

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

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки / специальности)

Электроснабжение

(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Проектирование системы электроснабжения микрорайона многоэтажной застройки
«Лесная слобода»

Обучающийся

А.А. Верин

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, А.Н. Черненко

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

Тольятти 2023

Аннотация

Темой бакалаврской работы является: «Проектирование системы электроснабжения микрорайона многоэтажной застройки «Лесная слобода»».

При выполнении работы были произведены расчеты по определению ожидаемой электрической нагрузки, создаваемой жилыми многоквартирными домами и прочими зданиями различного назначения, расположенными на территории квартала. Определены параметры системы наружного освещения, позволяющей обеспечить требуемую освещенность территории.

Выбран тип силовых трансформаторов, рассчитана их номинальная мощность и необходимое количество для размещения на трансформаторных подстанциях 10/0,4 кВ жилого квартала.

Произведено обоснование выбора оптимальной схемы для распределения электрической энергии по территории жилого квартала на напряжении 10 кВ.

Выполнены выбор и проверка основного устанавливаемого на ТП электрооборудования, произведен расчет токов короткого замыкания на шинах напряжением 10 и 0,4 кВ ТП. Все выбранное в работе электрооборудование, кабели и другие проводники были проверены на устойчивость к термическому и электродинамическому воздействию токов КЗ.

Произведен расчет параметров системы защитного заземления на трансформаторной подстанции микрорайона.

Бакалаврская работа состоит из записки, содержащей 57 страниц, включает в себя 14 таблиц и 5 графических рисунков. К записке прикладываются 6 чертежей формата А1.

Содержание

Введение.....	5
1 Определение расчетных нагрузок по многоквартирным высотным домам жилого микрорайона.....	6
2 Определение расчетных нагрузок по общественным зданиям, расположенным в жилом микрорайоне «Лесная слобода»	13
3 Определение параметров системы наружного освещения жилого микрорайона	15
4 Определение суммарной нагрузки по жилому микрорайону «Лесная слобода»	18
5 Выбор номинальной мощности и количества силовых трансформаторов для размещения в ТП 10/0,4 кВ микрорайона.....	19
6 Выбор схемы электрических сетей на номинальное напряжение 10 кВ в жилом микрорайоне «Лесная слобода»	20
7 Расчет сечения, прокладываемых кабельных линий в жилом микрорайоне.....	22
7.1 Расчет линий, выполненных кабелями на напряжение 10 кВ, соединяющих ТП.....	24
7.2 Расчет линий, выполненных кабелями на напряжение 0,4 кВ	24
8 Расчет токов КЗ на сторонах 10 и 0,4 кВ ТП.....	27
8.1 Исходные данные для расчета токов КЗ и построение расчетной схемы	27
8.2 Определение активных и реактивных сопротивлений схемы замещения	28
8.3 Определение значений токов короткого замыкания в т. 1	30
8.4 Определение значений токов короткого замыкания в т. 2	31
8.5 Определение значений токов короткого замыкания в т. 3	32
9 Выполнение проверки выбранных кабельных линий напряжением 10 и 0,4 кВ	34
9.1 Проверка кабельных линий с номинальным напряжением 10кВ	34

9.2 Проверка кабельных линий с номинальным напряжением 0,4 кВ	36
10 Определение параметров основного электрооборудования напряжением 10 и 0,4 кВ	39
10.1 Выбор электрооборудования на стороне 10 кВ	39
10.2 Выбор электрооборудования на стороне 0,4 кВ	41
10.3 Выбор коммутационно-защитной аппаратуры для отходящих линий 0,4 кВ	43
11 Расчет уставок МТЗ линий напряжением 10 кВ	47
12 Определение параметров системы заземления на трансформаторных подстанциях микрорайона «Лесная слобода»	51
Заключение	53
Список используемых источников	55

Введение

«Системой электроснабжения города называется совокупность электрических станций, понижающих и преобразовательных подстанций, питающих и распределительных линий и электроприемников, обеспечивающих технологические процессы коммунально-бытовых, промышленных и транспортных потребителей электроэнергии, расположенных на территории города и частично в пригородной зоне.

Источниками питания системы электроснабжения города являются городские электрические станции и понижающие подстанции. Центром питания называется распределительное устройство генераторного напряжения электрической станции или распределительное устройство вторичного напряжения понижающей подстанции, к шинам которого присоединяются распределительные сети данного района. Электрическими станциями являются обычно теплоэлектроцентрали, обеспечивающие тепловой и электрической энергией коммунальные и промышленные объекты» [1-4].

«Система электроснабжения города должна удовлетворять ряду требований:

- создание безопасных условий функционирования системы электроснабжения и обеспечение требуемой надежности по электроснабжению электроприемников;
- обеспечение потребителей электроэнергией, соответствующей ГОСТ 32144-2013;
- баланс между малыми затратами на строительство и последующую эксплуатацию системы электроснабжения города при соблюдении экологичности и минимизации негативного воздействия на внешнюю среду» [3].

Цель бакалаврской работы заключается в создании условий для надежного электроснабжения электроприемников микрорайона «Лесная слобода» качественной электрической энергией.

1 Определение расчетных нагрузок по многоквартирным высотным домам жилого микрорайона

Определение расчетной нагрузки от городских потребителей электрической энергии условно можно разбить на ряд этапов:

- «Определяется ориентировочное значение суммарной расчетной нагрузки района (микрорайона) по удельным нагрузкам жилых и общественных зданий и площади микрорайона.
- Ориентировочно выбирается число и мощность ТП, определяется состав потребителей каждой подстанции.
- Определяются расчетные нагрузки на вводе в жилые и общественные здания (на шинах ВРУ или ГРЩ).
- Определяется конфигурация схемы распределения электрической энергии на напряжении 0,38 кВ и определяются расчетные электрические нагрузки в элементах электрической сети 0,38 кВ и на шинах 0,4 кВ ТП.
- Уточняется мощность трансформаторов ТП, определяются потери мощности в них и мощность на стороне ВН трансформаторов.
- Выбирается схема распределения электроэнергии на стороне 6-10 кВ и определяются расчетные электрические нагрузки в элементах сети напряжением для нормальных и послеаварийных режимов.
- Определяются расчетные нагрузки на шинах РП (РУ) 6-10 кВ.
- Для потребителей с суммарной установленной мощностью более 150 кВт определяется расчетное значение коэффициента реактивной мощности и сравнивается с нормативным значением $\text{tg}\varphi$ в точке балансового разграничения сетей. Если $\text{tg}\varphi_p > \text{tg}\varphi_n$, решаются вопросы компенсации реактивной мощности в сети потребителя и уточняются расчетные нагрузки» [5-7].

Производим определение расчетной нагрузки на вводе в многоэтажный жилой дом.

«Расчетная активная мощность квартир жилого дома» [5]:

$$P_{\kappa\theta} = P_{\kappa\theta, y\theta} \cdot n, \quad (1)$$

$$P_{\kappa\theta} = 1,94 \cdot 20 = 39 \text{ кВт}.$$

«Расчетная реактивная мощность квартир жилого дома» [5]:

$$Q_{\kappa\theta} = P_{\kappa\theta} \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (2)$$

$$Q_{\kappa\theta} = 39 \cdot 0,2 = 7,8 \text{ квар}.$$

«Расчетная полная мощность квартир жилого дома» [5]:

$$S_{\kappa\theta} = \sqrt{P_{\kappa\theta}^2 + Q_{\kappa\theta}^2}, \quad (3)$$

$$S_{\kappa\theta} = \sqrt{39^2 + 7,8^2} = 39,6 \text{ кВА}.$$

«Расчетная активная мощность лифтовых установок» [5]:

$$P_{p.l} = k'_c \cdot \sum_1^{n_l} P_{n_i}, \quad (4)$$

«Расчетная активная мощность сантехнических установок» [5]:

$$P_{cm.y} = k''_c \cdot \sum_1^n P_{cm.y_i}, \quad (5)$$

$$P_{cm.y} = 1 \cdot 2 \cdot 11 = 22 \text{ кВт}.$$

«Расчетная реактивная мощность сантехнических установок» [5]:

$$Q_{cm.y} = P_{cm.y} \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (6)$$

$$Q_{cm,y} = 22 \cdot 0,75 = 16,5 \text{ квар.}$$

«Расчетная полная мощность сантехнических установок» [5]:

$$S_{cm,y} = \sqrt{P_{cm,y}^2 + Q_{cm,y}^2}, \quad (7)$$

$$S_{cm,y} = \sqrt{22^2 + 16,5^2} = 28 \text{ кВА.}$$

«Расчетная активная мощность силовых ЭП» [5]:

$$P_c = P_{p.l} + P_{cm,y}, \quad (8)$$

$$P_c = 0 + 22 = 22 \text{ кВт.}$$

«Расчетная реактивная мощность силовых ЭП» [5]:

$$Q_c = Q_{p.l} + Q_{cm,y}, \quad (9)$$

$$Q_c = 0 + 16,5 = 16,5 \text{ квар.}$$

«Расчетная полная мощность силовых ЭП» [5]:

$$S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2} \quad (10)$$

$$S_c = \sqrt{22^2 + 16,5^2} = 28 \text{ кВА.}$$

«Расчетная активная мощность на вводе жилого дома» [5]:

$$P_{BPV \text{ №1}} = P_{кв} + k_y \cdot P_c, \quad (11)$$

$$P_{BPV \text{ №1}} = 39 + 0,9 \cdot 22 = 58,5 \text{ кВт.}$$

«Расчетная реактивная мощность на вводе жилого дома» [5]:

$$Q_{BPY\text{ №1}} = Q_{\kappa\theta} + k_y \cdot Q_c; \quad (12)$$

$$Q_{BPY \text{ №1}} = 7,8 + 0,9 \cdot 16,5 = 22,6 \text{ квар.}$$

«Расчетная полная мощность на вводе жилого дома» [5]:

$$S_{BPY\text{ №1}} = \sqrt{P_{BPY\text{ №1}}^2 + Q_{BPY\text{ №1}}^2}, \quad (13)$$

$$S_{BPY \text{ №1}} = \sqrt{58,5^2 + 22,6^2} = 62,7 \text{ кВА.}$$

По остальным вводно-распределительным устройствам, рассматриваемого жилого дома расчёты производим таким же образом. После нахождения нагрузки по всем ВРУ жилого дома находим суммарные значения.

Определим общее значение активной нагрузки, потребляемой жилым многоквартирным домом:

$$P_{p.\text{ж.д}} = \sum_1^n P_{BPY_i} \text{ кВт}, \quad (14)$$

$$P_{p.\text{ж.д}} = 58,5 + 109,1 + 116,4 + 122,4 + 158,5 + 117,3 + 38,6 = 720,7 \text{ кВт.}$$

Определим общее значение реактивной нагрузки, потребляемой жилым многоквартирным домом:

$$Q_{p.\text{ж.д}} = \sum_1^n Q_{BPY_i} \text{ квар}, \quad (15)$$

$$Q_{p.\text{ж.д}} = 22,6 + 34,4 + 35,9 + 37 + 50,6 + 36 + 7,7 = 224,2 \text{ квар.}$$

Определим общее значение полной нагрузки, потребляемой жилым многоквартирным домом по формуле:

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

$$S_{p.ж.д} = \sqrt{720,7^2 + 224,2^2} = 754,8 \text{ кВА}.$$

В остальных жилых многоквартирных домах рассматриваемой части жилого квартала нагрузки определяем по приведенным выше формулам, а полученные результаты расчетов заносим в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты расчета нагрузок на вводах для остальных жилых многоквартирных домов рассматриваемой части жилого квартала

№ ВРУ жилого дома	$P_{кв},$ кВт	$Q_{кв},$ квар	$S_{кв},$ кВА	$P_c,$ кВт	$Q_c,$ квар	$S_c,$ кВА	$P_{ВРУ},$ кВт	$Q_{ВРУ},$ квар	$S_{ВРУ},$ кВА
Многоквартирный дом по плану жилого квартала №7									
1	150	30	153	36,4	33,348	49,37	182,8	60	192,4
Многоквартирный дом по плану жилого квартала №11а									
1	136,3	27,26	139	36,4	33,348	49,37	169,1	57,3	178,5
Многоквартирный дом по плану жилого квартала №11б									
1	148,2	29,6	151,1	36,4	33,348	49,37	181	59,6	190,6
Многоквартирный дом по плану жилого квартала №15									
1	38,6	7,72	39,4	22	16,5	27,5	58,4	22,57	62,6
2	96,14	19,23	98	14,4	16,848	22,16	109,1	34,4	114,4
3	103,4	20,7	105,5	14,4	16,848	22,16	116,4	35,86	121,8
4	109,4	21,88	111,6	14,4	16,848	22,16	122,3	37	127,8
5	139,1	27,82	141,9	21,6	25,272	33,25	158,5	50,6	166,4

Продолжение таблицы 1

№ ВРУ жилого дома	$P_{кв},$ кВт	$Q_{кв},$ квар	$S_{кв},$ кВА	$P_c,$ кВт	$Q_c,$ квар	$S_c,$ кВА	$P_{ВРУ},$ кВт	$Q_{ВРУ},$ квар	$S_{ВРУ},$ кВА
6	104,3	20,86	106,4	14,4	16,848	22,16	117,3	36	122,7
7	38,6	7,72	39,4	-	-	-	38,6	7,72	39,4
Суммарная нагрузка по всем ВРУ							720,7	224,15	754,7
Многоквартирный дом по плану жилого квартала 15д									
1	148,2	29,64	151	21,6	25,3	33,26	167,6	52,41	175,6
2	38,6	7,72	39,4	22	16,5	27,5	58,4	22,57	62,6
Суммарная нагрузка по всем ВРУ							226	74,98	238,2 3
Многоквартирный дом по плану жилого квартала №17									
1	65,25	13,05	66,54	7,2	8,4	11,06	71,73	20,61	74,63
2	98,92	19,78	100,9	14,4	16,848	22,16	111,9	34,94	117,2 1
3	116	23,2	118,3	43,6	41,8	60,4	155,2	60,82	166,7
Суммарная нагрузка по всем ВРУ							338,9	116,37	358,3 4
Многоквартирный дом по плану жилого квартала №17а									
1	136,3	27,26	169	36,4	33,348	49,37	169,1	57,3	178,5

Расчетные активные нагрузки по остальным жилым многоквартирным домам квартала приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетные активные нагрузки по остальным жилым многоквартирным домам квартала

№ здания на плане квартала	P , кВт
17б	7
17в	340
17г	900
17д	80
17е	80

Выводы по разделу: выполнен расчет ожидаемых расчетных нагрузок по каждому жилому многоквартирному дому рассматриваемого микрорайона. Расчетная нагрузка определялась по жилым квартирам и санитарно-техническим установкам, а также подъемно транспортным установкам для ВРУ каждого дома в микрорайоне.

2 Определение расчетных нагрузок по общественным зданиям, расположенным в жилом микрорайоне «Лесная слобода»

«При расчете нагрузок общественных зданий основными методами являются: на предпроектной стадии расчет по укрупненным удельным электрическим нагрузкам (распределенной нагрузке) на основании таблицы 6.14 СНИП 31.110.2003. Далее на стадии рабочего проектирования электроснабжения отдельного потребителя расчет выполняется по методу коэффициента спроса. В настоящее время наблюдается большое разнообразие электроприемников общественных и производственных зданий, часто сами здания многофункциональны - это и жилищно-офисные комплексы, и деловые центры с наличием производственных площадей и офисных помещений, и торгово-развлекательные комплексы. Вместе с тем можно выделить некоторые характерные электроприемники, влияющие на работу систем электроснабжения» [8-10].

Расчетное значение активной мощности, расходуемой на собственные нужды гаражным комплексом определяем по формуле:

$$P_{\text{э.к}} = P_{\text{э.к. уд}} \cdot S, \quad (17)$$
$$P_{\text{э.к}} = 0,023 \cdot 14700 = 338 \text{ кВт}.$$

Найдем расчетную реактивную мощность, потребляемую ГСК:

$$Q_{\text{э.к}} = P_{\text{э.к}} \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (18)$$
$$Q_{\text{э.к}} = 338 \cdot 0,2 = 67,6 \text{ квар}.$$

Найдем расчетную полную мощность, потребляемую ГСК:

$$S_{\text{э.к}} = \sqrt{P_{\text{э.к}}^2 + Q_{\text{э.к}}^2}, \quad (19)$$

$$S_{\Sigma, \kappa} = \sqrt{338^2 + 67,6^2} = 344,7 \text{ кВА}.$$

Для остальных объектов, расположенных на территории квартала нагрузки определяем по представленным выше формулам, полученные значения заносим в таблицу 3.

Таблица 3 – Результаты определения расчетных мощностей для остальных объектов, расположенных на территории квартала

Объект		$S, \text{ м}^2$	$P, \text{ кВт}$	$Q, \text{ квар}$	$S, \text{ кВА}$
ГСК		14700	338	67,6	344,7
Объект торгово-офисного назначения 1		400	14,4	6,9	16
Объект торгово-офисного назначения 2		7350	264,6	127	293,5
Объект торгово-офисного назначения 3	Вводно-распред. уст-во 1	8400	302,4	145,2	335,4
	Вводно-распред. уст-во 2	5025	180,9	86,8	200,7

Выводы по разделу: выполнено определение расчетных мощностей для ГСК и объектам торгово-офисного назначения расположенных в микрорайоне «Лесная слобода».

3 Определение параметров системы наружного освещения жилого микрорайона

«Наибольшее распространение в сетях уличного освещения получили разрядные лампы (РЛ) - лампы, в которых оптическое излучение возникает в результате электрического разряда в газах, парах или их смесях.

Особенности РЛ и области применения определяются тем, что РЛ имеют более высокую световую отдачу и больший срок службы по сравнению с ЛН, а также могут иметь разнообразные спектры излучения и широкий диапазон значений мощности, яркости и других параметров. РЛ оттесняют ЛН, и их доля в осветительных установках (ОУ) постоянно увеличивается.

Недостатком РЛ является необходимость применения пускорегулирующей аппаратуры (ПРА) вследствие необходимости для их зажигания подачи импульса напряжения, превышающего на 30 % и более номинальное напряжение (220 В) и балласта, ограничивающего ток разряда. Номинальный режим устанавливается в РЛ спустя некоторое время после включения.

Повторное зажигание РЛ при высоком и сверхвысоком давлении без специальных приемов возможно только по истечении некоторого времени после включения.

Вид разряда в РЛ может быть тлеющий, дуговой или импульсный.

Тлеющий разряд характеризуется малой плотностью тока на катоде (от 10^{-5} до 10^{-2} А/м²) и низким давлением газа или пара (несколько десятков мм рт. ст.).

Дуговой разряд отличается от тлеющего высокой плотностью тока на катоде (10^2 - 10^4 А/см²) и малым катодным падением потенциала (5-15 В), токи от десятых долей до нескольких сотен ампер» [8, 11-13].

Для обеспечения требуемой освещенности на территории жилого квартала принимаем к установке светильники ЖКУ74-250 с установленными в них лампами типа ДНАТ-250.

Определим расстояние между соседними опорами системы наружного освещения по формуле:

$$D = \frac{\Phi_{\text{л}} \cdot U_E \cdot N}{E_{\text{ср}} \cdot K_3 \cdot h}, \quad (20)$$
$$D = \frac{13000 \cdot 0,065 \cdot 1}{4 \cdot 1,5 \cdot 4} \approx 35 \text{ м.}$$

Найдем необходимое количество светильников определим по формуле:

$$N = \frac{L}{D}, \quad (21)$$
$$N = \frac{2626}{35} \approx 75.$$

Значение активной расчетной мощности, потребляемой светильниками системы наружного освещения 17А квартала может быть получено из выражения:

$$P_{\Sigma o} = P_{\text{уд}} \cdot N, \quad (22)$$
$$P_{\Sigma o} = 250 \cdot 75 = 18,8 \text{ кВт.}$$

Значение реактивной расчетной мощности, потребляемой светильниками системы наружного освещения квартала может быть получено из выражения:

$$Q_{\Sigma o} = P_{\Sigma o} \cdot \text{tg} \varphi, \quad (23)$$
$$Q_{\Sigma o} = 18,8 \cdot 0,48 = 9 \text{ квар.}$$

Значение полной расчетной мощности, потребляемой светильниками системы наружного освещения квартала может быть получено из следующего выражения:

$$S_{\Sigma o} = \sqrt{P_{\Sigma o}^2 + Q_{\Sigma o}^2}, \quad (24)$$
$$S_{\Sigma o} = \sqrt{18,8^2 + 9^2} = 21 \text{ кВА}.$$

Выводы по разделу: для системы освещения территории жилого микрорайона «Лесная слобода» были выбраны светильники ЖКУ74-250 с натриевыми лампами высокого давления типа ДНАТ-250 в суммарном количестве 75 шт. с расстоянием между соседними опорами равным 35 метрам, при этом суммарное значение расчетной мощности системы внутриквартального освещения составило: по активной мощности - $P_{\Sigma o} = 18,8 \text{ кВт}$, по реактивной мощности - $Q_{\Sigma o} = 9 \text{ квар}$, по полной мощности - $S_{\Sigma o} = 21 \text{ кВА}$.

4 Определение суммарной нагрузки по жилому микрорайону «Лесная слобода»

Суммарная расчетная активная нагрузка квартала на напряжении 0,4 кВ определяется путем суммирования активной нагрузки жилых зданий и зданий торгово-офисного назначения с учетом коэффициента участия:

$$P_{p.m} = P_{зд.нб} + \sum_1^n P_{зд.i} \cdot k_{y.i}, \quad (25)$$
$$P_{p.m} = 4227 \text{ кВт.}$$

Суммарная расчетная реактивная нагрузка квартала на напряжении 0,4 кВ определяется путем суммирования реактивной нагрузки жилых зданий и зданий торгово-офисного назначения с учетом коэффициента участия:

$$Q_{p.m} = Q_{зд.нб} + \sum_1^n Q_{зд.i} \cdot k_{y.i}, \quad (26)$$
$$Q_{p.m} = 1504 \text{ квар.}$$

Суммарная расчетная полная нагрузка квартала на напряжении 0,4 кВ определяется путем суммирования полной нагрузки жилых зданий и зданий торгово-офисного назначения с учетом коэффициента участия:

$$S_{p.m} = \sqrt{P_{p.m}^2 + Q_{p.m}^2}, \quad (27)$$
$$S_{p.m} = \sqrt{4227^2 + 1504^2} = 4486 \text{ кВА.}$$

Выводы по разделу: произведено определение суммарного значения расчетной нагрузки по рассматриваемому микрорайону $S_{p.m} = 4486 \text{ кВА.}$

5 Выбор номинальной мощности и количества силовых трансформаторов для размещения в ТП 10/0,4 кВ микрорайона

Для выбора экономически целесообразной номинальной мощности силовых трансформаторов на КТП жилого квартала предварительно найдем значение плотности электрической нагрузки на рассматриваемой территории:

$$\sigma = \frac{S_{p.мк.}}{F_{мк.}}, \quad (28)$$

$$\sigma = \frac{4486}{0,3116} = 14397 \text{ кВА} / \text{км}^2,$$

Данному значению плотности нагрузки соответствует мощность трансформаторов:

$$S_{тр.эк} = 1,45 \cdot \sqrt[3]{\sigma^2}, \quad (29)$$

$$S_{тр.эк} = 1,45 \cdot \sqrt[3]{14397^2} = 857 \text{ кВА}.$$

С учетом присутствия потребителей, относящихся ко всем трем категориям по надежности электроснабжения, выбираем для установки на ТП квартала по 2 силовых трансформатора ТМГ-1000.

Необходимое число подстанций 10/0,4 кВ:

$$n_{ТП} = \frac{S_{p.мк.}}{k_3 \cdot S_{тр} \cdot n_{тр}}, \quad (30)$$

$$n_{ТП} = \frac{4486}{0,7 \cdot 1000 \cdot 2} = 3,4.$$

Выводы по разделу: в микрорайоне устанавливаем четыре КТП, в каждой размещаем по 2 силовых трансформатора типа ТМГ-1000.

6 Выбор схемы электрических сетей на номинальное напряжение 10 кВ в жилом микрорайоне «Лесная слобода»

«Для электроснабжения электроприемников первой категории используются схемы:

- радиальная;
- двухлучевая с односторонним питанием;
- двухлучевая с двухсторонним питанием;
- трехлучевая с двухсторонним питанием.

На рисунке 1 приведены радиальная и двухлучевая схема с односторонним питанием.

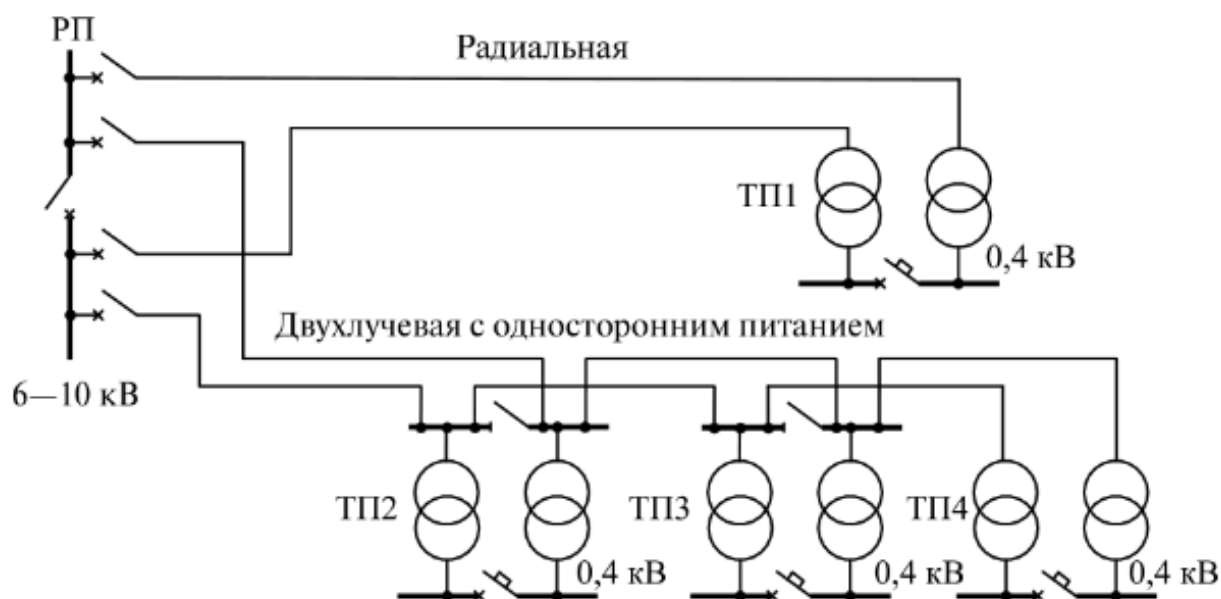


Рисунок 1 - Двухлучевая схема с односторонним питанием

Во всех вариантах исполнения сети электроснабжение потребителей не прекращается при повреждениях на линии 6-10 кВ или в трансформаторе, так как в схеме предусматривается АВР на секционном выключателе РП 6-10 кВ и на стороне 0,4 кВ ТП. Схемы с АВР принято называть автоматизированными схемами.

Для электроснабжения ЭП второй категории применяются петлевые схемы питания, при этом на подстанции устанавливается, как правило, один трансформатор. Допускается применение двухлучевых и других автоматизированных схем, рекомендованных для электроприемников первой категории, если их применение не приводит к увеличению стоимости на сооружение сети» [5, 14, 15].

Обеспечение надежного электроснабжения потребителей жилого микрорайона относящихся к 1й и 2й категориям может быть достигнуто путем применения комбинации петлевой и однолучевой или двухлучевой схемы электроснабжения.

В микрорайонах с преобладанием потребителей, относящихся к 3й категории следует преимущественно применять петлевые схемы.

Выводы по разделу: электрические сети жилого квартала с номинальным напряжением 10 кВ выполняем по двухлучевой схеме с двухсторонним питанием, что позволяет обеспечить заданные требования по надежности для всех потребителей электроэнергии микрорайона.

7 Расчет сечения, прокладываемых кабельных линий в жилом микрорайоне

«Кабели нашли широкое применение в сетях напряжением 6-10 кВ. В зависимости от способа прокладки силового кабеля, свойств окружающей его среды, механических усилий, которым подвергается кабель, рекомендуются к применению различные марки кабелей.

Кабели напряжением выше 1000 В выбираются по следующим условиям:

- номинальному напряжению установки;
- по конструктивному исполнению;
- предельно допустимому нагреву в нормальном и послеаварийном режимах работы» [16, 17, 18].

Кабели, материал изоляции которых состоит из сшитого полиэтилена способны выдерживать длительный нагрев жилы, не превышающий 90 °С.

«Экономическая плотность тока определяется по расчетному току (ток послеаварийного режима работы не учитывается):

$$S_{\text{ЭК}} = I_p / j_{\text{ЭК}} , \quad (31)$$

где I_p - расчетный ток;

$j_{\text{ЭК}}$ — значение экономической плотности тока, определяемое по справочнику» [16].

Найденное по формуле 31 сечение следует округлить до ближайшего стандартного сечения.

«Сечение кабеля, выбранное по указанным выше условиям, должно быть проверено на термическую устойчивость к токам короткого замыкания:

$$I_{\text{терм}} = \frac{F \cdot C \cdot 10^{-3}}{\sqrt{t_{\text{отк}} + T_a}} , \text{ кА}, \quad (32)$$

где F - сечение жилы кабеля, мм²;

C - функция, зависящая от напряжения и характеристики кабеля $A \cdot c^{1/2}/\text{мм}^2$;

$t_{\text{отк}}$ - время отключения цепи короткого замыкания;

$$I_{\text{терм}} \geq I_{\text{по}} ,$$

где $I_{\text{по}}$ - действительное значение тока КЗ в начале кабельной линии, кА» [16].

По устойчивости к термическому воздействию протекающего тока минимальное сечение кабелей определяется как:

$$S_{\min} = \frac{\sqrt{B_k}}{C}, \quad (33)$$

где $B_k = I_{\text{по}}^2 (t_{\text{отк}} + T_a)$ – величина расчетного теплового импульса, кА² с.

Полученное значение необходимо округлить до ближайшего большего стандартно выпускаемого значения.

«Кабели одинакового сечения по всей длине проверяются по току КЗ в начале кабеля, а кабели со ступенчатым сечением по длине проверяются по току КЗ в начале каждого участка» [17].

Выбранные кабели проверяются на потерю напряжения:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I_p \cdot l \cdot (r_0 \cdot \cos\varphi + x_0 \cdot \sin\varphi), \quad (34)$$

где ΔU - потери напряжения в проводнике, В;

I_p – расчетное значение тока, А;

l – протяженность проводника, км;

x_0 ; r_0 - удельные сопротивления проводника, Ом/км.

Полученные в результате расчетов значения не должны согласно ГОСТ 32144-2013 превышать 5 %.

7.1 Расчет линий, выполненных кабелями на напряжение 10 кВ, соединяющих ТП

Для кабельной линии от высоковольтного РП до трансформаторной подстанции №1 выбираем кабель типа АПвПг с изоляцией из пероксидносшиваемого полиэтилена и сроком службы не менее 30 лет.

Определим расчетный ток в линии [16, 19]:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}, \quad (35)$$

$$I_p = \frac{4486}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 247 \text{ A}.$$

Принимаем сечение жил равным 3×95 со значением $I_{доп} = 263 \text{ A}$.

Выбранные сечения и расчетные данные по остальным линиям 10 кВ заносим в таблицу 4.

Таблица 4 – Выбранные сечения и расчетные данные по остальным линиям 10 кВ

Линия	I_p , А	$I_{доп}$, А	$F_{ном}$, мм ²
от РП до ТП1	247	263	3×95
от ТП1 до ТП2	48	195	3×50
от ТП1 до ТП3	84	195	3×50

7.2 Расчет линий, выполненных кабелями на напряжение 0,4 кВ

Для кабельной линии 0,4 кВ от КТП до многоквартирных жилых домов квартала и общественных, административных и торговых зданий выбираем бронированные кабели типа АВББШв с изоляцией из ПВХ пластиката.

Найдем расчетное значение тока в питающем кабеле от КТП до ВРУ многоквартирного дома №7:

$$I_p = \frac{192}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 292 \text{ A.}$$

Принимаем сечение жил равным 4×50 со значением $I_{дон} = 255 \text{ A}$.

Выбранные сечения и расчетные данные по остальным линиям 0,4 кВ заносим в таблицу 5.

Таблица 5 - Выбранные сечения и расчетные данные по остальным линиям на напряжение 0,4 кВ

№ ВРУ	$l, \text{ м}$	$I_{\phi}, \text{ A}$	$n, \text{ шт}$	$S, \text{ мм}^2$
1	2	3	4	5
Многоквартирный дом по плану жилого квартала №7				
1	88	255	2	4×150
Многоквартирный дом по плану жилого квартала №11а				
1	45	255	2	4×150
Многоквартирный дом по плану жилого квартала №11б				
1	37	255	2	4×150
Многоквартирный дом по плану жилого квартала №15				
1	23	93	2	4×25
2	142	197	2	4×95
3	152	197	2	4×95
4	168	197	2	4×95
5	158	224	2	4×120
6	180	197	2	4×95
7	180	93	2	4×25
Многоквартирный дом по плану жилого квартала №15д				
1	71	224	2	4×120
2	74	93	2	4×25
Многоквартирный дом по плану жилого квартала №17				
1	53	112	2	4×35
2	112	197	2	4×95
3	162	224	2	4×120

Продолжение таблицы 5

№ ВРУ	$l, м$	$I_0, А$	$n, шт$	$S, мм^2$
Многokвартирный дом по плану жилого квартала №17а				
1	48	255	2	4×150
ГСК №1				
1	269	255	4	4×150
Объект торгово-офисного назначения 1				
1	149	93	2	4×25
Объект торгово-офисного назначения 2				
1	142	224	4	4×120
Объект торгово-офисного назначения 3				
1	40	224	4	4×120
2	85	330	2	4×240

Выводы по разделу: для линии РП - ТП №1 выбираем кабель типа АПвПг с изоляцией из пероксидносшиваемого полиэтилена с сечением жил 3×95 со значением $I_{дон} = 263 А$; для кабельных линий 0,4 кВ от КТП до многоквартирных жилых домов квартала и общественных, административных и торговых зданий выбираем бронированные кабели типа АВБбШв с изоляцией из ПВХ пластиката.

8 Расчет токов КЗ на сторонах 10 и 0,4 кВ ТП

8.1 Исходные данные для расчета токов КЗ и построение расчетной схемы

На рисунке 2 изображена расчетная схема для определения токов короткого замыкания.

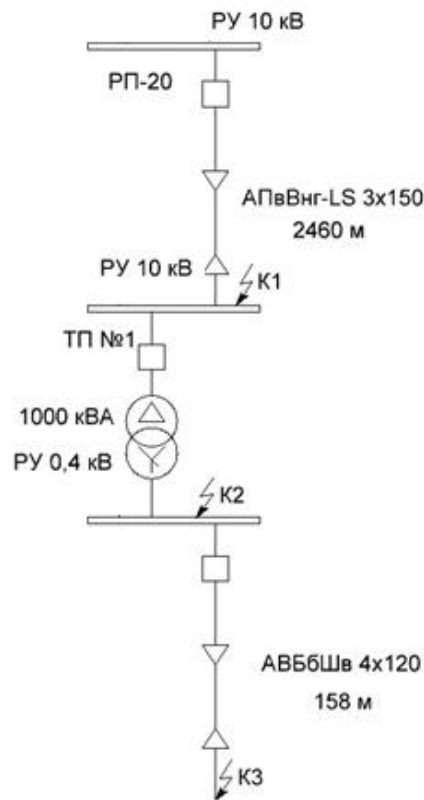


Рисунок 2 – Расчетная схема для определения токов короткого замыкания

Составляем схему замещения представляя каждый из реальных элементов в виде активного и реактивного сопротивления (рисунок 3).

Силовой трансформатор установленный на КТП типа ТМГ-1000:

$$S_{ном} = 1000 \text{ кВА}, U_k = 5,5\%;$$

Кабель 10 кВ: АПвПг 3x95;

Кабель 0,4 кВ: АВБбШв 4x120.

В таблицу 6 сведены исходные данные по кабельным линиям.

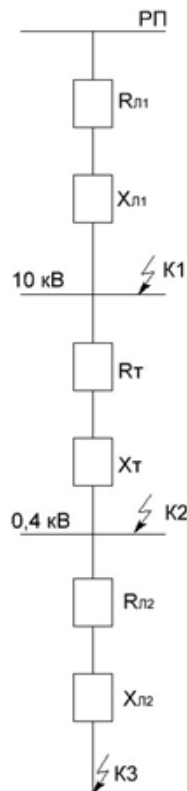


Рисунок 3— Схема замещения

Таблица 6 – Исходные данные по кабельным линиям

$U_{ном}, кВ$	$F, мм^2$	$r_0, Ом / км$	$x_0, Ом / км$
10	3×95	0,32	0,17
10	3×70	0,641	0,184
0,4	4×120	1,54	0,545

8.2 Определение активных и реактивных сопротивлений схемы замещения

Сопротивления приводим к стороне 10кВ. За базисное напряжение принимаем $U_б = 0,4 кВ$.

КЛ1:

$$x_{*\bar{\sigma},\text{Л1}} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{\text{н}}^2}, \quad (36)$$

$$x_{*\bar{\sigma},\text{Л1}} = 0,17 \cdot 2,45 \cdot \frac{100}{10,5^2} = 0,38 \text{ Ом}.$$

«На стороне низкого напряжения сопротивления элементов определяются в именованных единицах» [20].

Сопротивления КЛ1:

$$r_{\text{Л1}} = r_0 \cdot l \cdot \frac{U_{\bar{\sigma}}^2}{U_{\text{н}}^2}, \quad (37)$$

$$r_{\text{Л1}} = 0,32 \cdot 2,45 \cdot \frac{0,4^2}{10,5^2} = 0,00114 \text{ Ом},$$

$$x_{\text{Л1}} = x_0 \cdot l \cdot \frac{U_{\bar{\sigma}}^2}{U_{\text{н}}^2}. \quad (38)$$

$$x_{\text{Л1}} = 0,17 \cdot 2,45 \cdot \frac{0,4^2}{10,5^2} = 0,0006 \text{ Ом}.$$

Сопротивления СТ типа ТМГ-1000:

$$r_m = \Delta P_{\text{КЗ}} \cdot \frac{U_{\bar{\sigma}}^2}{S_{\text{н}}^2}, \quad (39)$$

$$r_m = 0,0108 \cdot \frac{0,4^2}{1^2} = 0,003456 \text{ Ом},$$

$$Z_m = \frac{U_{\text{к\%}}}{100} \cdot \frac{U_{\bar{\sigma}}^2}{S_{\text{н}}}, \quad (40)$$

$$Z_m = \frac{5,5}{100} \cdot \frac{0,4^2}{1} = 0,0176 \text{ Ом},$$

$$x_m = \sqrt{Z_m^2 + r_m^2} \quad (41)$$

$$x_m = \sqrt{0,0176^2 + 0,003456^2} = 0,01725 \text{ Ом}.$$

КЛ2:

$$r_{Л2} = r_0 \cdot l \cdot \frac{U_{\delta}^2}{U_n^2}, \quad (42)$$

$$r_{Л2} = 1,54 \cdot 0,071 \cdot \frac{0,4^2}{0,4^2} = 0,11 \text{ Ом},$$

$$x_{Л2} = x_0 \cdot l \cdot \frac{U_{\delta}^2}{U_n^2}. \quad (43)$$

$$x_{Л2} = 0,545 \cdot 0,071 \cdot \frac{0,4^2}{0,4^2} = 0,0387 \text{ Ом}.$$

8.3 Определение значений токов короткого замыкания в т. 1

Общее значение реактивного сопротивления:

$$x_{*\Sigma} = x_{*\delta, Л1}, \quad (44)$$

$$x_{*\Sigma} = 0,379 \text{ Ом}.$$

Базисный ток:

$$I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta}}, \quad (45)$$

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

«Начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ» [20]:

$$I_{n,0} = \frac{E_{*\delta}''}{x_{*\Sigma}} \cdot I_{\delta}, \quad (46)$$

$$I_{n,0} = \frac{1}{0,379} \cdot 5,5 = 14,5 \text{ кА.}$$

Значение ударного тока в т.1:

$$i_{y0} = \sqrt{2} \cdot I_{n,0} \cdot k_{y0}, \quad (47)$$

$$i_{y0} = \sqrt{2} \cdot 14,5 \cdot 1,2 = 24,6 \text{ кА.}$$

8.4 Определение значений токов короткого замыкания в т. 2

Общее значение реактивного сопротивления:

$$x_{\Sigma} = x_{J1} + x_m, \quad (48)$$

$$x_{\Sigma} = 0,00061 + 0,01725 = 0,01786 \text{ Ом,}$$

$$r_{\Sigma} = r_{J1} + r_m, \quad (49)$$

$$r_{\Sigma} = 0,00114 + 0,003456 = 0,0041 \text{ Ом;}$$

$$Z_{\Sigma} = \sqrt{r_{\Sigma}^2 + x_{\Sigma}^2}, \quad (50)$$

$$Z_{\Sigma} = \sqrt{0,01786^2 + 0,0041^2} = 0,018 \text{ Ом.}$$

«Ток трехфазного КЗ» [20]:

$$I_{\kappa} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma}}, \quad (51)$$

$$I_{\kappa} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,018} = 12,6 \text{ кА.}$$

Значение ударного тока в т.2:

$$i_{y\partial} = \sqrt{2} \cdot I_{\kappa} \cdot k_{y\partial}, \quad (52)$$

$$i_{y\partial} = \sqrt{2} \cdot 12,6 \cdot 1,17 = 20,9 \text{ кА.}$$

8.5 Определение значений токов короткого замыкания в т. 3

Общее значение реактивного сопротивления:

$$x_{\Sigma} = x_{Л1} + x_{\tau} + x_{Л2}, \quad (53)$$

$$x_{\Sigma} = 0,00061 + 0,01725 + 0,0387 = 0,05656 \text{ Ом,}$$

$$r_{\Sigma} = r_{Л1} + r_{\tau} + r_{Л2}, \quad (54)$$

$$r_{\Sigma} = 0,00114 + 0,003456 + 0,11 = 0,114596 \text{ Ом,}$$

$$Z_{\Sigma} = \sqrt{r_{\Sigma}^2 + x_{\Sigma}^2}, \quad (55)$$

$$Z_{\Sigma} = \sqrt{0,114596^2 + 0,05656^2} = 0,1278 \text{ Ом.}$$

«Ток трехфазного КЗ» [20]:

$$I_{\kappa} = \frac{U_6}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma}}, \quad (56)$$

$$I_{\kappa} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,1278} = 1,8 \text{ кА.}$$

Значение ударного тока в т.3:

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot I_{\kappa} \cdot k_{уд}, \quad (57)$$

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot 1,81 \cdot 1,1 = 2,8 \text{ кА.}$$

Полученные результаты расчетов токов короткого замыкания в трех расчетных точках для каждой из ТП микрорайона заносим в таблицу 7.

Таблица 7 – Результаты расчетов токов короткого замыкания в трех расчетных точках для каждой из ТП микрорайона

№ КТП	Точка КЗ №	U , кВ	$K_{y\partial}$	I_k , кА	$i_{y\partial}$, кА
1	1	10	1,2	14,5	24,6
	2	0,4	1,17	12,3	20,3
	3	0,4	1,1	1,8	2,8
2	1	10	1,2	11,9	19,7
	2	0,4	1,17	8	13,5
	3	0,4	1,1	2,4	3,7
3	1	10	1,2	11,6	19,3
	2	0,4	1,17	7,7	13,1
	3	0,4	1,1	2,9	4,5

Выводы по разделу: составлена расчетная схема и схема замещения для определения расчетных значений токов коротких замыканий на шинах городских трансформаторных подстанций на сторонах высокого и низкого напряжения, а также на шинах вводного распределительного устройства ближайшего к ТП жилого многоквартирного дома. Расчет выполнен для трех подстанций микрорайона.

9 Выполнение проверки выбранных кабельных линий напряжением 10 и 0,4 кВ

9.1 Проверка кабельных линий с номинальным напряжением 10кВ

Все линии с номинальным напряжением свыше 1000 В должны быть выбраны с учетом экономической плотности тока.

«Минимальное сечение кабельной линии по экономической плотности тока» [11]:

$$S = \frac{I_p}{j_{\text{эк}} \cdot n_1}, \quad (58)$$

Определим сечение КЛ от высоковольтного РП до ТП1.

$$S = \frac{162}{1,9 \cdot 1} \approx 85 \text{ мм}^2,$$
$$95 \text{ мм}^2 > 85 \text{ мм}^2,$$

Принятый в предыдущих расчетах кабель типа АПвПг 3×95 удовлетворяет расчетному условию выбора кабеля по экономической плотности тока.

Для остальных кабельных линий результаты проверки по экономической плотности тока сводим в таблицу 8.

Таблица 8 – Результаты выбора сечения кабельных линий по экономической плотности тока

Линия	$F_{\text{эк}}, \text{мм}^2$	$F_{\text{ном}}, \text{мм}^2$	$n_{\text{каб}}$
от РП до ТП1	3×85	3×95	1
от ТП1 до ТП2	3×25	3×70	1
от ТП1 до ТП3	3×44	3×70	1

Выполним проверку кабельных линий на номинальное напряжение 10 кВ по термической устойчивости к тепловому воздействию токов КЗ.

«Минимальное сечение кабельной линии по термической стойкости» [11]:

$$S = \frac{I_K}{n \cdot C} \cdot \sqrt{t_{с.з.о.л}}, \quad (59)$$

Линия от распредпункта до ТП1.

$$S = \frac{14500}{2 \cdot 90} \cdot \sqrt{1,025} = 81,55 \approx 82 \text{ мм}^2,$$

$$95 \text{ мм}^2 > 82 \text{ мм}^2.$$

Для остальных КЛ напряжением 10 кВ итоговые результаты по проверке на термическую устойчивость сводим в таблицу 9.

Таблица 9 – Итоговые результаты по проверке на термическую устойчивость для остальных КЛ напряжением 10 кВ

Линия	$F_{терм}, \text{мм}^2$	$F_{ном}, \text{мм}^2$	$n_{каб}$
от РП до ТП1	3×82	3×95	1
от ТП1 до ТП2	3×67	3×70	1
от ТП1 до ТП3	3×65	3×70	1

В таблице 10 представлены итоговые результаты совместной проверки по экономической плотности тока и термической устойчивости кабельных линий напряжением 10 кВ.

Таблица 10 – Результаты выбора КЛ 10 кВ

Линия	$F_{ном}, мм^2$	$n_{каб}$
от РП до ТП1	3×95	1
от ТП1 до ТП2	3×70	1
от ТП1 до ТП3	3×70	1

9.2 Проверка кабельных линий с номинальным напряжением 0,4 кВ

Выполним проверку линии от трансформаторной подстанции до многоквартирного жилого дома №7 на максимальную потерю напряжения в линии.

Находим момент нагрузки по формуле:

$$M_{нагр} = S \cdot P_p, \quad (60)$$

$$M_{нагр} = 88 \cdot 192,4 = 27767 \text{ кВт} \cdot \text{м}.$$

Для полученного расчетным путем момента нагрузки $M_{нагр} = 27757 \text{ кВт} \cdot \text{м}$ определенные по справочным данным потери напряжения в кабельной линии составляют $\Delta U = 2,57\%$, что ниже допустимого по стандарту на качество электрической энергии значения в 5%.

«Проверка линии по длительному допустимому току в аварийном режиме» [16]:

$$I_{доп.авар} > I_p, \quad (61)$$

$$I_{доп.авар} = I_{доп} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3, \quad (62)$$

$$I_{доп.авар} = 308 \cdot 0,9 \cdot 1,25 \cdot 0,88 = 304,92 \text{ А}.$$

Принятый к установке ранее кабель АВБбШв 4×150 проходит проверку по длительному допустимому току в аварийном режиме.

Для остальных линий на напряжение 0,4 кВ проверку осуществляем аналогичным образом, а полученные данные сводим в таблицу 11.

Таблица 11 – Результаты проверки кабельных линий с номинальным напряжением 0,4 кВ

№ ВРУ	I_p , А	$L_{кл}$, м	$M_{нагр}$, кВт·м	ΔU , %	$I_{доп. авар}$ А	F , мм ²
Многоквартирный дом по плану жилого квартала №7						
1	292	88	16083	1,5	305	4×150
Многоквартирный дом по плану жилого квартала №11а						
1	271	45	7610	0,7	305	4×150
Многоквартирный дом по плану жилого квартала №11б						
1	290	37	6697	0,6	305	4×150
Многоквартирный дом по плану жилого квартала №15						
1	95	23	1343	0,8	104	4×25
2	174	142	15492	2,3	231,7	4×95
3	185	152	17693	2,6	231,7	4×95
4	194	168	20556	3	231,7	4×95
5	253	158	25049	2,9	268,3	4×120
6	186	180	21107	3,1	231,7	4×95
7	60	180	6948	3,9	104	4×25
Многоквартирный дом по плану жилого квартала №15д						
1	267	71	11902	1,3	168,3	4×120
2	95	74	4322	2,4	104	4×25
Многоквартирный дом по плану жилого квартала №17						
1	113	53	3802	1,5	127	4×35
2	178	112	12531	1,8	231,7	4×95
3	253	162	25149	2,9	268,3	4×120
Многоквартирный дом по плану жилого квартала №17а						
1	271	48	8117	0,7	305	4×150
ГСК №1						
1	85	269	5036	2,8	104	2(4×150)

Продолжение таблицы 11

№ ВРУ	I_p, A	$L_{кл}, м$	$M_{нагр}, кВт \cdot м$	$\Delta U, \%$	$I_{доп. авар} A$	$F, мм^2$
Объект торгово-офисного назначения 1						
1	84	149	4312	2,4	104	4×25
Объект торгово-офисного назначения 2						
1	258	142	25031	2,9	268,3	2(4×120)
Объект торгово-офисного назначения 3						
1	255	40	7856	0,7	268,3	2(4×120)
2	305	85	16134	1,6	320,3	4×240

Выводы по разделу.

Выполнен выбор сечения кабельных линий напряжением 10 кВ по экономической плотности тока, полученные расчетные значения округлялись до стандартных выпускаемых ближайших сечений кабеля. Кабели выбранного сечения были проверены на устойчивость к тепловому воздействию токов коротких замыканий. В результате были выбраны две кабельные линии сечением по 70 квадратных миллиметров и одна кабельная линия от распределительного пункта до трансформаторной подстанции номер 1 сечением 95 квадратных миллиметров. Для выбранных кабельных линий напряжением 0,4 кВ были определены моменты нагрузки и соответствующие им потери напряжения в кабельных линиях. Сечение линий выбиралось по длительно допустимому току с учетом поправочных коэффициентов на условия прокладки кабелей и их количество. Все выбранные кабельные линии прошли проверку.

10 Определение параметров основного электрооборудования напряжением 10 и 0,4 кВ

10.1 Выбор электрооборудования на стороне 10 кВ

На стороне с номинальным напряжением 10 кВ в КТП устанавливаем малогабаритное КРУ типа RM-6, выпускаемое фирмой Эзоис.

Внешний вид малогабаритного КРУ типа RM-6 приведен на рисунке 4.



Рисунок 4 – Внешний вид малогабаритного КРУ типа RM-6

Произведем выбор электрооборудования на напряжение 10 кВ для ТП1.

Выключатель нагрузки выбирается и проверяется по следующим параметрам:

Номинальное напряжение сети в месте установки [14]:

$$U_{в.н} \geq U_{ном}; \quad U_{в.н} = 10 кВ; \quad U_{ном} = 10 кВ;$$

$$10 кВ = 10 кВ;$$

Длительный рабочий ток [14]:

$$I_{в.н} \geq I_p; \quad I_{в.н} = 400 А; \quad I_p = 247 А;$$

$$400 А > 247 А;$$

Предельное значение коммутируемого тока [14]:

$$I_{н.т.о} \geq I_{к},$$

$$20 кА > 14,5 кА.$$

Проверка на термическую устойчивость [14]:

$$I_{пр.тер}^2 \cdot t_{тер} \geq I_{\infty}^2 \cdot t_{ф}, \quad (63)$$

$$20^2 \cdot 3 \geq 14,5^2 \cdot 0,6,$$

$$1200 кА^2 \cdot с > 126,2 кА^2 \cdot с;$$

Проверка на электродинамическую стойкость [14]:

$$i_{пр.с} > i_y, \quad (64)$$

$$51 кА > 24,6 кА.$$

Принятые выключатели нагрузки ВНМ-10/400-20 проходят проверку по указанным выше параметрам.

На остальных ТП выбор и проверку выключателей нагрузки производим таким же образом, по результатам принимаем к установке ВНМ-10/100.

10.2 Выбор электрооборудования на стороне 0,4 кВ

На стороне с номинальным напряжением 0,4 кВ в трансформаторных подстанциях устанавливаем низковольтное КРУ типа ЩРНВ.

Внешний вид низковольтного комплектного распределительного устройства ЩРНВ приведен на рисунке 5.



Рисунок 5 - Внешний вид низковольтного комплектного распределительного устройства ЩРНВ

Автоматические выключатели выбираются и проверяются по следующим параметрам:

Номинальное напряжение сети в месте установки [14]:

$$U_{в.н} \geq U_{ном}; \quad U_{в.н} = 0,4 \text{ кВ}; \quad U_{ном} = 0,4 \text{ кВ}; \\ 0,4 \text{ кВ} = 0,4 \text{ кВ};$$

Длительный рабочий ток [14]:

$$I_{в.н} \geq I_p; \quad I_{в.н} = 2000 \text{ А}; \quad I_p = 1433 \text{ А};$$

$$2000 A > 1433 A;$$

Предельное значение коммутируемого тока [14]:

$$\begin{aligned} I_{н.т.о} &\geq I_{\kappa}, \\ 135 \kappa A &> 12,3 \kappa A. \end{aligned} \quad (65)$$

Проверка на термическую устойчивость [14]:

$$\begin{aligned} I_{пр.тер}^2 \cdot t_{тер} &\geq I_{\infty}^2 \cdot t_{ф}, \\ 135^2 \cdot 3 &\geq 12,26^2 \cdot 0,6, \\ 54675 \kappa A^2 \cdot c &> 90,2 \kappa A^2 \cdot c; \end{aligned} \quad (66)$$

Проверка на электродинамическую стойкость [14]:

$$\begin{aligned} i_{пр.с} &> i_{у}, \\ 150 \kappa A &> 20,28 \kappa A. \end{aligned} \quad (67)$$

Принятые автоматические выключатели ВА-СЭЩ-LBA-16 проходят проверку по указанным выше параметрам.

Разъединители выбираются и проверяются по следующим параметрам:

Номинальное напряжение сети в месте установки:

$$\begin{aligned} U_{р.н} &\geq U_{ном}; U_{р.н} = 0,4 \kappa B; & U_{ном} &= 0,4 \kappa B; \\ 0,4 \kappa B &= 0,4 \kappa B; \end{aligned}$$

Длительный рабочий ток:

$$I_{р.н} \geq I_p; \quad I_{р.н} = 1600 A; \quad I_p = 1433 A;$$

$$1600 A > 1433 A.$$

Проверка на термическую устойчивость:

$$I_{\text{пр.тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} \geq I_{\infty}^2 \cdot t_{\text{ф}}, \quad (68)$$

$$20^2 \cdot 3 \geq 12,26^2 \cdot 0,6;$$

$$1200 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} > 90,2 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

Проверка на электродинамическую стойкость:

$$i_{\text{пр.с}} > i_y, \quad (69)$$

$$100 \text{ кА} > 20,28 \text{ кА}.$$

Принятые разъединители РЕ 19-43 проходят проверку по указанным выше параметрам.

10.3 Выбор коммутационно-защитной аппаратуры для отходящих линий 0,4 кВ

Для коммутации КЛ от ТП до ВРУ1 жилого многоквартирного дома №7 по плану района выбираем рубильник по следующим условиям:

Номинальное напряжение сети в месте установки:

$$U_{\text{р.н}} \geq U_{\text{ном}}; U_{\text{р.н}} = 0,4 \text{ кВ}; \quad U_{\text{ном}} = 0,4 \text{ кВ};$$

$$0,4 \text{ кВ} = 0,4 \text{ кВ};$$

Длительный рабочий ток:

$$I_{\text{р.н}} \geq I_p; \quad I_{\text{р.н}} = 400 A; \quad I_p = 292 A;$$

$$400 A > 292 A.$$

Принятые рубильники РПС-400А проходят проверку по указанным выше параметрам.

Предохранители выбираются и проверяются по следующим параметрам:

Номинальное напряжение сети в месте установки:

$$U_{p.n} \geq U_{ном}; U_{p.n} = 0,4 кВ; \quad U_{ном} = 0,4 кВ;$$

$$0,4 кВ = 0,4 кВ;$$

Длительный рабочий ток:

$$I_{p.n} \geq I_n; \quad I_{n.n} = 400 А; \quad I_p = 292 А;$$

$$400 А > 292 А.$$

Принятый предохранитель ПН2-400/400 А прошел проверку по указанным выше параметрам.

Для прочих линий на напряжение 0,4 кВ коммутационно-защитные аппараты выбираем таким же образом, а полученные результаты сводим в таблицу 12.

Таблица 12 – Результаты выбора коммутационно-защитных аппаратов для линий на напряжение 0,4 кВ

Отходящая от ТП линия	Выбранный номинальный ток рубильника РПС, А	Выбранный номинальный ток и ток плавкой вставки предохранителя ПН2, А
Комплектная трансформаторная подстанция 1		

Продолжение таблицы 12

Отходящая от ТП линия	Выбранный номинальный ток рубильника РПС, А	Выбранный номинальный ток и ток плавкой вставки предохранителя ПН2, А
ТП1 - ВРУ1 мкд №7	400	400/400
ТП1 - ВРУ1 мкд №11а	400	400/400
ТП1 - ВРУ1 мкд №11б	400	400/400
ТП1 - ВРУ1 мкд №1	250	250/250
ТП1 - ВРУ1 мкд №3	250	250/250
ТП1 - ВРУ2 мкд №3	400	400/400
Комплектная трансформаторная подстанция 2		
ТП2 - ВРУ1 мкд №15	100	100/100
ТП2 - ВРУ2 мкд №15	250	250/250
ТП2 - ВРУ3 мкд №15	250	250/250
ТП2 - ВРУ4 мкд №15	250	250/250
ТП2 - ВРУ5 мкд №15	250	250/250
ТП2 - ВРУ6 мкд №15	250	250/250
ТП2 - ВРУ7 мкд №15	100	100/100
ТП2 - ВРУ1 мкд №15д	400	400/400
ТП2 - ВРУ2 мкд №15д	100	100/100
Комплектная трансформаторная подстанция 3		
ТП3 - ВРУ1 мкд №17	250	250/250
ТП3 - ВРУ2 мкд №17	250	250/250

Продолжение таблицы 12

Отходящая от ТП линия	Выбранный номинальный ток рубильника РПС, А	Выбранный номинальный ток и ток плавкой вставки предохранителя ПН2, А
ТПЗ - ВРУ3 мкд №17	250	250/250
ТПЗ - ВРУ1 мкд №17а	400	400/400
ТПЗ - ВРУ1 объект торгово-офисного назначения 1	100	100/100
ТПЗ - ВРУ1 объект торгово-офисного назначения 2	250	250/250

Выводы по разделу.

Был произведён выбор основного электрооборудования, установленного на трансформаторных подстанциях на стороне 10 и 0,4 кВ, так для установки в трансформаторной подстанции выбраны малогабаритные КРУ типа RM-6, выпускаемые фирмы Эзоис. Выключатели нагрузки, устанавливаемые на стороне 10 кВ были выбраны по напряжению, длительному рабочему току на стороне высокого напряжения подстанции и предельному значению коммутлируемому тока. Проверка выбранных аппаратов осуществлялась по термической устойчивости электродинамической стойкости. Все выбранные аппараты успешно прошли необходимые проверки. На стороне 0,4 кВ подстанции было выбрано низковольтное КРУ типа ЩРНВ, устанавливаемые в нём автоматические выключатели были выбраны по номинальному напряжению, длительному рабочему току, а также предельному значению коммутлируемому тока. Произведена их проверка на термическую и электродинамическую устойчивость. Разъединители проверялись по тем же критериям, кроме коммутационной способности. Для коммутации отходящих от ТП линий были выбраны рубильники РПС-400а, которые также прошли проверки по напряжению и длительному рабочему току.

11 Расчет уставок МТЗ линий напряжением 10 кВ

Выполним расчет максимальной токовой защиты кабельных линий, в качестве примера используем линию от РП20 до ТП1. Максимальное значение рабочего тока в КЛ составляет 247 А.

Устанавливаем измерительные трансформаторы тока типа ТПЛ-10-300/5.

«Найдем ток срабатывания защиты» [17]:

$$I_{c.з} = \frac{k_n \cdot k_{c.з}}{k_g} \cdot I_{p.max}, \quad (70)$$

$$I_{c.з} = \frac{1,2 \cdot 1,2}{0,8} \cdot 247 = 444,6 \text{ А.}$$

«Определим ток срабатывания реле» [17]:

$$I_{c.p} = \frac{I_{c.з} \cdot k_{cx}}{n_{TT}}, \quad (71)$$

$$I_{c.p} = \frac{444,6 \cdot 1}{60} = 7,4 \text{ А.}$$

Округляем до большего целого и принимаем уставку тока срабатывания реле 8А.

«Определяем коэффициент чувствительности защиты по формуле» [17]:

$$k_q = \frac{\sqrt{3}/2 \cdot I_{кз}^{(3)}}{I_{c.з}}, \quad (72)$$

$$k_q = \frac{\sqrt{3}/2 \cdot 12260}{444,6} = 24 > 1,5,$$

Полученное значение во много раз превышает минимально допустимое значение.

Результаты расчетов по прочим КЛ сводим в таблицу 13.

Таблица 13 – Расчет максимальной токовой защиты кабельных линий

КЛ 10 кВ	I_{TT}, A	$I_{c.з}, A$	$I_{c.p}, A$	k_q
от РП до ТП1	300/5	444,6	7,41/8	23,9
от ТП1 до ТП2	100/5	86,4	4,32/5	23,7
от ТП1 до ТП3	100/5	151,2	7,56/8	16,6

Расчет уставок максимальной токовой отсечки.

«Определим значение тока срабатывания токовой отсечки» [17]:

$$I_{c.o} = k_n \cdot I_{кз.max}, \quad (73)$$

$$I_{c.o} = 1,5 \cdot 12260 = 18390 A.$$

Найдем ток срабатывания реле и коэффициент чувствительности по формулам:

$$I_{c.p} = \frac{I_{c.o} \cdot k_{cx}}{n_{TT}} \quad (74)$$

$$I_{c.p} = \frac{18390 \cdot 1}{60} = 306,5 A,$$

$$I_{p.кз.max} = \frac{I_{кз.max} \cdot k_{cx}}{n_{TT}}. \quad (75)$$

$$I_{p.кз.max} = \frac{14500 \cdot 1}{60} = 242 A,$$

$$k_q = \frac{I_{p.кз.max}}{I_{c.p}} \quad (76)$$

$$k_q = \frac{242}{306,5} = 0,8 < 1,5,$$

Полученное значение ниже минимально допустимого.

Выбираем универсальное устройство для защиты, управления и автоматизации SIPROTEC 4 7SA6.

«Найдем сопротивление срабатывания» [17]:

$$\begin{aligned} Z_{c.з} &\geq 1,5 \cdot Z_n, \\ Z_{c.з} &= 1,5 \cdot 0,75 = 1,125 \text{ Ом}. \end{aligned} \tag{77}$$

«Определим коэффициент наклона характеристики α_1 » [17]:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{t_{c.з}}{Z_n}, \\ \alpha_1 &= \frac{1,23}{0,75} = 1,64. \end{aligned} \tag{78}$$

«Уставка по времени срабатывания» [17]:

$$\begin{aligned} t_{y.з} &= 0,9 \cdot Z_{c.з} \cdot \alpha_1, \\ t_{y.з} &= 0,9 \cdot 1,125 \cdot 1,64 = 1,7 \text{ с}. \end{aligned} \tag{79}$$

«Найдем сопротивление срабатывания реле» [17]:

$$\begin{aligned} Z_{c.р} &= Z_{c.з} \cdot \frac{n_{mm}}{n_n}, \\ Z_{c.р} &= 1,125 \cdot \frac{60}{100} = 0,675 \text{ Ом}. \end{aligned} \tag{80}$$

Определённое расчётным путём значение превышает минимально допустимое значение диапазона 0,1 Ом и не превышает максимально допустимое значение в размере 8 Ом.

Для прочих кабельных линий расчёты уставок МТО проводились по той же методике, полученные результаты расчёта приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Расчёты уставок МТО для всех кабельных линий 10 кВ

КЛ с номинальным напряжением 10 кВ	$Z_{\text{л}}, \text{ Ом}$	$Z_{\text{с.з}}, \text{ Ом}$	α_1	$t_{\text{у.з}}, \text{ с}$	$Z_{\text{с.р}}, \text{ Ом}$
от РП до ТП №1	0,754	1,131	1,641	1,71	0,683
от ТП №1 до ТП №2	1,782	2,672	0,692	1,71	0,532
от ТП №1 до ТП №3	0,771	1,163	1,61	1,71	0,231

Выводы по разделу.

Выполнен расчет уставок максимальной токовой защиты и максимальной токовой отсечки для линий с номинальным напряжением 10 кВ, соединяющих высоковольтные распределительные пункты и подстанции жилого микрорайона. Так для линии от РП20 до первой трансформаторной подстанции определены ток срабатывания защиты и ток срабатывания реле, определён коэффициент чувствительности защиты, который во много раз превышает минимально допустимое значение. Для определения уставок максимальной токовой отсечки были найдены токи срабатывания, токи срабатывания реле и определены коэффициенты чувствительности. Выбрано универсальное устройство для защиты, управления и автоматизации SIPROTEC 4 7SA6, для которого были определены требуемые уставки.

12 Определение параметров системы заземления на трансформаторных подстанциях микрорайона «Лесная слобода»

«Электробезопасность - это исключение условий, при которых возможны опасные для человека поражения электрическим током вследствие непосредственного прикосновения к токоведущим частям или к ОПЧ.

Для обеспечения электробезопасности в электроустановках необходимо соблюдение следующих условий:

- токоведущие части электроустановки не должны быть доступны для непреднамеренного прямого прикосновения к ним;

- доступные для прикосновения ОПЧ и сторонние проводящие части, а также РЕ и PEN проводники не должны быть опасны при прикосновении к ним как при нормальных режимах эксплуатации, так и при повреждении изоляции» [5].

Расчетное сопротивление заземляющего устройства должно быть меньше 4 Ом.

Условия выполнения заземления: грунт - суглинок с удельным сопротивлением грунта $g = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; ЗУ состоит из 8 вертикальных стальных стержней с длиной $l = 5 \text{ м}$, соединённых между собой полосой протяженностью $L = 29 \text{ м}$.

Определим сопротивление одиночного заземлителя из выражения:

$$R = \frac{g}{l}. \quad (81)$$

$$R = \frac{100}{5} = 20 \text{ Ом}.$$

Найдем сопротивление горизонтальной полосы, соединяющей вертикальные заземлители:

$$R_{\Gamma} = \frac{2g}{L}. \quad (82)$$

$$R_{\Gamma} = \frac{2 \cdot 100}{29} = 6,9 \text{ Ом}.$$

Из справочника находим коэффициент использования, который при 8 вертикальных ЗУ равен $k_H = 0,52$.

«Проводимость заземляющего контура» [5]:

$$G = k_H \cdot (G_B + G_{\Gamma}). \quad (83)$$

$$G = 0,52 \cdot \left(\frac{8}{20} + \frac{1}{6,9} \right) = 0,28.$$

Найдем суммарное сопротивление ЗУ трансформаторной подстанции:

$$R_{\text{общ}} = \frac{1}{G}. \quad (84)$$

$$R_{\text{общ}} = \frac{1}{0,28} = 3,6 \text{ Ом},$$

$$3,6 \text{ Ом} < 4 \text{ Ом},$$

Полученное значение не превышает максимально допустимого.

Выводы по разделу.

Для КТП микрорайона определены параметры защитного заземления. В качестве заземляющего устройства используется 8 вертикальных стержней длиной по 5 м каждый, суммарное расчётное значение сопротивления заземлителя не превышает предельно допустимого значения 4 Ом.

Заключение

В бакалаврской работе разработан проект электроснабжения микрорайона многоэтажной застройки «Лесная слобода». Определены значения расчетных нагрузок по жилым многоквартирным домам микрорайона. Выполнено определение расчетных мощностей для ГСК и объектам торгово-офисного назначения.

Для системы освещения территории жилого микрорайона «Лесная слобода» были выбраны светильники ЖКУ74-250 с натриевыми лампами высокого давления типа ДНАТ-250 в суммарном количестве 75 шт. с расстоянием между соседними опорами равным 35 метрам, при этом суммарное значение расчетной мощности системы внутриквартального освещения составило: по активной мощности - $P_{\Sigma o} = 18,8 \text{ кВт}$, по реактивной мощности - $Q_{\Sigma o} = 9 \text{ квар}$, по полной мощности - $S_{\Sigma o} = 21 \text{ кВА}$.

Определена суммарная расчетная нагрузка по рассматриваемому микрорайону, которая составила $S_{p.m} = 4486 \text{ кВА}$. На территории микрорайона принимаем к установке устанавливаем 4 КТП с двумя силовыми трансформаторами ТМГ-1000 в каждой.

Электрические сети жилого квартала с номинальным напряжением 10 кВ выполняем по двухлучевой схеме с двухсторонним питанием, что позволяет обеспечить заданные требования по надежности для всех потребителей электроэнергии микрорайона.

Выполнен расчет сечения кабельных линий. Для линии РП - ТП №1 выбираем кабель типа АПвПг с изоляцией из пероксидносшиваемого полиэтилена с сечением жил 3×95 со значением $I_{don} = 263 \text{ А}$; для кабельных линий 0,4 кВ от КТП до многоквартирных жилых домов квартала и общественных, административных и торговых зданий выбираем бронированные кабели типа АВБбШв с изоляцией из ПВХ пластиката

Составлена расчетная схема и схема замещения для определения расчетных значений токов коротких замыканий на шинах городских трансформаторных подстанций на сторонах высокого и низкого напряжения, а также на шинах вводного распределительного устройства ближайшего к ТП жилого многоквартирного дома. Расчет выполнен для трех подстанций микрорайона.

Выполнен выбор сечения кабельных линий напряжением 10 кВ по экономической плотности тока, полученные расчетные значения округлялись до стандартных выпускаемых ближайших сечений кабеля. Кабели выбранного сечения были проверены на устойчивость к тепловому воздействию токов коротких замыканий. В результате были выбраны две кабельные линии сечением по 70 квадратных миллиметров и одна кабельная линия от распределительного пункта до трансформаторной подстанции номер 1 сечением 95 квадратных миллиметров. Для выбранных кабельных линий напряжением 0,4 кВ были определены моменты нагрузки и соответствующие им потери напряжения в кабельных линиях. Сечение линий выбиралось по длительно допустимому току с учетом поправочных коэффициентов на условия прокладки кабелей и их количество. Все выбранные кабельные линии прошли проверку.

Выполнен расчет уставок максимальной токовой защиты и максимальной токовой отсечки для линий с номинальным напряжением 10 кВ, соединяющих высоковольтные распределительные пункты и подстанции жилого микрорайона.

Для КТП микрорайона определены параметры защитного заземления. В качестве заземляющего устройства используется 8 вертикальных стержней длиной по 5 м каждый, суммарное расчётное значение сопротивления заземлителя не превышает предельно допустимого значения 4 Ом.

Список используемых источников

1. Анчарова Т. В., Рашевская М.А., Стебунова. Е.Д. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений [Электронный ресурс]: учебник , 2-е изд., перераб. и доп. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2018. 415 с. URL: <http://znanium.com/catalog/product/982211> (дата обращения 18.11.2022).
2. Валеев И.М., Мусаев Т.А. Методика расчета режима работы системы электроснабжения городского района : монография. Казань : КНИТУ, 2016. 132 с.
3. Вахнина В.В., Черненко А.Н. Проектирование систем электроснабжения [Электронный ресурс]: электронное учеб.-метод. пособие. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2016. 78 с. URL: https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/2976/1/Vahnina%20Chernenko_EUMI_Z.pdf (дата обращения: 15.12.2022).
4. Вахнина В.В., Черненко А.Н., Самолина О.В., Рыбалко Т.А. Проектирование осветительных установок [Электронный ресурс]: электронное учеб.-метод. пособие. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2015. 107 с. URL: https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/3383/1/Vahnina%20Chernenko%20Samolina%20Ribalko_%20EUI_Z.pdf (дата обращения: 03.02.2023).
5. Ершов Ю.А. Электроэнергетика. Релейная защита и автоматика электроэнергетических систем: учебное пособие. Красноярск : СФУ, 2014. 68 с.
6. Ковалев И.Н. Электроэнергетические системы и сети : учебник. М. : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2015. 363 с.
7. Комиссаров Ю.А., Бабокин Г.И. Общая электротехника и электроника : учебник. 2-е изд., испр. и доп. М. : ИНФРА-М, 2017. 479 с.
8. Кудрин Б.И. Электроснабжение: учебник. М.: Феникс, 2018. 382 с.

9. Ополева Г. Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов [Электронный ресурс]: учеб. пособие. М. : ИД «ФОРУМ» : ИНФРА-М, 2019. 416 с. URL: <http://znanium.com/catalog/product/1003805> (дата обращения 14.12.2022).
10. Пилипенко В.Т. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах : учебно-методическое пособие. Оренбург: Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2014. 124 с.
11. Сазонова Т.В., Шлейников В.Б. Электроснабжение силовых электроприемников цеха промышленного предприятия: учебное пособие. М.: Бибком, 2016. 110 с.
12. Сивков А.А., Герасимов Д.Ю., Сайгаш А.С. Основы электроснабжения. Учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 173 с.
13. Хорольский В.Я., Таранов М.А., Жданов В.Г. Организация и управление деятельностью электросетевых предприятий: учебное пособие. М.: Форум, НИЦ ИНФРА-М, 2016. 144 с.
14. Шеховцов В.П. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению [Электронный ресурс]: учеб. пособие. 3-е изд. М. : ИНФРА-М, 2019. 136 с. URL: <http://znanium.com/catalog/product/1000152> (дата обращения: 18.01.2023).
15. Электрические сети – интернет сайт об электрических сетях и высоковольтном оборудовании [Электронный ресурс]. URL: <http://leg.co.ua> (дата обращения: 16.01.2023).
16. Algarin J.M., Ramaswamy B., Weinberg I.N., Chen Y.J., Krivorotov I.N., Katine J.A., Shapiro B., Waks E. Frequency conversion of microwave signal without direct bias current using nanoscale magnetic tunnel junctions // Scientific Reports. 2019. №9 (1), 828-830.
17. Beaty H.W. Handbook of electric power calculations. USA: McGraw-Hill Companies, 2016. 608 p.

18. Cheng D., Zhang W., Wang K. Hierarchical reserve allocation with air conditioning loads considering lock time using Benders decomposition // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. №2. pp. 293-308.
19. Hase Y. Handbook of Power System Engineering. England: John Wiley & Sons, 2013. 401 p.
20. Short T. Electric power distribution handbook. Florida: CRC Press LLC, 2014. 898 p.