однофазного КЗ, кА;

$K_{\text{з.о.}}$ – кратность тока замыкания. $K_{\text{з.о.}} = 3$ – в помещениях с нормальной средой» [25].

«Проверка предохранителя на коммутационную способность

$$I_{\text{откл.пр.}} \geq I_{\text{к.з.}}^{(1)}, \quad (64)$$

где $I_{\text{откл.пр.}}$ – номинальный ток отключения, кА» [25].

Выбор предохранителя.

Приведём пример выбора для ТП №1.

Принимаем к установки плавкий предохранитель типа РПС–2.

По номинальному напряжению

$$0,38 \text{ кВ} = 0,38 \text{ кВ}.$$

По длительно допустимому току.

Проверка предохранителя

$$250 \text{ А} > 152,82 \text{ А}.$$

Проверка плавкой вставки

$$250 \text{ А} > 152,82 \text{ А}.$$

Проверка соответствия тока плавкой вставки кратностям тока плавкой вставки кратностям токов однофазных КЗ в сетях с заземлённой нейтралью.

Ток однофазного КЗ по результатам расчёта на участке кабельной линии ТП №1 – 16, $I_{\text{к.з.}}^{(1)} = 0,33 \text{ кА}$.

Проверка условия (64):

$$0,33 \text{ А} < 3 \cdot 0,4 = 1,2 \text{ А} – \text{условие выполняется}.$$

Проверка предохранителя на коммутационную способность

$$6 \text{ кА} > 0,33 \text{ кА}.$$

Предохранители, устанавливаемые на следующих трансформаторных подстанциях, имеют номинальное напряжение 0,38 кВ.

Условия выбора рубильника

По длительному допустимому току

$$250 \text{ A} > 152,82 \text{ A}.$$

Выбор разъединителей–предохранителей для других отходящих кабельных линий от трансформаторной подстанции аналогичен предыдущему. Результаты выбора разъединителей–предохранителей приведены в таблице 16.

Таблица 16 – Результаты выбора разъединителей–предохранителей

Наименование объекта	Потребитель	Р _{р.л.} , кВт	cosφ	I _{ав.} , А	Разъединитель–предохранитель	I _{пл.вст.} , А
ТП1	—	—	—	—	—	—
Жилые дома	7	272,76	0,98	105,7	РПС–2 250 А	125
Жилой дом	11	47,75	0,98	198,44	РПС–2 250 А	200
Детский сад	16	147,2	0,97	230,6	РПС–2 250 А	250
ТП2	—	—	—	—	—	—
Жилой дом	13	128	0,98	198,44	РПС–2 250 А	200
Детский сад	13а	147,2	0,92	230,6	РПС–2 250 А	250
Жилой дом	15	128	0,98	198,44	РПС–2 250 А	200
Жилой дом	17	128	0,98	198,44	РПС–2 250 А	200
ТП3	—	—	—	—	—	—
Школа	23	225	0,92	359,84	РПС–4 400 А	400
Жилой дом	21	128	0,98	198,44	РПС–2 250 А	200
Жилой дом	19	128	0,98	198,44	РПС–2 250 А	200
Жилые дома	15	272,76	0,98	211,44	РПС–2 250 А	250
ТП4	—	—	—	—	—	—
Жилые дома	31	441,9	0,98	346,08	РПС–4 400 А	400
Жилые дома	33	128	0,98	198,44	РПС–2 250 А	200
Жилые дома	35	226,56	0,98	175,62	РПС–2 250 А	200
ТП5	—	—	—	—	—	—
Техникум	41	138	0,92	262,08	РПС–4 400 А	320
Жилой дом	39	128	0,98	198,44	РПС–2 250 А	200
ТП6	—	—	—	—	—	—
Жилой дом	16	189,83	0,98	294,3	РПС–4 400 А	320
Жилой дом	20	189,83	0,8	294,3	РПС–4 400 А	320
Жилой дом	24	189,83	0,98	294,3	РПС–4 400 А	320
Детский сад	20а	147,2	0,92	230,6	РПС–2 250 А	250

Продолжение таблица 16

Наименование объекта	Потребитель	$P_{р.л.},$ кВт	$\cos\varphi$	$I_{ав.},$ А	Разъединитель– предохранитель	$I_{пл.вст.},$ А
ТП7	–	–	–	–	–	–
Жилой дом	8	322,08	0,98	250,23	РПС–4 400 А	320
Жилой дом	6	115,5	0,98	179,07	РПС–2 250 А	200
Жилой дом	30а	214,5	0,98	332,6	РПС–4 400 А	400
Жилой дом	10	102,24	0,98	158,5	РПС–2 250 А	160
ТП8	–	–	–	–	–	–
Жилой дом	28	322,08	0,98	250,23	РПС–4 400 А	320
Жилой дом	24	226,56	0,98	351,25	РПС–4 400 А	400
Начальная школа	16а	60,3	0,92	100,68	РПС–2 250 А	125
Жилые дома	28а	118,08	0,98	183,6	РПС–2 250 А	200
ТП9	–	–	–	–	–	–
Жилой дом	16	128	0,98	198,44	РПС–2 250 А	200
Жилой дом	14	128	0,98	198,44	РПС–2 250 А	200
Жилой дом	14/1	128	0,98	198,44	РПС–2 250 А	200
Жилой дом	14/2	145,92	0,98	226,23	РПС–2 250 А	250
Жилой дом	18	98	0,98	151,93	РПС–2 250 А	160
Жилой дом	18/1	238,34	0,98	369,6	РПС–4 400 А	400
ТП10	–	–	–	–	–	–
Торговый центр	22а	240	0,92	202,58	РПС–2 250 А	250
Жилой дом	14/3	150	0,98	232,6	РПС–2 250 А	250
Жилой дом	14/5	115,5	0,98	179,07	РПС–2 250 А	200
Жилой дом	14/4	214,5	0,98	332,6	РПС–4 400 А	400

В качестве секционной панели выбирается панель ЩО–70–2–72УЗ на номинальный ток 1000 А [18].

Выводы по разделу 5

В пятом разделе ВКР осуществлён выбор и проверка электрооборудования для системы электроснабжения микрорайона на 10 000 жителей, обеспечивающие надёжное распределение электроэнергии. Для сетей 10 кВ выбраны камеры КСО–386 с разъединителями РВЗ–10/400 УЗ, выключателями нагрузки ВНА–10/630 УЗ и предохранителями ПКТ102, что гарантирует безопасное подключение трансформаторов и устойчивое распределение энергии. Для сетей 0,4 кВ подобраны панели ЩО–70, включая вводные панели с автоматическими выключателями ВА55, линейные панели с разъединителями–предохранителями на токи 400 А и 250 А, а также секционные панели, обеспечивающие гибкость и надёжность распределения.

Заключение

В рамках выпускной квалификационной работы разработана система электроснабжения микрорайона города на 10 000 жителей, обеспечивающая надёжное, эффективное и перспективное энергоснабжение. Проект охватывает полный цикл проектирования — от расчёта электрических нагрузок до выбора оборудования и схем электроснабжения, учитывая как текущие, так и перспективные потребности микрорайона.

На этапе расчёта электрических нагрузок определены суммарные мощности жилых зданий, общественных объектов и сетей наружного освещения. Составлены графики суточных и сезонных изменений потребления электроэнергии, а также построена картограмма нагрузок, позволяющая выявить зоны с повышенным энергопотреблением. Эти данные стали основой для выбора числа и мощности трансформаторов, обеспечивающих баланс между надёжностью, резервированием и экономичностью системы.

Выполнен комплексный расчёт и выбор схем сетей внешнего и внутреннего электроснабжения микрорайона на 10 000 жителей. Определены число и мощность трансформаторов, обеспечивающие баланс надёжности, экономичности и перспективного роста нагрузок. Выбраны силовые трансформаторы типа ТМГ различных мощностей.

Рассчитаны сети низкого напряжения (0,4 кВ) с выбором сечений кабелей, учётом потерь и проверкой токовых нагрузок, что гарантирует стабильное питание жилых, общественных объектов и наружного освещения. Кабельная сеть 0,4 кВ выполнена четырёхжильным кабелем ААБл различных сечений.

Для сетей высокого напряжения (10 кВ) определены параметры проводников, токи, потери мощности и напряжения, сформирована устойчивая и резервированная система. Кабельная сеть 0,4 кВ выполнена четырёхжильным кабелем ААБ различных сечений.

Разработанные схемы сетей гарантируют устойчивую передачу и распределение электроэнергии к трансформаторным подстанциям и конечным потребителям, включая жилые дома, школы, магазины и уличное освещение. Особое внимание уделено резервированию, что обеспечивает бесперебойность питания при аварийных ситуациях.

Для защиты системы выполнен расчёт токов короткого замыкания, позволивший определить параметры защитной аппаратуры. Это обеспечивает оперативное выявление и локализацию неисправностей, минимизируя риск повреждения оборудования и повышая безопасность эксплуатации сети.

Осуществлён выбор и проверка электрооборудования для системы электроснабжения микрорайона на 10 000 жителей, обеспечивающие надёжное распределение электроэнергии. Для сетей 10 кВ выбраны камеры КСО–386 с разъединителями РВЗ–10/400 УЗ, выключателями нагрузки ВНА–10/630 УЗ и предохранителями ПКТ102, что гарантирует безопасное подключение трансформаторов и устойчивое распределение энергии. Для сетей 0,4 кВ подобраны панели ЩО–70, включая вводные панели с автоматическими выключателями ВА55, линейные панели с разъединителями–предохранителями на токи 400 А и 250 А, а также секционные панели, обеспечивающие гибкость и надёжность распределения. Выбранное оборудование соответствует расчётным параметрам, нормативам и условиям эксплуатации, обеспечивая эффективное и безопасное энергоснабжение микрорайона.

Разработанная система электроснабжения отвечает современным требованиям энергоэффективности, безопасности и экологичности. Проект учитывает возможность расширения микрорайона, роста нагрузок и интеграции новых объектов инфраструктуры. Все решения подтверждены расчётами, соответствуют действующим стандартам и нормативам, и ориентированы на обеспечение комфортных условий для жителей, бесперебойной работы общественных учреждений и устойчивого функционирования коммунальных систем.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Барыбина Ю.Г. Справочник по проектированию электроснабжения. М. : Энергоатомиздат, 2009. 576 с.
2. Герасимов В.Г. Электротехнический справочник: В 4т. – Т. 3. Производство и распределение электрической энергии – 9-е изд., стереот. М.: Изд-во МЭИ, 2004. 964 с.
3. ГОСТ 14209–85. Трансформаторы силовые и масляные общего назначения. Допустимые перегрузки трансформаторов // Консультант плюс: справочно–правовая система
4. ГОСТ 28249–93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ // Консультант плюс: справочно–правовая система
5. Григорьев В.И. Электроснабжение и электрооборудование жилых домов и общественных зданий. М.: Энергоиздат, 2003. 212 с.
6. Гужов Н.П. Ольховский В.Я., Павлюченко Д.А. Системы электроснабжения : учебник. Ростов н/Д. : Феникс, 2011. 382 с.
7. Ершов А.М. Электроснабжение промышленных предприятий и городов: курс лекций. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2020. 324 с.
8. Кнорринг Г.М. Справочная книга для проектирования электрического освещения. СПб. : Энергоатомиздат, 2006. 204 с.
9. Правила устройства электроустановок: Все действующие разделы ПУЭ–6 и ПУЭ–7 // Консультант плюс: справочно–правовая система
10. РД 153–34.0–20.527–98 Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования // Консультант плюс: справочно–правовая система
11. РД 34.20.185–94. Инструкции по проектированию городских электрических сетей // Консультант плюс: справочно–правовая система
12. Рожкова Л.Д. Корнеева Л.К., Чиркова Т.В. Электрооборудование электрических станций и подстанций. М. : Академия, 2008. 448 с.

13. СН 541–82 Строительные нормы. Инструкция по проектированию наружного освещения городов, поселков и сельских населенных пунктов // Консультант плюс: справочно–правовая система

14. СП 256.1325800.2016. Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа // Консультант плюс: справочно–правовая система

15. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23–05–95· (с Изменениями N 1, 2) // Консультант плюс: справочно–правовая система

16. Технические характеристики силовых трансформаторов ТМГ. URL: <https://alttrans.nt-rt.ru/images/manuals/tmg-dannie.pdf> (дата обращения 14.04.2025)

17. Технические характеристики камеры КСО – 386. URL: <https://gsktp.nt-rt.ru/images/manuals/kso386.pdf> (дата обращения 14.04.2025)

18. Технические характеристики щитов ЩО–70. URL: https://www.apparat.su/doc/technicheskaya_infirmaciya_scho-70.pdf?ysclid=m9h7y6awo1881107053 (дата обращения 14.04.2025)

19. Технические характеристики автоматических выключателей ВА55. URL: <https://keaz.ru/catalog/product/323417?ysclid=m9h7zcvoae192325683> (дата обращения 14.04.2025)

20. Технические характеристики кабелей. URL: <https://k-ps.ru/spravochnik/kabeli-silovyye/s-bumajnoi-izolyaciei/> (дата обращения 14.04.2025)

21. Файбисович Д.Л. Справочник по проектированию электрических сетей. М.: ЭНАС, 2012. 376 с.

22. Холянов В.С., Холянова О.М. Электроснабжение непромышленных объектов. Владивосток: Изд–во ДВГТУ, 2007. 200 с.

23. Шахнин В.А. Электроснабжение технических объектов, зданий и сооружений : учеб. пособие. Владимир : Аркаим, 2014. 196 с.

24. Шахнин В.А. Рощина С.И. Электроснабжение микрорайона многоэтажной жилой застройки : учеб. пособие. Владим. гос. ун–т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. Владимир : Изд–во ВлГУ, 2017. 107 с.

25. Шведов Г.В. Электроснабжение городов: электропотребление, расчетные нагрузки, распределительные сети : учебное пособие. М. : МЭИ, 2012. 269 с.