

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Соловьев Дмитрий Александрович

Должность: ректор ФГБОУ ВО Вавиловский университет

Дата подписания: 09.06.2026 15:46:53

Уникальный образовательный ключ:

528682d78e671e566ab07f01fe1ba2172f735a12

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования**

**«Саратовский государственный университет генетики,
биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова»**

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

**Методические указания по выполнению
курсовой работы**

**Направление подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника**

**Направленность (профиль)
Электроснабжение**

Саратов 2026

УДК 621.631
ББК 31

Рецензент:

Левин Михаил Александрович, кандидат технических наук, доцент
кафедры «Электрооборудование, энергоснабжение и роботизация»
ФГБОУ ВО Вавиловский университет
Кифарак Сергей Александрович, начальник СИЗПИ (Служба изоляции,
защиты перенапряжений и испытаний) Центрального производственного
отделения филиала ПАО «Россети Волга»

Электроснабжение: методическое указание к выполнению курсовой работы для обучающихся профиля подготовки «Электроснабжение» направления 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника / С.М. Бакиров, С.В. Бахтеев // ФГБОУ ВО Вавиловский университет. – Саратов, 2026. – 48 с.

Методическое указание содержит основные разделы проектирования сети 0,4 кВ и выбора трансформатора для сельскохозяйственных предприятий, а также справочные сведения по проектированию систем электроснабжения. Методические указания направлены на закрепление знаний умений и навыков по проектированию, систематизации и анализа состояния элементов системы электроснабжения. Предусмотрено для обучающихся по профилю подготовки «Электроснабжение» направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», а также инженеров и специалистов сельскохозяйственного производства.

УДК 621.631
ББК 31

© Бакиров С.М., Бахтеев С.В., 2026
© ФГБОУ ВО Вавиловский университет, 2026

Содержание

Введение.....	3
ЗАДАНИЕ.....	5
1. Исходные данные.....	5
2. Требование к расчетно-пояснительной записке.....	17
3. Требования к графической части проекта.....	17
МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ.....	20
1. Расчет электрических нагрузок потребителей	20
2. Выбор места установки трансформаторной подстанций 10/0,4 кВ	20
3 Выбор трассы ВЛ-0,38кВ.	22
4. Расчет нагрузок ВЛ-0,38кВ.....	23
5. Электрический расчет ВЛ-0,38кВ.....	24
6. Расчет токов короткого замыкания.....	28
7. Выбор аппаратов защиты трансформатора 10/0,4 кВ и ВЛ-0,38 кВ.....	31
7.1 Выбор плавких предохранителей 10 кВ.....	31
7.2 Выбор автоматических выключателей.....	31
7.3 Согласование по условиям селективности.....	32
8. Выводы.....	34
9. Библиографический список	34
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	35

Введение

Методические указания по выполнению курсовой работы по дисциплине «Электроснабжение» предназначены для студентов очной и заочной форм обучения направлений подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Цель выполнения – разработка фрагмента системы электроснабжения объекта, включающего в себя ТП 10/0,4 кВ и воздушную линию электропередачи 0,38 кВ.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выбрать трассу и конструктивное исполнение ВЛ-0,38 кВ, рассчитать сечение провода.

2. Определить место установки и мощность ТП 10/0,4 кВ, выбрать ее тип и конструктивное исполнение.

3. Рассчитать и выбрать аппараты защиты ВЛ-0,38 кВ и трансформатора 10/0,4 кВ.

Основой расчета параметров системы электроснабжения служат нагрузки потребителей, поэтому выполнение курсового проекта начинается с их определения. Исходя из нагрузок потребителей, выбирается сечение провода линий электропередачи, мощность и место установки трансформаторных подстанций. Провод линии электропередачи должен иметь сечение, позволяющее не только передавать необходимое количество электроэнергии, но и выдерживать механическое воздействие таких природных факторов, как гололед и ветер. Поэтому выбранный провод проверяется на механическую прочность. Качество электроэнергии должно соответствовать требованиям определенным государственным стандартом. Например, отклонение напряжения у потребителя не должно превышать $\pm 5\%$. Исходя из этого требования, определяются переменные надбавки трансформаторов и допустимые потери напряжения в линиях электропередачи. Отсюда следует третье требование к сечению провода воздушной линии – обеспечивать допустимую потерю напряжения. Кроме того линии 0,38 кВ, питающие электродвигатели, должна обеспечиваться возможность их запуска и устойчивой работы.

Трассы ВЛ-0,38 кВ выбираются в соответствии с планировкой населенного пункта. При этом надо выполнять следующие требования: ВЛ не должна возвращаться назад к подстанции, угол поворота не должен быть меньше 90° , ответвления и пересечения должны выполняться под прямым углом.

Мощность трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ выбирается исходя из существующих нагрузок потребителей и перспектив развития населенного пункта. Чтобы протяженность и сечение проводов ВЛ-0,38 кВ были минимальными, трансформаторную подстанцию надо расположить в центре электрических нагрузок потребителей.

Силовой трансформатор ТП 10/0,4 кВ и отходящие линии 0,38 кВ должны быть защищены от аварийных режимов. Возможны различные варианты комплектования аппаратами управления и защиты. Чаще всего со стороны 10 кВ устанавливаются плавкие предохранители, а на отходящих линиях – автоматические выключатели. Устройства защиты должны быть согласованы по селективности.

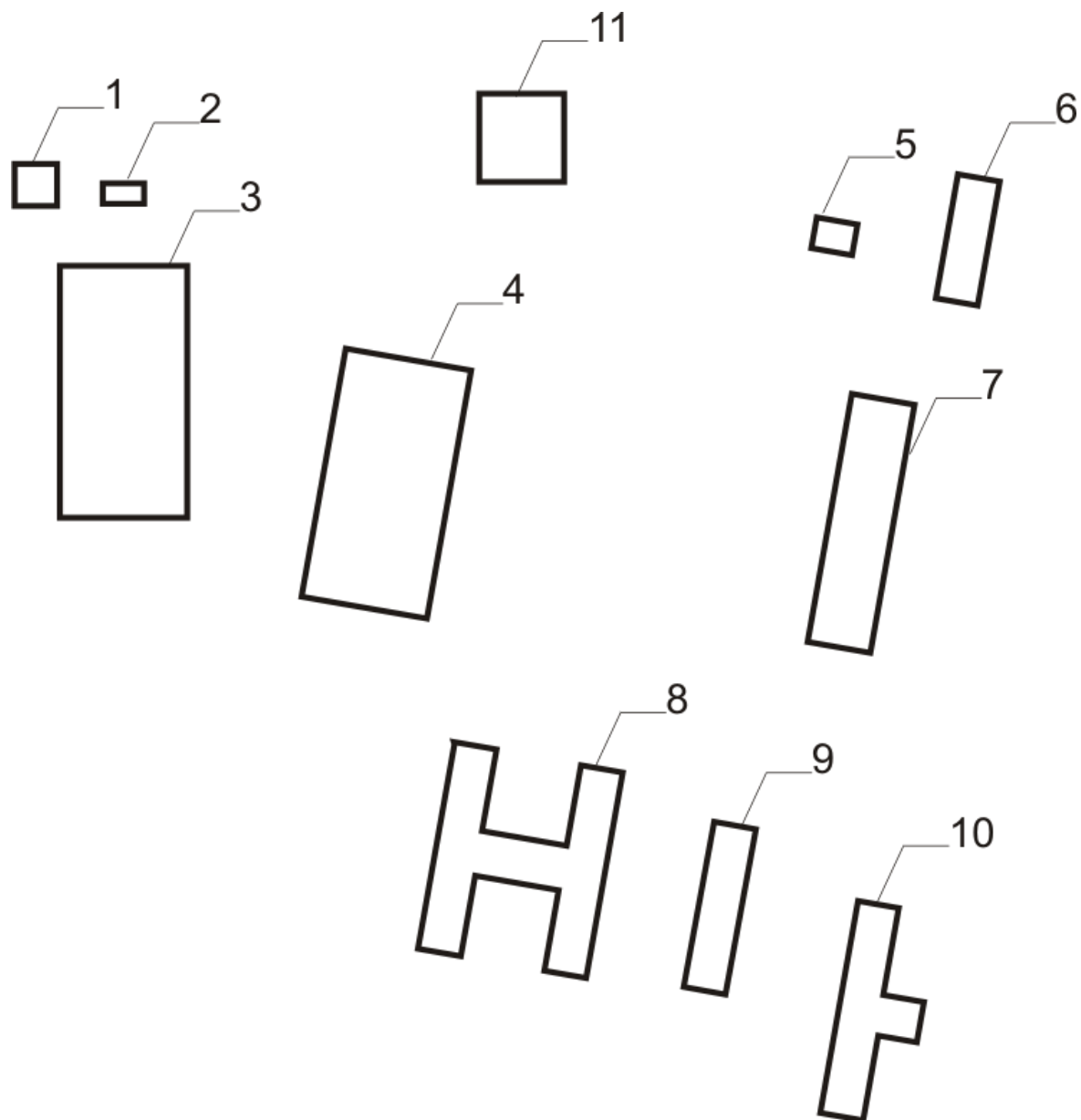
Для выбора аппаратов управления и защиты, а также для согласования их действия необходимо знать токи короткого замыкания. Так как схема электроснабжения в данном случае не сложная, расчет целесообразно вести в именованных единицах.

Перечисленные задачи необходимо решить при выполнении курсового проекта. Это позволит приобрести опыт решения конкретных инженерных задач в области электроснабжения, а также навыки оформления текстовых и графических документов.

ЗАДАНИЕ

1. Исходные данные

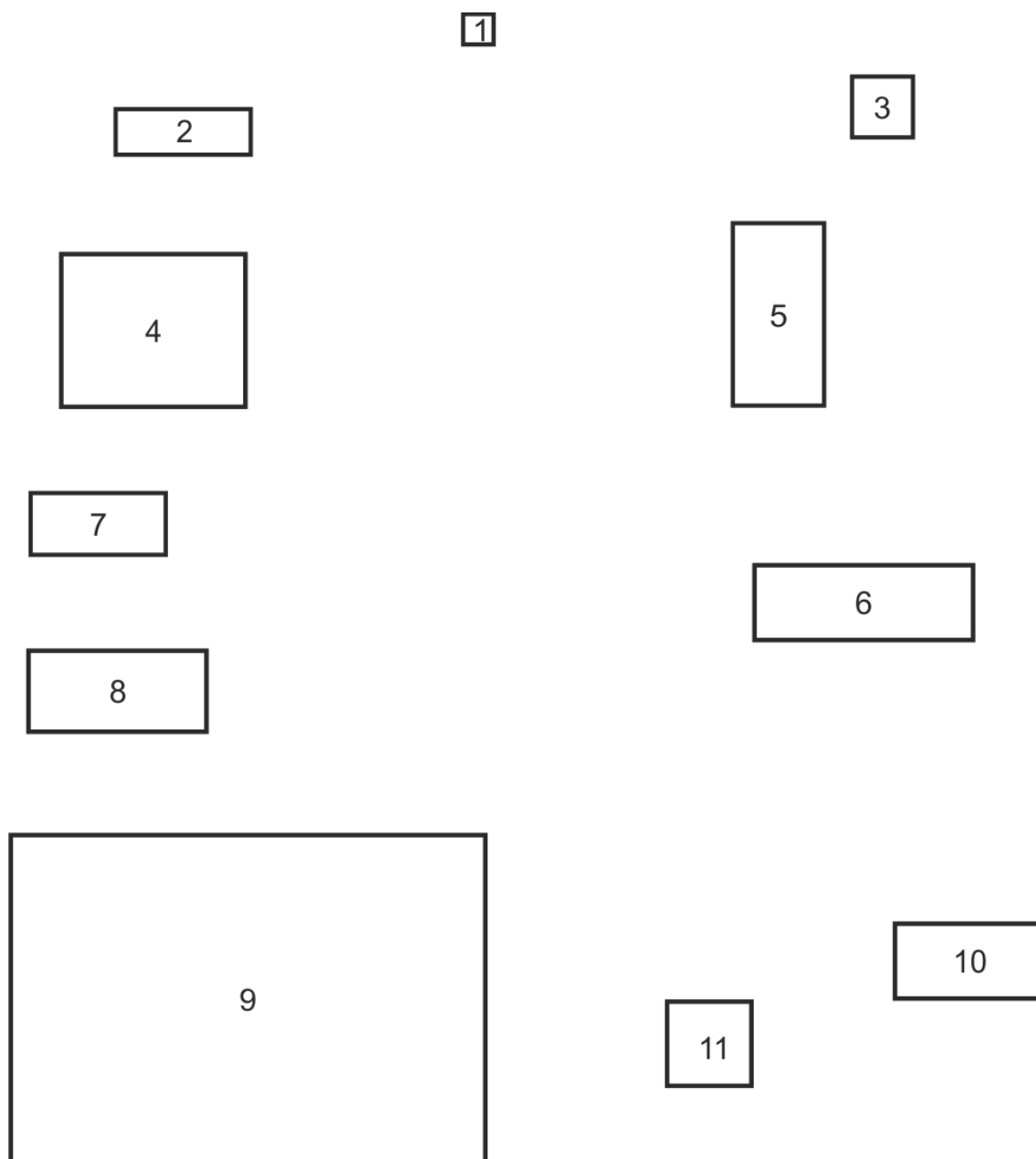
План 1. Производственная база сельскохозяйственного предприятия №1



Масштаб 1:3000

- | | |
|---------------------------------------|-----------------------------|
| 1 – Проходная | 8 – Столовая |
| 2 – Склад нефтепродуктов | 9 – Площадка для транспорта |
| 3 – Административное здание | 10 – ЗАВ 20 |
| 4 – Машинно-тракторная мастерская | 11 – Котельная |
| 5 – Гараж | |
| 6 – Склад запчастей | |
| 7 – Пункт ремонта электрооборудования | |

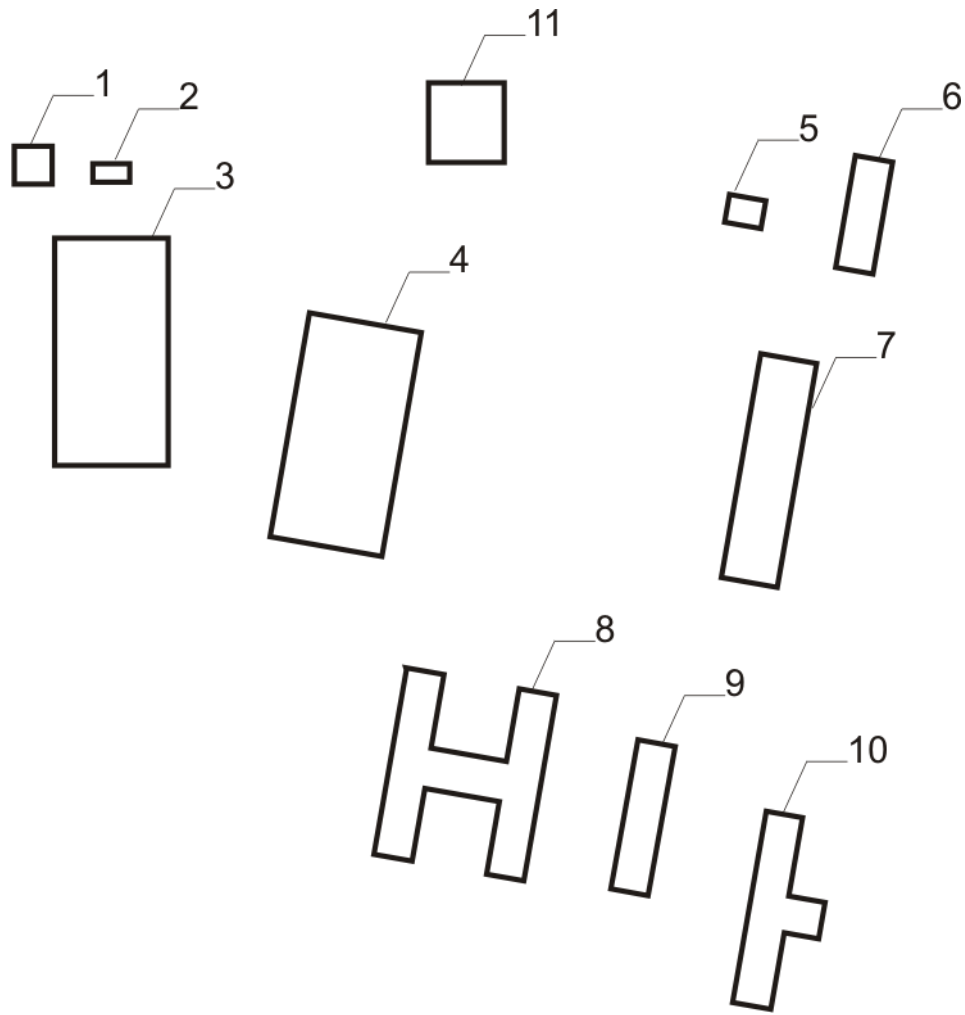
План 2. Производственная база сельскохозяйственного
предприятия №2



Масштаб 1:3000

- | | |
|-----------------------------------|---------------------------------------|
| 1 – Проходная | 7 – Пункт ремонта электрооборудования |
| 2 – Склад нефтепродуктов | 8 – Столовая |
| 3 – Административное здание | 9 – Площадка для транспорта |
| 4 – Машинно-тракторная мастерская | 10 – Баня |
| 5 – Гараж | 11 – Котельная |
| 6 – Склад запчастей | |

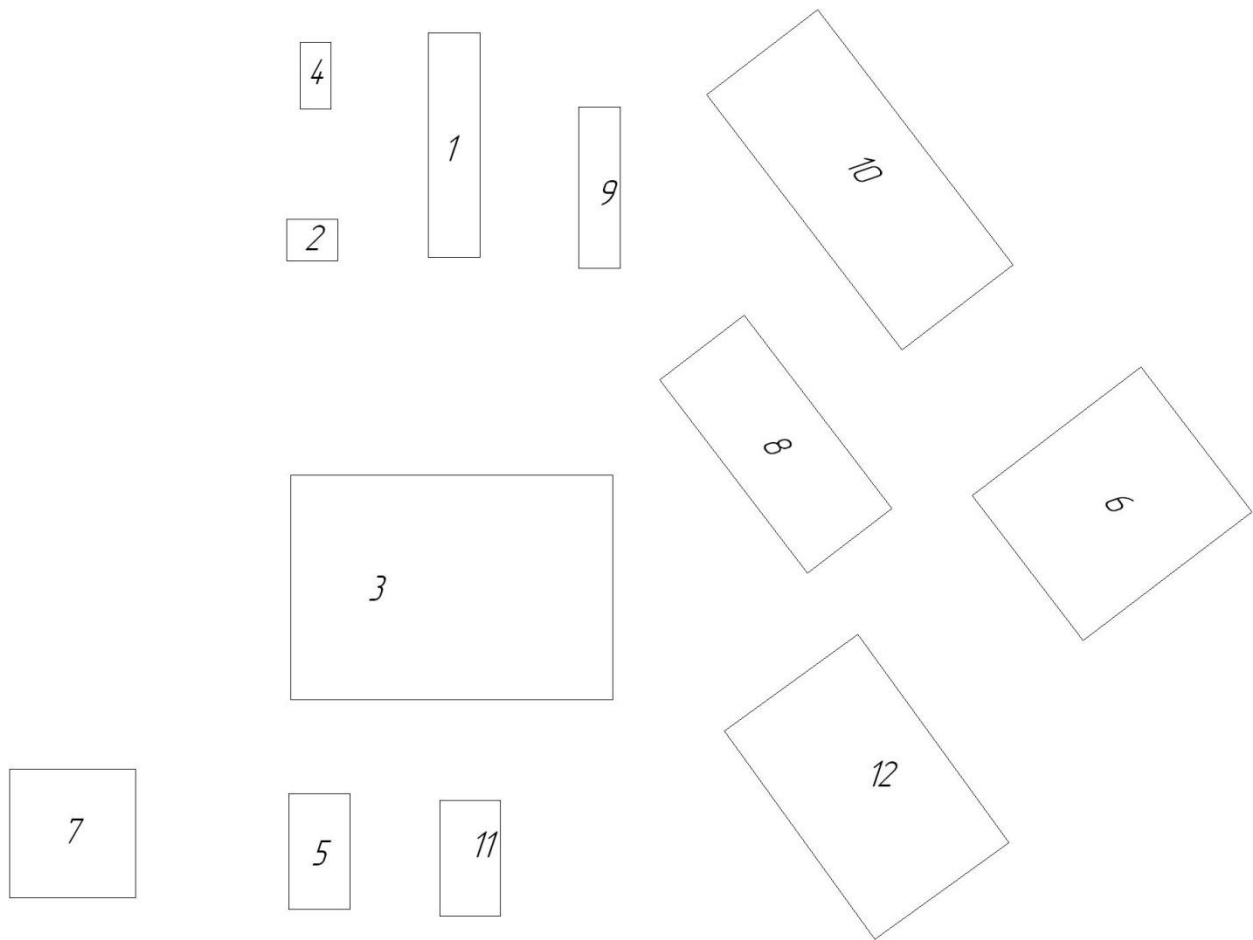
План 3. Молочно-товарная ферма №1



Масштаб 1:4000

- 1 – Столовая
- 2 – Кормоцех
- 3 – Телятник доразивания
- 4 – Коровник с электроводонагревателем на 200 коров
- 5 – Административное здание
- 6 – Проходная
- 7 – Коровник с электроводонагревателем на 100 коров
- 8 – Гараж
- 9 – Склад кормов
- 10 – Баня
- 11 – Котельная

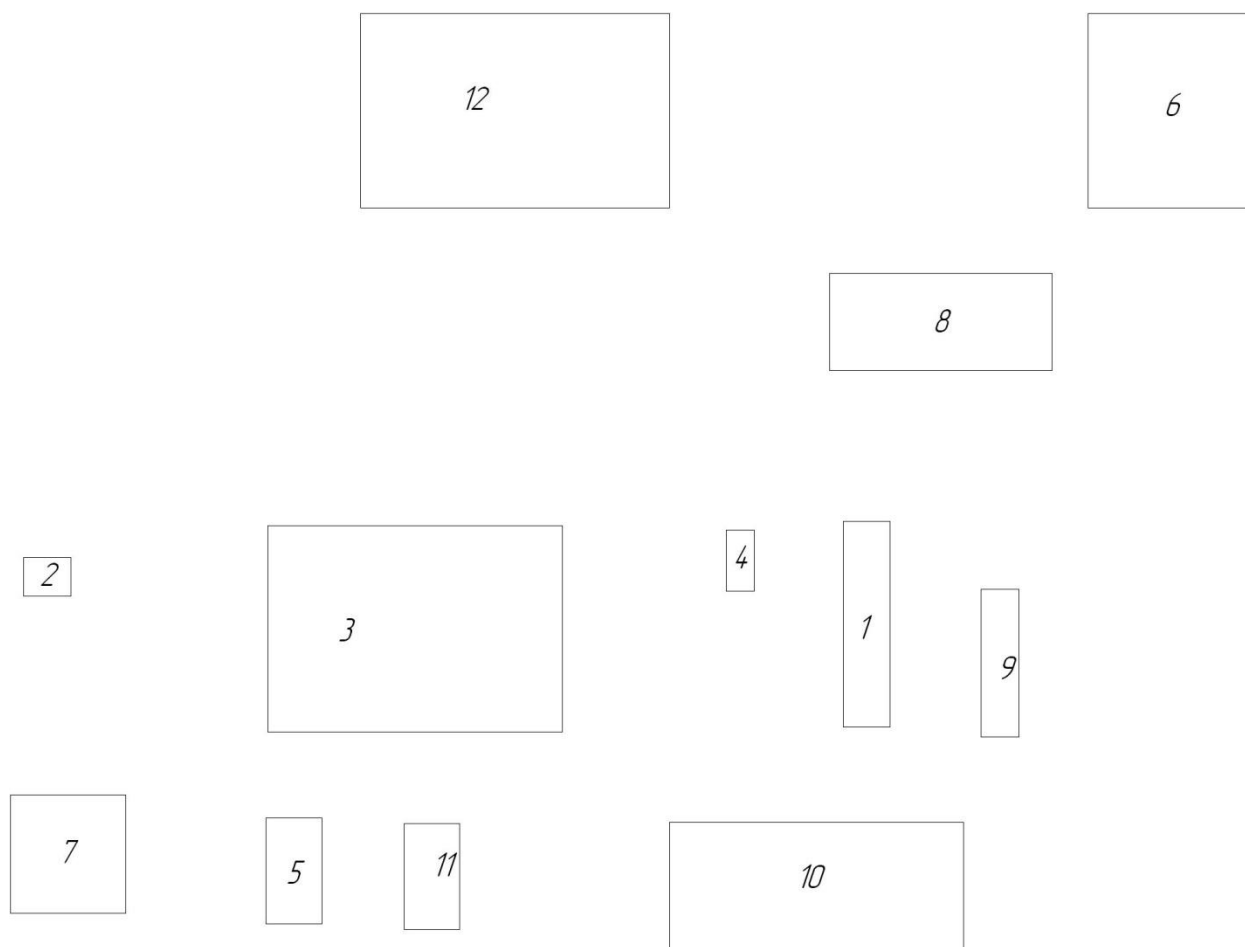
План 4. Молочно-товарная ферма №2



Масштаб 1:3000

- 1 – Административное здание
- 2 – Баня
- 3 – Коровник привязного содержания на 200 коров
- 4 – Проходная
- 5 – Гараж
- 6 – Коровник привязного содержания на 100 коров
- 7 – Столовая
- 8 – Телятник доразивания
- 9 – Склад кормов
- 10 – Кормоцех
- 11 – Котельная
- 12 – Площадка для транспорта

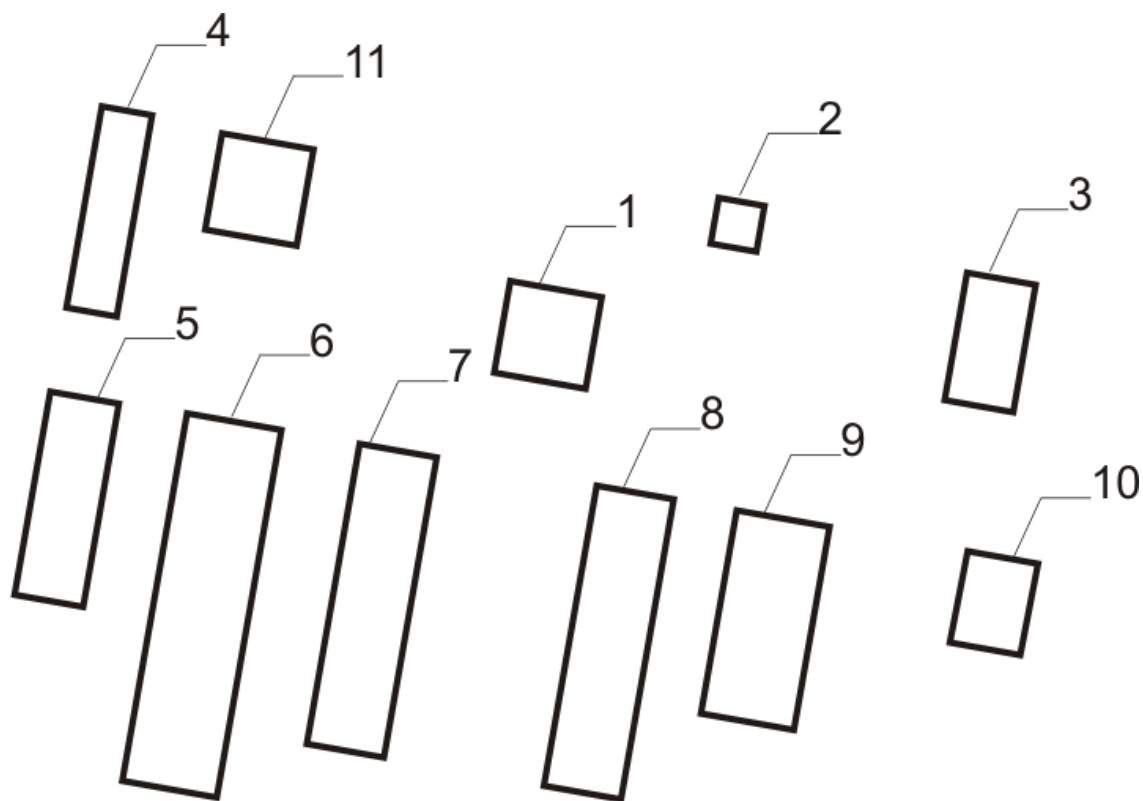
План 5. Птицеферма №1



Масштаб 1:3000

- 1 – Административное здание
- 2 – Проходная
- 3 – Птичник на 5000 кур
- 4 – Баня
- 5 – Столовая
- 6 – Инкубаторий
- 7 – Площадка для транспорта
- 8 – Кормоцех
- 9 – Склад кормов
- 10 – Птичник на 5000 кур
- 11 – Котельная
- 12 – Птичник на 5000 кур

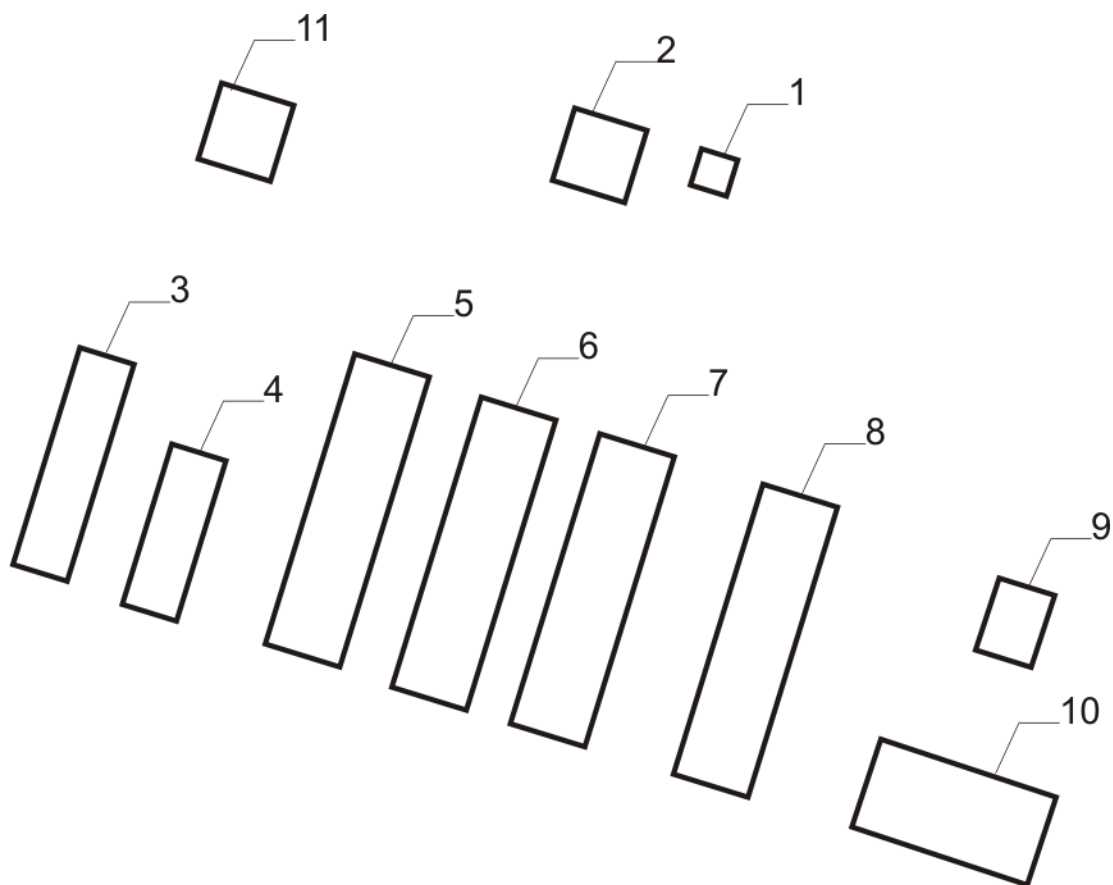
План 6. Птицеферма №2



Масштаб 1:4000

- 1 – Административное здание
- 2 – Проходная
- 3 – Склад готовой продукции
- 4 – Гараж
- 5 – Птичник на 5000 кур
- 6 – Птичник на 5000 кур
- 7 – Птичник на 5000 кур
- 8 – Птичник на 5000 кур
- 9 – Кормоцех
- 10 – Баня
- 11 – Котельная

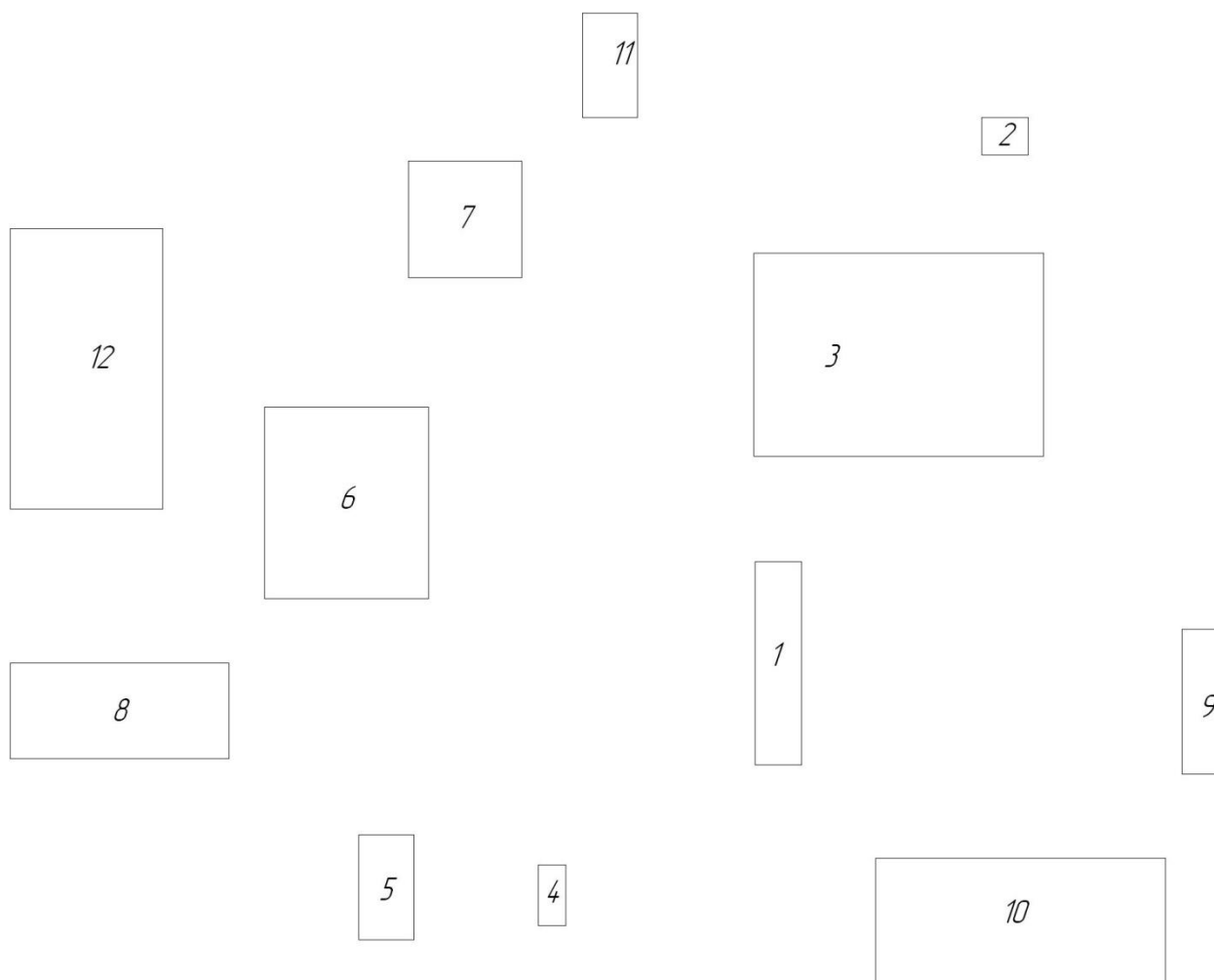
План 7. Свинокомплекс №1



Масштаб 1:4000

- 1 – Проходная
- 2 – Столовая
- 3 – Склад кормов
- 4 – Кормоцех
- 5 – Свинарник доращивания на 100 свиней
- 6 – Свинарник доращивания на 100 свиней
- 7 – Свинарник доращивания на 100 свиней
- 8 – Свинарник доращивания на 100 свиней
- 9 – Баня
- 10 – Гараж
- 11 – Котельная

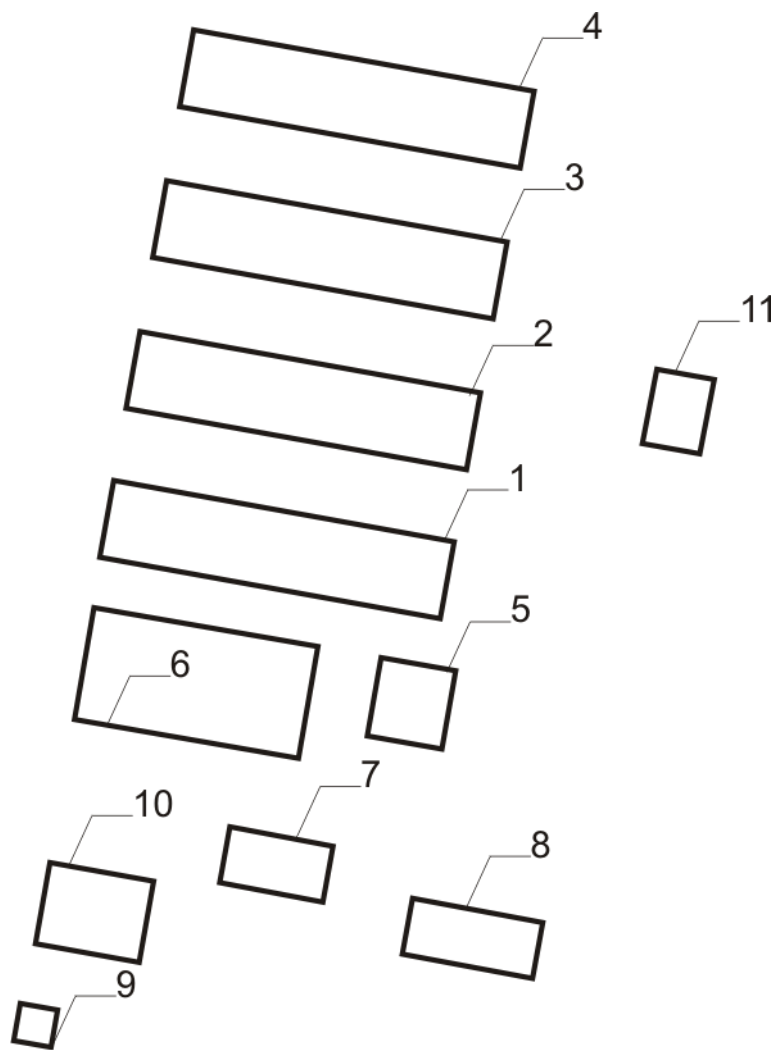
План 8. Свинокомплекс №2



Масштаб 1:2500

- 1 – Административное здание
- 2 – Проходная
- 3 – Свинарник дорашивания на 250 свиней
- 4 – Баня
- 5 – Столовая
- 6 – Свинарник дорашивания на 100 свиней
- 7 – Кормоцех
- 8 – Площадка для транспорта
- 9 – Склад кормов
- 10 – Свинарник дорашивания на 250 свиней
- 11 – Котельная
- 12 – Свинарник дорашивания на 250 свиней

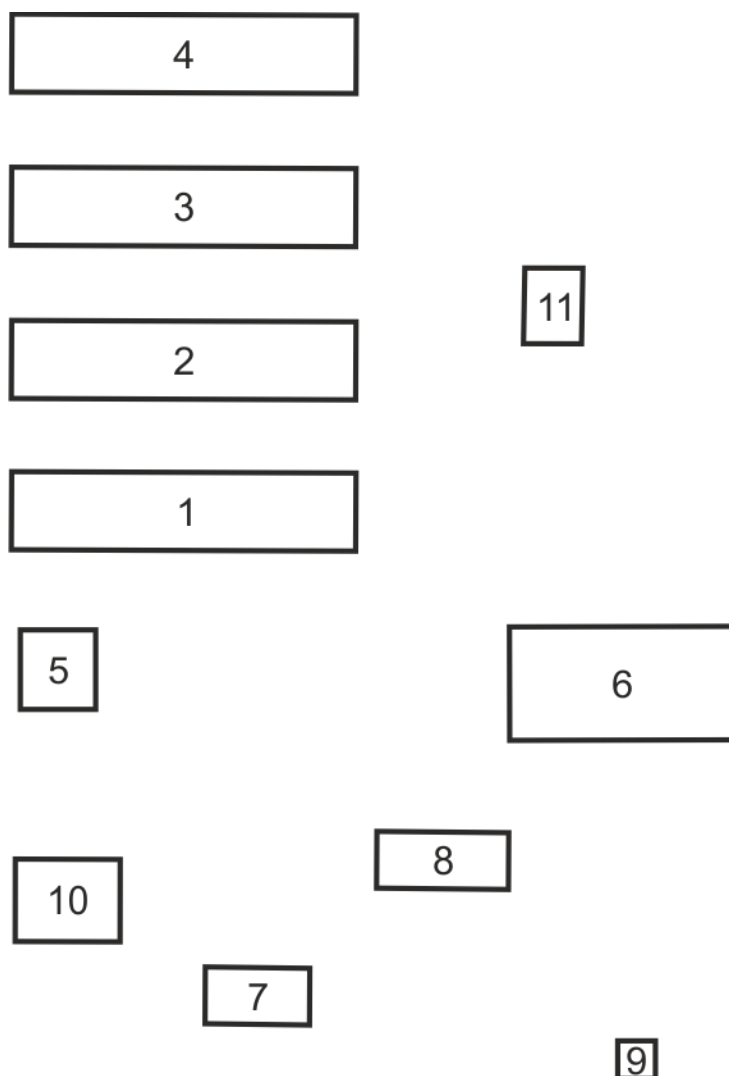
План 9. Тепличный комплекс №1



Масштаб 1:4000

- 1 – Теплица
- 2 – Теплица
- 3 – Теплица
- 4 – Теплица
- 5 – Административное здание
- 6 – Склад готовой продукции
- 7 – Столовая
- 8 – Гараж
- 9 – Проходная
- 10 – Баня
- 11 – Котельная

План 10. Тепличный комплекс №2



Масштаб 1:4000

- 1 – Теплица
- 2 – Теплица
- 3 – Теплица
- 4 – Теплица
- 5 – Административное здание
- 6 – Склад готовой продукции
- 7 – Столовая
- 8 – Гараж
- 9 – Проходная
- 10 – Баня
- 11 – Котельная

Таблица 1.1 – Установленная мощность потребителей

№ на плане	Наименования потребителей	Установленная мощность, кВт									
		Вариант									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.	Проходная	2	0,5	2	1	1	2	3	1	3	3
2.	Склад нефтепродуктов	8	7	9	6	7	8	10	5	8	7
3.	Административное здание на 15-25 рабочих мест	24	26	25	18	17	21	12	24	18	17
4.	Машинно-тракторная мастерская на 10-20 тракторов на 30-40 тракторов	45	35	30	25	38	40	42	46	50	55
5.	Гараж на 10 автомашин	49	45	45	24	50	32	55	47	28	44
6.	Склад запасных частей	5	7	3	5	4	3	2	4	5	3
7.	Пункт ремонта электрооборудования	43	48	56	40	49	23	34	57	49	50
8.	Столовая на 25 мест на 35-50 мест на 75-100 мест	10	25	15	15	10	12	30	20	15	14
9.	Площадка для транспорта	3	2	1	3	3	1	2	3	1	3
10.	ЗАВ 20	30	35	40	38	30	34	28	42	30	35
11.	Котельная	45	40	50	48	51	30	28	44	45	49
12.	Баня на 5 мест на 10 мест на 20 мест	5	3	10	15	6	8	16	12	18	5
13.	Склад рассыпных и гранулированных кормов	20	45	30	35	39	46	49	50	55	28
14.	Кормоцех	55	70	65	60	69	53	56	65	47	49
15.	Телятник доращивания на 120 телят на 230 телят	12	17	14	20	25	30	18	16	35	28
16.	Коровник с электроводонагревателем на 100 коров на 200 коров	12 15	9 20	10 18	15 20	10 19	8 17	15 18	13 22	14 23	8 17
17.	Коровник привязного содержания с механизированной уборкой навоза на 100 коров на 200 коров	11 15	14 18	10 16	12 17	14 22	16 24	10 19	12 20	13 23	16 21
18.	Птичник на 5000 кур	45	70	55	56	60	60	48	57	50	43
19.	Инкубаторий	20	25	30	18	15	12	10	26	28	16
20.	Склад готовой продукции	18	16	32	15	27	21	30	15	21	29
21.	Свинарник доращивания на 100 свиной на 250 свиной	15 19	14 21	16 25	10 25	11 26	13 28	12 20	12 20	11 24	19 28
22.	Теплица	40	20	50	25	15	18	39	38	30	36

Таблица 1.2 – Ток короткого замыкания в точке К₁

Параметр	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I _{K1} ⁽³⁾ (кА)	1,5	1,9	1,7	1,8	0,9	1,6	1,1	1,3	1,4	1,2

Таблица 1.3 – Исходные данные для проверки сети на запуск асинхронного короткозамкнутого электродвигателя

Вариант	Запускаемый двигатель D1							Работающий двигатель D2	
	P _н (кВт)	число об./мин	I _н (А)	k _i	cosφ _н	$m_n = \frac{M_n}{M_H}$	$M_c^* = \frac{M_c}{M_H}$	$m_{\max 2} = \frac{M_{\max 2}}{M_{H2}}$	$M_{c2}^* = \frac{M_{c2}}{M_{H2}}$
1	15	3000	28	7,0	0,80	1,2	0,30	2,2	0,85
2	18	3000	30	7,5	0,92	1,2	0,31	2,2	0,90
3	22	3000	37	7,5	0,90	1,2	0,32	2,2	0,86
4	30	3000	49	7,5	0,92	1,2	0,30	2,2	0,89
5	15	1500	25	7,5	0,90	2,0	0,33	2,2	0,85
6	18	1500	30	7,5	0,91	2,0	0,30	2,2	0,86
7	22	1500	37	7,5	0,91	2,0	0,31	2,2	0,90
8	11	1000	19	7,0	0,90	2,0	0,29	2,2	0,90
9	15	1000	27	7,0	0,85	2,0	0,31	2,2	0,91
10	18	1000	30	7,0	0,91	2,0	0,30	2,2	0,87

2. Требование к расчетно-пояснительной записке

Расчетно-пояснительную записку выполняют на листах формата А4 (210×297мм) на одной стороне листа. Первая страница расчетно-пояснительной записки – задание на проектирование, вторая страница – титульный лист (приложение 1), третья страница – содержание. Содержание размещается в рамке с широким штампом, остальные страницы в рамках с узким штампом. Расчетно-пояснительная записка имеет шифр

КР 000.00.ПЗ,

где КР – курсовая работа, 000 – три последние цифры номера зачетной книжки студента; 00 – год выполнения проекта; ПЗ – пояснительная записка.

Объём расчетно-пояснительной записки не должен превышать 30 страниц. Сокращение слов допускаются только общепринятые, например, ПУЭ. Перенос слов в заголовках не допускается. Все формулы, рисунки и таблицы должны иметь номер. Рисунки и таблицы должны иметь названия. Нумерация выполняется сквозная или в пределах раздела. При многократно повторяющихся однотипных расчетах приводится один пример, а остальные результаты сводятся в таблицу.

3. Требования к графической части проекта

Графическая часть проекта состоит из 2 листов. На листе 1 размещается план населенного пункта с сетью 0,38 кВ. Для рассчитанных линий должны быть указаны: количество, марка и сечение провода, потеря напряжения в конце каждой линии, повторное заземление нулевого провода, нумерация опор, промежуточный пролет. Повторное заземление выполняется на всех анкерных опорах и на опорах, с которых запитаны животноводческие помещения, а также здания, где возможно большое скопление людей. На листе 2 приводятся результаты расчета токов короткого замыкания и согласования защит ТП 10/0,4кВ. Образцы оформления графических листов приведены на рисунках 1.1 и 1.2. Графические листы выполняются на формате А3.

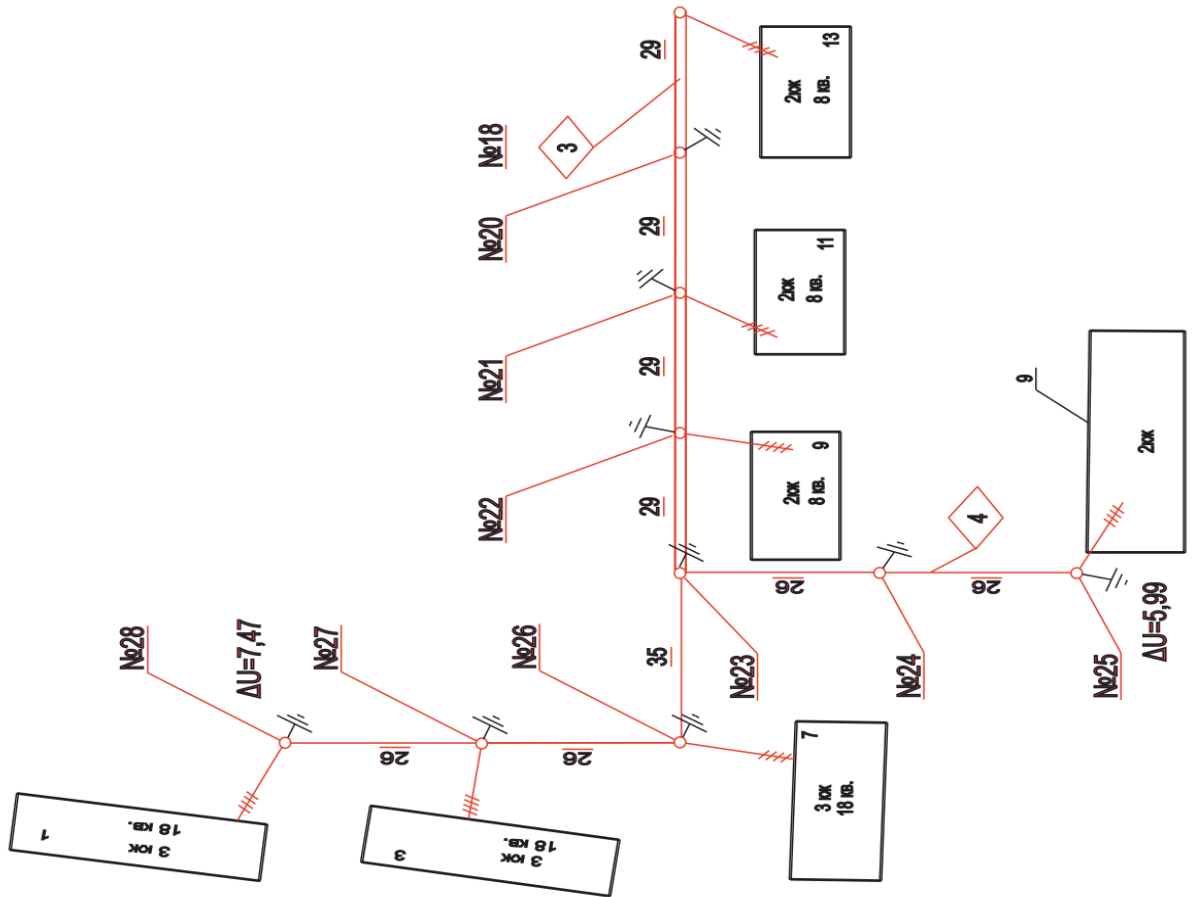
Графические листы имеют шифр

КР 000.00.ГЧ,

где КР – курсовая работа; 000 – три последние цифры номера зачетной книжки студента; 00 – год выполнения проекта; ГЧ – графическая часть.

Условные обозначения

Условное обозначение	Расшифровка условного обозначения
$\Delta U=3,2\%$	ВЛ-0,38 кВ
\bigcirc	ВЛ-10 кВ
\pm	Повторное заземление нулевого провода
\bullet	Светильник уличного освещения
$\Delta U=3,2\%$	Потеря напряжения в линии
\bigcirc	суммарная нагрузка
\bigcirc	номинальная мощность
КТП	порядковый номер
СИП 50x4	количество, марка и площадь сечения проводов ВЛ



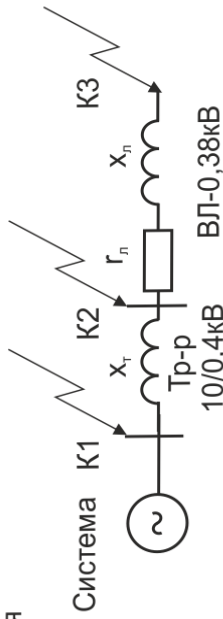
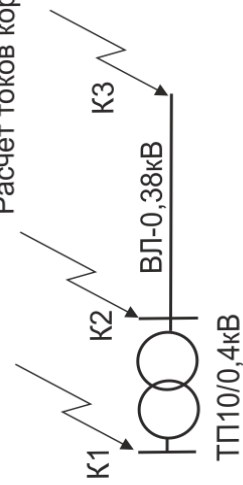
Экспликация помещений по зонам ТП

№ на плане	Наименование помещений	Максимальная нагрузка, кВт	Провод	Макс. ток, А	Сечение, мм²	Длина, м	Диаг. марка	Степень защиты	Диаг. марка
1	3 кв. кирпичный жилой дом	35,1	3*16	39,5	3*16	30	3*16	3*16	3*16
2	2 кв. кирпичный жилой дом	19,5	3*10	21,5	3*10	30	3*10	3*10	3*10
3	Жилой дом	45,1	4*16	49,5	4*16	30	4*16	4*16	4*16
4	Кирпичный жилой дом	65,1	6*16	69,5	6*16	30	6*16	6*16	6*16
5	2-этажный жилой дом	35,1	3*16	39,5	3*16	30	3*16	3*16	3*16
6	2-эт. 8-квартирный жилой дом	49,1	4*16	53,5	4*16	30	4*16	4*16	4*16
7	2-эт. 16-квартирный жилой дом	30	30	43	30	30	30	30	30
8	3-эт. 16-квартирный жилой дом	39,3	3*16	43,7	3*16	30	3*16	3*16	3*16
9	Интернат	30	30	43	30	30	30	30	30
10	Котельная	55	55	55	55	55	55	55	55
11	Гараж	5	5	2	5	5	5	5	5
	Уличное освещение	2	2	2	2	2	2	2	2
Расчетная мощность		175	255						

С-3-810-РД	
Расшифровка ВЛ-0,4 кВ	
Исполн.	Провер.
Датум	Лист
Регистр. №	Р
Работы по монтажу	8
План электроустановки	
0,38-10 кВ	
М 1:1000	

Рисунок 1.1 – Лист 1 графической части

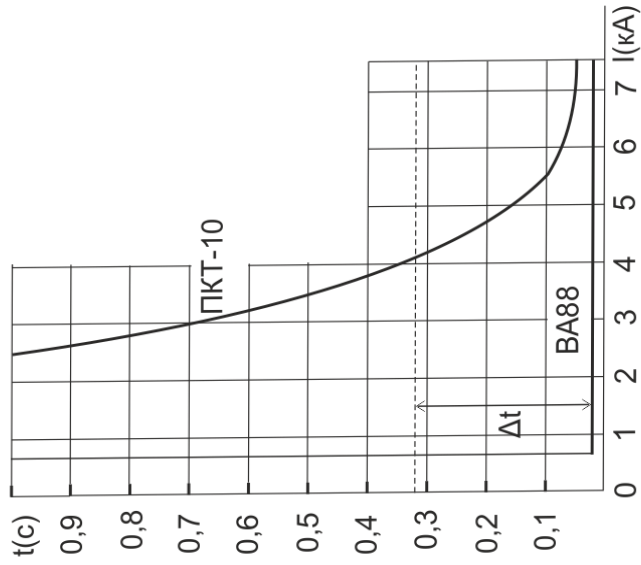
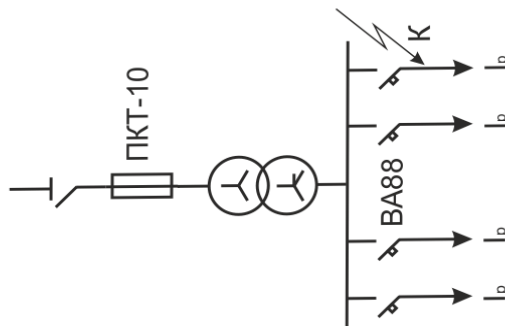
Расчет токов короткого замыкания



Токи короткого замыкания

Токи		Точки на схеме	
$I_{k1}^{(3)}$ (кА)		K1	
$I_{k2}^{(3)}$ (кА)		K2	
$I_{k3}^{(3)}$ (кА)		K3	

Выбор и согласование работы аппаратов защиты ТП 10/0,4кВ



Технические характеристики плавкого предохранителя

Марка	U_n (В)	$I_{ном}$ (А)	$I_{ин}$ (А)	$I_{отс}$ (А)

Технические характеристики автоматического выключателя

Марка	U_n (В)	$I_{ном}$ (А)	$I_{ин}$ (А)	$I_{отс}$ (А)

Приведение токов срабатывания плавкого предохранителя

Ток КЗ на шинах 10кВ (А)	Ток КЗ на шинах 0,4кВ (А)	Время срабатывания предохранителя (с)

Рисунок 1.2 – Лист 2 графической части

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

1. Расчет электрических нагрузок потребителей

Полная нагрузка потребителя рассчитывается по формулам:

$$S_{д} = \sqrt{P_{д}^2 + Q_{д}^2} \quad S_{в} = \sqrt{P_{в}^2 + Q_{в}^2} \quad (1.1)$$

где $S_{д}$ и $S_{в}$ – полная дневная и вечерняя нагрузка потребителя, кВА; $P_{д}$ и $P_{в}$ – активная дневная и вечерняя нагрузка потребителя, кВт; $Q_{д}$ и $Q_{в}$ – реактивная дневная и вечерняя нагрузка потребителя, кВар;

Значения активных и реактивных нагрузок приведены в таблице 1 приложения.

Если установленная мощность потребителя в задании ($P_{уст.з}$) и таблице 1 не совпадают – рассчитывают коэффициент корректировки нагрузок:

$$K_{к} = \frac{P_{уст.з}}{P_{уст.т}}, \quad (1.2)$$

где $P_{уст.з}$ – установленная мощность потребителя приведенная в задании; $P_{уст.т}$ – установленная мощность потребителя приведенная в табл. 1 приложения.

На этот коэффициент умножают значения активной и реактивной нагрузки, приведенные в таблице 1 приложения. Полученные результаты сводят в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Нагрузки потребителей

№	Наименование потребителя	$K_{к}$	Дневной максимум			Вечерний максимум		
			$P_{д}$ (кВт)	$Q_{д}$ (кВар)	$S_{д}$ (кВА)	$P_{в}$ (кВт)	$Q_{в}$ (кВар)	$S_{в}$ (кВА)
1								
.								
.								

Если от ТП 10/0,4 кВ питается только производственная нагрузка, расчет ведут по дневному максимуму ($S_{д}$), если только бытовая (жилые дома) – по вечернему максимуму ($S_{в}$). Когда от подстанции питается смешанная нагрузка, рассчитывают дневной и вечерний максимум и выбирают больший.

2. Выбор места установки трансформаторной подстанций 10/0,4 кВ

Для снижения суммарной длины и сечения провода линий электропередачи ТП располагают по возможности в центре электрических нагрузок. При этом подстанция должна устанавливаться на участке незатопляемом ливневыми или паводковыми водами, иметь удобный подход линии высшего напряжения, не загромождать проезд транспорту, не создавать помех в нормальной жизни жителей населенного пункта.

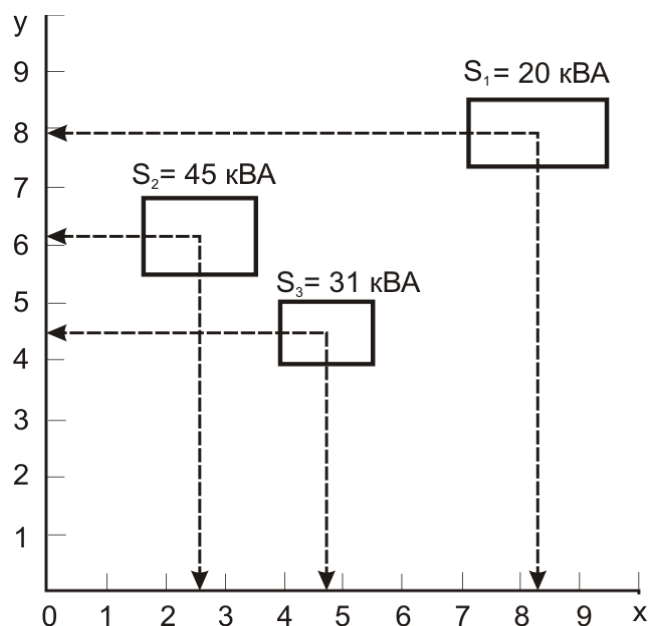


Рисунок 2.1 – Определение центра электрических нагрузок

Центр электрических нагрузок определяют графоаналитическим методом. Для этого на план электрифицируемого объекта наносятся координатные оси. Начало координат выбирается произвольно. На координатные оси наносятся деления, рекомендуется принять размер деления 0,5 см. Из центра каждой нагрузки проводятся перпендикуляры на ось x и ось y . Полную мощность и координаты нагрузок сводят в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Полная мощность и координаты электрических нагрузок

№	S (кВА)	x (см)	y (см)
1	20	8,3	7,9
2	45	2,5	6,2
3	31	4,7	4,4

Координаты центра нагрузок $x_{ц}$ и $y_{ц}$ определяются по формулам:

$$x_{ц} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i x_i}{\sum_{i=1}^n S_i}, \quad (2.1)$$

$$y_{ц} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i y_i}{\sum_{i=1}^n S_i}, \quad (2.2)$$

где S_i – полная мощность i -ой нагрузки, кВА; x_i и y_i – проекции центров нагрузок на ось x и ось y , соответственно; $\sum S_i$ – сумма полных мощностей всех нагрузок.

Тогда, подставив значения из таблицы 2.1 в формулы 2.1-2.2, получим:

$$x_{ц} = \frac{S_1 x_1 + S_2 x_2 + S_3 x_3}{S_1 + S_2 + S_3} = \frac{20 \times 8,3 + 45 \times 2,5 + 31 \times 4,7}{20 + 45 + 31} = 4,4 \text{ см};$$

$$y_{ц} = \frac{S_1 y_1 + S_2 y_2 + S_3 y_3}{S_1 + S_2 + S_3} = \frac{20 \times 7,9 + 45 \times 6,2 + 31 \times 4,4}{20 + 45 + 31} = 5,9 \text{ см}.$$

3. Выбор трассы ВЛ-0,38 кВ

При выборе трассы ВЛ-0,38 кВ необходимо соблюдать следующие требования. Для сельских населенных пунктов рекомендуется применять КТП упрощенного типа. От таких подстанций мощностью до 250 кВА могут быть запитаны 3 фидера (отходящих линии) 0,38 кВ, а мощностью 250 кВА и более – 10 фидеров. Нагрузки по фидерам должны распределяться по возможности равномерно.

Линия электропередачи не должна возвращаться назад к подстанции. Если трасса ВЛ дважды поворачивает (рис. 3.1, а), то потери электроэнергии на участке а-в удваиваются. Внутренний угол поворота ВЛ не должен быть меньше 90° (рис. 3.1, б). Отпайки от воздушной линии и пересечения её с другими воздушными линиями электропередачи, или линиями связи выполняют под прямым углом. У тупиковой КТП 10/0,4 кВ с воздушным вводом ВЛ-0,38 кВ могут отходить с трех сторон, а с четвертой стороны подходит ВЛ-10 кВ. Производственные и бытовые нагрузки следует запитывать от разных подстанций. Пример возможной конфигурации ВЛ-0,38кВ показан на рис. 3.2.

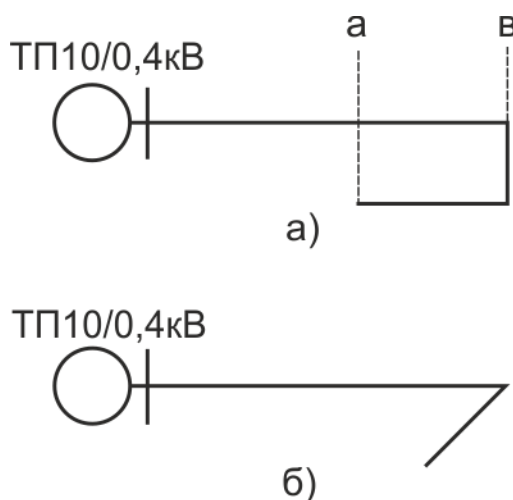


Рисунок 3.1 – Неправильная конфигурация трассы ВЛ-0,38 кВ:
а) возврат ВЛ, б) острый угол поворота трассы

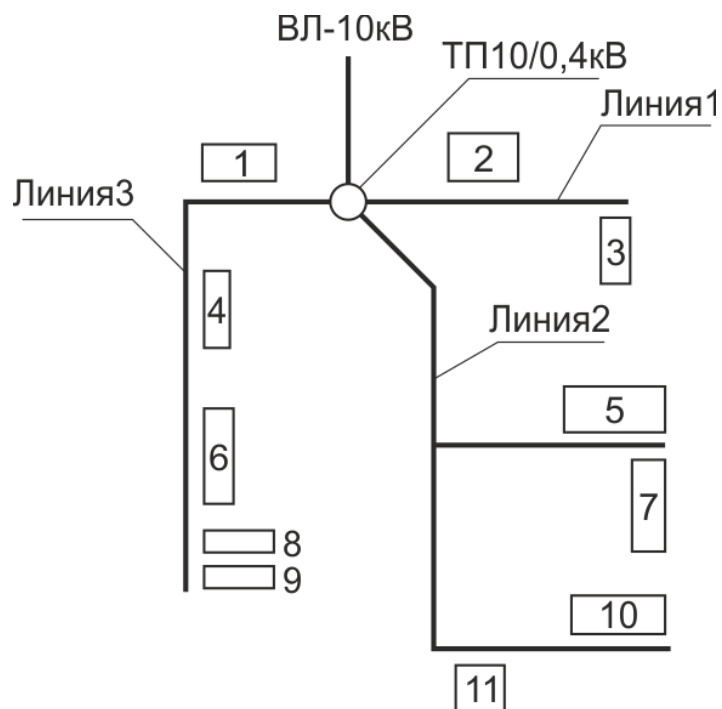


Рисунок – 3.2 КТП 10/0,4 кВ с питающей и отходящими линиями

4. Расчет нагрузок ВЛ-0,38кВ

Прежде чем приступить к расчету сечения провода, необходимо определить нагрузку по участкам ВЛ. Для этого составляют расчетную схему, на которой указывают нагрузки потребителей и длины участков линии в километрах (рис. 4.1).

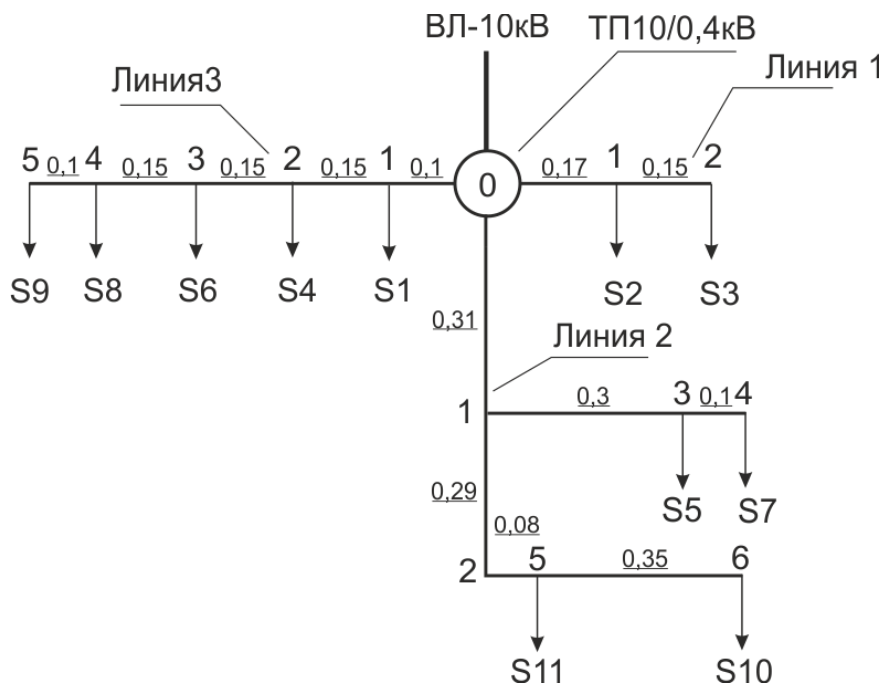


Рисунок 4.1 – Расчетная схема ВЛ-0,38 кВ

Далее суммируют нагрузки потребителей на каждом участке линии. Суммирование начинают с последнего участка и производят с использованием специальных таблиц (табл. 3 прил.). К большей нагрузке прибавляют не всю меньшую нагрузку, а только добавку от неё (ΔS). Например, необходимо сложить три нагрузки: $S_1 = 10$ кВА, $S_2 = 5$ кВА и $S_3 = 7$ кВА. Для этого сначала к нагрузке S_1 прибавляем добавку от нагрузки S_2 ($\Delta S_2 = 3$):

$$S_1 + S_2 = 10 + 3 = 13 \text{ кВА} \quad (4.1)$$

Затем к полученной сумме прибавляем добавку от третьей нагрузки ($\Delta S_3 = 4,2$):

$$(S_1 + S_2) + \Delta S_3 = 13 + 4,2 = 17,2 \text{ кВА} \quad (4.2)$$

Для определения мощности ТП 10/0,4 кВ арифметически суммируют нагрузки на головных участках всех ВЛ-0,38 кВ. Полученный результат умножают на коэффициент роста нагрузок (k_p). Если динамика роста нагрузок неизвестна – принимают $k_p = 1,2$. Затем выбирают ближайшую большую стандартную мощность подстанции. Стандартные мощности ТП 10/0,4кВ: 25; 40; 63; 100; 160; 250; 400; 630 кВА. Результаты расчета сводятся в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Нагрузки ВЛ-0,38 кВ

Расчетный участок	Длина (км)	Расчетная нагрузка (кВА)
ТП 1		
Линия 1		
Уч ₀₋₁		
...		
Линия 2		
Уч ₀₋₁		
...		
Линия 3		
Уч ₀₋₁		
...		
Суммарная нагрузка ТП 1		

5. Электрический расчет ВЛ-0,38 кВ

Сечение провода выбирают по длительному допустимому току и проверяют по механической прочности и допустимой потере напряжения. Один фидер подстанции питающей производственную нагрузку проверяется на возможность пуска мощного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором. Так как линия выполнена самонесущим изолированным проводом (СИП), дополнительно производится проверка на термическую стойкость в режиме короткого замыкания. В соответствии с п.2.4.13. и п.2.4.16. ПУЭ воздушные линии электропередачи с самонесущими изолированными проводами (ВЛИ) выполняются проводом одного сечения по всей длине линии. По условиям механической прочности сечение фазных проводов магистрали должно быть не менее 50 мм².

Так как сечение провода принято одинаковым по всей длине линии расчет ведут по току головного участка.

Зная полную мощность, определяют расчетный ток по формуле:

$$I_{0-1} = \frac{S_{0-1}}{\sqrt{3}U_L}, \quad (5.1)$$

где I_{0-1} – ток на головном участке, А; S_{0-1} – нагрузка головного участка, кВА; U_L – номинальное линейное напряжение, кВ.

Полученный результат сравнивают с допустимыми значениями тока для проводов воздушной линии (табл. 4 прил.) и выбирают провод такого сечения, чтобы допустимый длительный ток был не меньше расчетного.

Выбранный провод проверяют по допустимой потере напряжения. Для этого определяют фактическую потерю напряжения на участке по формуле:

$$\Delta U_{\text{уч}} = \frac{Sl}{U_n} (r_0 \cos \varphi + x_0 \sin \varphi), \quad (5.2)$$

где S – нагрузка на участке ВЛ, кВА; l – длина участка, км; U_n – номинальное линейное напряжение, кВ; r_0 – удельное активное сопротивление провода, Ом/км; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности; x_0 – удельное индуктивное сопротивление провода, Ом/км; $\sin \varphi = \sin \arccos \varphi$.

Суммируют потерю напряжения всех участков линии:

$$\Delta U_{\phi} = \Delta U_{\text{уч}0-1} + \Delta U_{\text{уч}1-2} + \dots + \Delta U_{\text{уч}n-(n+1)}. \quad (5.3)$$

Сравнивают фактическую потерю напряжения с допустимой:

$$\Delta U_{\phi} \leq \Delta U_{\text{доп}}. \quad (5.4)$$

Если данное условие не выполняется – берут сечение провода на ступень выше и повторяют расчет. Рекомендованное допустимое значение потери напряжения для ВЛ-0,38 кВ $\Delta U_{\text{доп}} = 6\%$ от номинального напряжения.

Если линия 0,38 кВ питает асинхронные электродвигатели мощностью более 10 кВт, то её необходимо проверить на возможность пуска и устойчивой работы электродвигателя. Для проверки сети на возможность пуска электродвигателя D1 рассчитывают следующие параметры:

Активное и индуктивное сопротивление ВЛ-0,38 кВ:

$$r_{\text{л1}} = r_0 \cdot l; \quad x_{\text{л1}} = x_0 \cdot l, \quad (5.5)$$

где r_0 – удельное активное сопротивление провода, Ом/км; x_0 – удельное индуктивное сопротивление провода, Ом/км, (табл.7 прил.); l – длина линии, км.

Сопротивление сети:

$$r_c = r_m + r_{\text{л}}, \quad x_c = x_m + x_{\text{л}}, \quad (5.6)$$

Проверяем сеть на возможность пуска электродвигателя D1. Рассчитываем сопротивление силового трансформатора ТП:

$$r_T = \frac{\Delta P_{\text{мн}} U_n^2}{S_{\text{ТП}}^2} = \frac{2,65 \times 0,4^2 \times 10^3}{160^2} = 0,017 (\text{Ом}), \quad (6.1)$$

$$x_T = \sqrt{z_T^2 - r_T^2} = \sqrt{0,045^2 - 0,017^2} = 0,04 (\text{Ом}), \quad (6.2)$$

где $\Delta P_{\text{мн}}$ – потери мощности в меди трансформатора (потери короткого замыкания), $S_{\text{ТП}}$ – номинальная мощность трансформатора; z_T – полное сопротивление трансформатора

Сопротивление линии 1:

Сопротивление сети:

$$r_c = r_T + r_{\text{л}} = 0,017 + 0,24 = 0,257 (\text{Ом}); \quad (6.5)$$

$$x_c = x_T + x_{\text{л}} = 0,04 + 0,018 = 0,058 (\text{Ом}). \quad (6.6)$$

Коэффициент мощности двигателя при пуске:

$$\cos \varphi_n = 2 \cos \varphi_n m_n / k_i = \frac{2 \times 0,92 \times 1,2}{7,5} = 0,29. \quad (6.7)$$

Потеря напряжения в электрической сети в относительных единицах:

$$\Delta U_n^* = \frac{\sqrt{3}(r_c \cos \varphi_n + x_c \sin \varphi_n) I_n}{U_n} = \frac{1,73(0,257 \times 0,29 + 0,058 \times 0,96) 367,5}{380} = 1,05, \quad (6.8)$$

где I_n – пусковой ток электродвигателя $I_n = I_n k_i = 49 \times 7,5 = 367,5$ А; $\sin \varphi_n = 0,96$ – синус угла φ при пуске, определяется по значению $\cos \varphi = 0,29$.

Напряжение на шинах 0,4кВ трансформаторной подстанции 10/0,4кВ до пуска электродвигателя:

$$U_{ш} = U_n + \delta U = 0,4 + 5 = 0,45 \text{ кВ}, \quad (6.9)$$

где $\delta U = 5$ – регулируемая надбавка трансформатора 10/0,4кВ для удаленного потребителя (приложение 2)

Напряжение на шинах 0,4кВ трансформаторной подстанции 10/0,4кВ до пуска электродвигателя в относительных единицах

$$U_{ш}^* = \frac{U_{ш}}{U_n} = \frac{U_n + \delta U}{U_n} = \frac{0,4 + 0,05}{0,4} = 1,125. \quad (6.10)$$

Напряжение на зажимах электродвигателя при пуске в относительных единицах

$$U_n^* = \frac{U_{ш}^*}{1 + \Delta U_n^*} = \frac{1,125}{1 + 1,05} = 0,59. \quad (6.11)$$

Пусковой момент двигателя с учетом снижения напряжения при пуске

$$m_n' = U_n^{2*} m_n = 0,59^2 \times 1,2 = 0,4 \quad (6.12)$$

Условие пуска электродвигателя

$$1 \geq \frac{\eta_3 M_{с.}^*}{m_n'}, \quad 1 \geq \frac{1,3 \times 0,3}{0,4}, \quad 1 \geq 0,975. \quad (6.13)$$

Условие выполняется.

Проверяем сеть на устойчивость работы асинхронного электродвигателя D2 при пуске соседнего двигателя D1. Максимальный момент двигателя D2 с учетом снижения напряжения при пуске:

$$m_{\max 2}' = U_n^{2*} m_{\max 2} = 0,59^2 \times 2,2 = 1,3 \quad (6.14)$$

где U_n^{2*} – напряжение на зажимах работающего двигателя при пуске соседнего двигателя равно напряжению на зажимах запускаемого двигателя.

Условие устойчивой работы двигателя D2

$$1 \geq \frac{\eta_3 M_{с.2}^*}{m_{\max 2}'}, \quad 1 \geq \frac{1,3 \times 0,89}{1,3}, \quad 1 \geq 0,89. \quad (6.15)$$

Условие выполняется.

Одну линию 0,38 кВ необходимо проверить на возможность пуска электродвигателя. Проверка на возможность пуска электродвигателя производится исходя из условия, что в момент пуска отклонение напряжения на зажимах электродвигателя не должно превышать 30% от номинального. Предполагается также, что напряжение на шинах 0,4кВ ТП10/0,4кВ от которых питается электродвигатель равно номинальному. В этом случае отклонение напряжения на зажимах электродвигателя равно потере напряжения в линии 0,38кВ. Потерю напряжения в пусковом режиме с достаточной для практических расчетов точностью можно определить по выражению

$$\delta U = \Delta U\% \approx \frac{Z_c}{Z_c + Z_{эд}} 100,$$

где Z_c – полное сопротивление сети; $Z_{эд}$ – полное сопротивление электродвигателя.

$$Z_c = Z_l + Z_{тр},$$

где Z_l – полное сопротивление линии 0,38кВ; $Z_{тр}$ – полное сопротивление трансформатора 10/0,4кВ.

$$Z_l = \sqrt{r^2 + x^2},$$

где $r = r_0 l$ – активное сопротивление линии; $x = x_0 l$ – индуктивное сопротивление линии; l – длина линии 0,38кВ от ТП 10/0,4кВ до места установки электродвигателя, км.

$$Z_{тр} = X_{тр} = \frac{u_k\% U_n^2}{100 S_H 10^{-3}},$$

где $u_k\%$ – напряжение короткого замыкания трансформатора (табл.5 прил.); U_H – номинальное напряжение трансформатора (принимается равным вторичному напряжению, так как сопротивление трансформатора используется для расчета тока к.з. со стороны 0,4 кВ); S_H – номинальная мощность трансформаторной подстанции.

$$Z_{эд} = \frac{U_H}{\sqrt{3}kI_H},$$

где U_H – номинальное напряжение; k – пусковой коэффициент; I_H – номинальный ток.

При проверке СИП на термическую устойчивость должно выполняться условие

$$I_{к.р} \leq I_{к.д}, \quad (5.16)$$

где $I_{к.р}$ – расчетное значение односекундного тока короткого замыкания в начале ВЛ-0,38кВ; $I_{к.д}$ – допустимое по условиям термической стойкости значение тока короткого замыкания (табл.7 прил.). При токах более 1кА автоматические выключатели серии ВА работают в независимой части время-токовой характеристики, где время срабатывания (τ) равно 0,02 с.

Поэтому приведенные в таблице значения $I_{кд}$ надо умножить на коэффициент

$$k = \frac{1}{\sqrt{\tau}}.$$

Расчетное значение тока короткого замыкания в начале ВЛ-0,38кВ

$$I_{к.расч} = \frac{400}{\sqrt{3}Z_{T1}}, \quad (5.17)$$

где Z_{T1} – сопротивление прямой последовательности трансформатора 10/0,4кВ, приведенное к напряжению 0,4кВ (табл.6 прил.).

Таблица 5.1 – Результаты электрического расчета ВЛ-0,38кВ.

Расчетный участок	Длина (км)	Расчетная нагрузка (кВА)	Потеря напряжения ΔU (В)	Марка и сечение провода
ТП 1				
Линия 1				...
Уч ₀₋₁				
Уч ₁₋₂				
...	
Линия 2				...
...	
Линия 3				
...	
Суммарная нагрузка ТП 1		$S_{\Sigma}=(S_{л1}+ S_{л2}+ S_{л3})k_p$		
Номинальная мощность ТП 1				

Пример выбора сечения СИП-4.

Исходные данные: Линия 0,38кВ питается от ТП10/0,4кВ мощностью 160кВА, к линии подключена производственная нагрузка. По условию механической прочности принят СИП-4×50. Линия состоит из трех участков. Длины и расчетные нагрузки участков приведены в табл. 3.2. Допустимая потеря напряжения в ВЛ-0,38кВ $\Delta U_{доп}=6\%$. В конце линии подключен асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором. Номинальный ток электродвигателя $I_H = 28A$, пусковой коэффициент $k_i = 7$.

Таблица 5.2 – Длины и нагрузки участков

Расчетный участок	Длина l (км)	Расчетная нагрузка S (кВА)
1-2	0,15	47
2-3	0,12	35
3-4	0,11	12

Проверка по длительному допустимому току

Исходя из условий механической прочности, принимаем СИП сечением 50мм². Ток на головном участке

$$I_{1-2} = \frac{S_{1-2}}{\sqrt{3}U_{л}} = \frac{47}{1,73 \times 0,38} = 71,5\text{А},$$

По табл.4 приложения находим допустимый ток для СИП 4×50

$$I_{\text{доп}} = 140\text{А}$$

Ток на головном участке меньше допустимого, следовательно, провод проходит по этому показателю.

Проверка по допустимой потере напряжения

По табл.4 приложения находим удельное активное и индуктивное сопротивление СИП 4×50

$$r_0 = 0,641 \times 1,1 = 0,705\text{Ом/км}; \quad x_0 = 0,085\text{Ом/км}.$$

По табл. приложения находим коэффициент мощности для производственной нагрузки $\cos\varphi=0,70$; зная $\cos\varphi$, рассчитываем синус угла φ $\sin\varphi=0,71$.

Потеря напряжения по участкам

$$\Delta U_{3-4} = \frac{12 \times 0,11}{0,38} (0,705 \times 0,70 + 0,085 \times 0,71) = 1,9\text{В};$$

$$\Delta U_{2-3} = \frac{35 \times 0,12}{0,38} (0,705 \times 0,70 + 0,085 \times 0,71) = 6,1\text{В};$$

$$\Delta U_{1-2} = \frac{47 \times 0,15}{0,38} (0,705 \times 0,70 + 0,085 \times 0,71) = 10,2\text{В}.$$

Суммарная потеря напряжения в Вольтах

$$\Delta U_{\Sigma} = 1,9 + 6,1 + 10,2 = 18,2\text{В}.$$

Суммарная потеря напряжения в %

$$\Delta U_{\Sigma\%} = \frac{18,2}{380} 100 = 4,8\%.$$

Расчетное значение потери напряжения меньше допустимого

$$\Delta U_{\Sigma\%} < U_{\text{доп}},$$

Провод проходит.

Проверка на возможность пуска асинхронного электродвигателя.

Сопротивление ВЛ-0,38

$$r = r_0 l = 0,705(0,15 + 0,12 + 0,11) = 0,705 \times 0,38 = 0,27\text{ Ом};$$

$$x = x_0 l = 0,085 \times 0,38 = 0,03\text{ Ом};$$

$$Z_{л} = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{0,27^2 + 0,03^2} = 0,272\text{ Ом}.$$

Сопротивление трансформатора

$$Z_{\text{тр}} = X_{\text{тр}} = \frac{u_{\text{к}}\% U_{\text{н}}^2}{100 S_{\text{н}} 10^{-3}} = \frac{4,5 \times 0,16}{100 \times 160 \times 10^{-3}} = 0,045\text{ Ом}.$$

Сопротивление сети

$$Z_{\text{с}} = Z_{л} + Z_{\text{тр}} = 0,272 + 0,045 = 0,317\text{ Ом}.$$

Сопротивление электродвигателя

$$Z_{эд} = \frac{U_n}{\sqrt{3}kI_n} = \frac{380}{1,73 \times 7 \times 28} = 1,121 \text{ Ом.}$$

Отклонение напряжения на зажимах электродвигателя

$$\delta U = \Delta U\% \approx \frac{Z_c}{Z_c + Z_{эд}} 100 = \frac{0,317}{0,317 + 1,121} 100 = 22\%$$

Отклонение напряжения на зажимах электродвигателя меньше 30%, провод проходит.

6. Расчет токов короткого замыкания

Для выбора аппаратов управления и защиты необходимо знать величину токов короткого замыкания. Так как схема сети не сложная, расчет производим в именованных единицах. Элементы схемы могут быть представлены полным сопротивлением $z = \sqrt{r^2 + x^2}$ или индуктивным сопротивлением x , если активное сопротивление r составляет менее 10% от полного сопротивления. Для расчета сопротивления системы необходимо знать ток трехфазного короткого замыкания ($I_{к1}^{(3)}$) в точке К1 (точка подключения сети к системе). В данном случае этот ток задан, в реальных условиях его измеряют. При расчетах номинальное напряжение берется с запасом в 5%.

Исходя из схемы сети 10/0,38 кВ (рис. 8.1.) составляют эквивалентную схему (рис. 8.2.), затем рассчитывают сопротивление элементов сети.

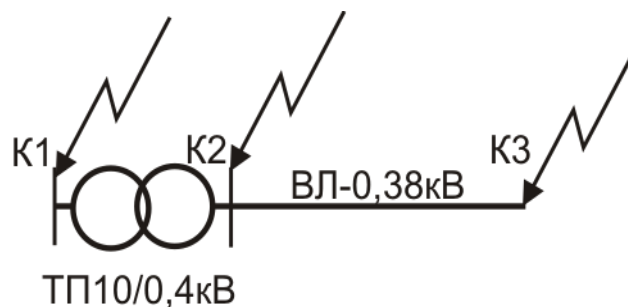


Рисунок 6.1 – Схема сети 10/0,38 кВ

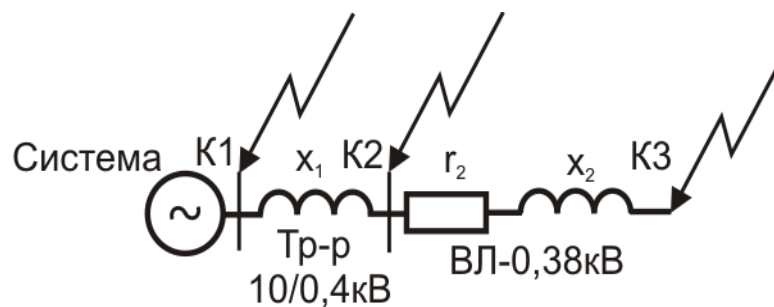


Рисунок 6.2 – Эквивалентная схема сети 10/0,38 кВ

Система

$$Z_{сист} = X_{сист} = \frac{(U_n + 5\%)}{\sqrt{3}I_{к1}^{(3)}}$$

Трансформатор 10/0,4 кВ

$$Z_{\text{тр}} = X_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{к}} \% U_{\text{н}}^2}{100 S_{\text{н}}}$$

где $U_{\text{к}}\%$ – напряжение короткого замыкания трансформатора (табл.5 прил.); $U_{\text{н}}$ – номинальное напряжение трансформатора (принимается равным вторичному напряжению, так как сопротивление трансформатора используется для расчета тока к.з. со стороны 0,4 кВ); $S_{\text{н}}$ – номинальная мощность трансформаторной подстанции.

ВЛ-0,38 кВ

$$r = r_0 l,$$

где r_0 – удельное активное сопротивление провода, (Ом/км); l – длина линии, (км).

$$x = x_0 l,$$

где x_0 – удельное реактивное сопротивление провода.

$$z = \sqrt{r^2 + x^2}.$$

Рассчитываем токи трехфазного короткого замыкания.

Точка К₂

$$I_{\text{к2}}^{(3)} = \frac{U_{\text{н}} + 5\%}{\sqrt{3}(X'_{\text{сист}} + X_{\text{тр}})},$$

где $U_{\text{н}}$ – номинальное напряжение сети; $X'_{\text{сист}}$ – сопротивление системы, приведенное к напряжению 0,4кВ; $X_{\text{тр}}$ – сопротивление трансформатора.

Чтобы привести сопротивление системы $X_{\text{сист}}$ к напряжению 0,4 кВ его надо умножить на квадрат коэффициента трансформации трансформатора 10/0,4кВ

$$k^2 = \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 = \left(\frac{0,4}{10}\right)^2 = 0,0016,$$

где U_1 – первичное напряжение трансформатора; U_2 – вторичное напряжение трансформатора.

Точка К₃

$$I_{\text{к3}}^{(3)} = \frac{(U_{\text{н}} + 5\%)}{\sqrt{3}(X'_{\text{сист}} + X_{\text{тр}} + Z_{\text{вл0,38}})},$$

где $Z_{\text{вл0,38}}$ – полное сопротивление линии 0,38кВ.

Рассчитываем токи двухфазных и однофазных коротких замыканий.

Точка К₂

$$I_{\text{к2}}^{(2)} = 0,87 I_{\text{к2}}^{(3)},$$

Точка К₃

$$I_{\text{к3}}^{(1)} = \frac{(U_{\text{ф}} + 5\%)}{\frac{Z_{\text{т}}^{(1)}}{3} + Z_{\text{п}}},$$

где $U_{\text{ф}}$ – фазное напряжение сети; $Z_{\text{т}}^{(1)}$ – сопротивление трансформатора при однофазном замыкании на корпус; $Z_{\text{п}}$ – сопротивление петли «фаза – нулевой провод» от подстанции до точки к.з.

$$Z_{\text{п}} = (z_{0\text{ф}} + z_{0\text{N}})l$$

где $z_{0\text{ф}}$ – удельное сопротивление фазного провода; $z_{0\text{N}}$ – удельное сопротивление нулевого провода; l – расстояние от т. К₃ до ТП10/0,4 кВ.

Пример расчета токов короткого замыкания

Исходные данные:

Ток трехфазного короткого замыкания в точке К₁ $I_{к1}^{(3)} = 0,7 \text{ кА}$; мощность трансформатора 10/0,4кВ $S_n = 160 \text{ кВА}$; ВЛ-0,38кВ выполнена проводом СИП-4×50 ($r_0 = 0,705 \text{ Ом/км}$; $x_0 = 0,085 \text{ Ом/км}$); длина ВЛ-0,38кВ $l = 0,8 \text{ км}$.

Рассчитываем сопротивление элементов сети

Система

$$Z_{\text{сист}} = X_{\text{сист}} = \frac{(U_n + 5\%)}{\sqrt{3}I_{к1}^{(3)}} = \frac{10,5}{1,73 \times 0,7} = 8,67 \text{ Ом},$$

Трансформатор 10/0,4

$$Z_{\text{тр}} = X_{\text{тр}} = \frac{U_k \% U_n^2}{100 S_n} = \frac{4,5 \times 0,16}{100 \times 160 \times 10^{-3}} = 0,045 \text{ Ом},$$

ВЛ-0,38 кВ

$$r = r_0 l = 0,705 \times 0,8 = 0,56 \text{ Ом},$$

$$x = x_0 l = 0,085 \times 0,8 = 0,068 \text{ Ом},$$

$$Z_{\text{ВЛ0,38}} = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{0,56^2 + 0,068^2} = 0,564 \text{ Ом}.$$

Рассчитываем токи трехфазных коротких замыканий

Точка К₂

Приводим сопротивление системы к напряжению 0,4 кВ

$$X'_{\text{сист}} = X_{\text{сист}} \times K^2 = 8,67 \times 0,0016 = 0,0139 \text{ Ом},$$

$$I_{к2}^{(3)} = \frac{U_n + 5\%}{\sqrt{3}(X'_{\text{сист}} + X_{\text{тр}})} = \frac{0,4}{1,73 \times (0,0139 + 0,045)} = 3,92 \text{ кА},$$

Точка К₃

$$I_{к3}^{(3)} = \frac{(U_n + 5\%)}{\sqrt{3}(X'_{\text{сист}} + X_{\text{тр}} + Z_{\text{ВЛ0,38}})} = \frac{0,4}{1,73 \times (0,0139 + 0,045 + 0,564)} = 0,37 \text{ кА},$$

Рассчитываем токи двухфазных и однофазных коротких замыканий.

Точка К₂

$$I_{к2}^{(2)} = 0,87 I_{к2}^{(3)} = 0,87 \times 3,92 = 3,41 \text{ кА},$$

Точка К₃

Рассчитываем сопротивление петли «фаза – нулевой провод» от подстанции до точки К₃:

$$Z_{\text{п}} = (z_{0\phi} + z_{0N})l = (0,564 + 0,564) \times 0,8 = 0,902 \text{ Ом},$$

$$I_{к3}^{(1)} \frac{(U_{\phi} + 5\%)}{\frac{Z_{\text{т}}^{(1)}}{3} + Z_{\text{п}}} = \frac{230}{\frac{0,487}{3} + 0,902} = 216 \text{ А},$$

7. Выбор аппаратов защиты трансформатора 10/0,4 кВ и ВЛ-0,38 кВ

Рассмотрим наиболее распространенный вариант, когда для защиты силового трансформатора 10/0,4 кВ со стороны 10 кВ установлены плавкие предохранители, а на отходящих линиях 0,38 кВ автоматические выключатели. Выбор аппаратов защиты производим для самой нагруженной линии 0,38кВ одной из трансформаторных подстанций.

7.1 Выбор плавких предохранителей 10 кВ

Номинальное напряжение плавкого предохранителя должно быть равно 10кВ.

$$U_{\text{нп}} = 10 \text{ кВ}. \quad (7.1)$$

По таблице 9 прил. выбираем номинальный ток плавкой вставки по условиям отстройки от бросков намагничивающего тока трансформатора в зависимости от его мощности. По таблице 10 прил. выбираем соответствующую марку предохранителя.

Проверяем по предельному отключаемому току

$$I_{\text{мо}} \geq I_{\text{к1}}^{(3)}, \quad (7.2)$$

где $I_{\text{мо}}$ – максимальное значение отключаемого тока (табл.16 прил.); $I_{\text{к1}}^{(3)}$ – ток трехфазного короткого замыкания в т. К₁.

7.2 Выбор автоматических выключателей

Номинальное напряжение автомата должно быть не менее 380В

$$U_{\text{на}} \geq 380 \text{ В}. \quad (7.3)$$

Номинальный ток теплового расцепителя

$$I_n \geq K_n I_{\text{рн}}, \quad (7.4)$$

где K_n – коэффициент учитывающий характер нагрузки электродвигателей, так как условия работы электродвигателей неизвестны, K_n принимается равным 1,0; $I_{\text{рн}}$ – ток нагрузки, равен току на головном участке линии 0,38кВ ($I_{\text{рн}} = I_{0-1}$).

Проверяем по устойчивости к отключению максимальных токов короткого замыкания в месте установки автомата

$$I_{\text{cs}} \geq I_{\text{к2}}^{(3)}, \quad (7.5)$$

где I_{cs} – номинальная рабочая наибольшая отключающая способность.

По таблице 8 прил. выбираем автомат, имеющий требуемые характеристики.

7.3 Согласование по условиям селективности

Для обеспечения селективности работы аппаратов защиты надо согласовать автоматический выключатель с плавким предохранителем. Необходимо, чтобы при коротком замыкании в начале линии 0,38 кВ первым сработал автоматический выключатель, а затем со ступенью выдержки времени (Δt) не менее 0,3с предохранитель. То есть по условиям селективности время срабатывания предохранителя на стороне 10кВ при коротком замыкании на шинах 0,4кВ должно соответствовать условию

$$t_{\text{пр}} \geq t_{\text{ав}} + \Delta t, \quad (7.6)$$

где $t_{\text{ав}}$ – время срабатывания автоматического выключателя со стороны 0,4кВ (определяется по время-токовым характеристикам); Δt – минимальная ступень селективности (при согласовании плавкого предохранителя с автоматом $\Delta t = 0,3\text{с}$).

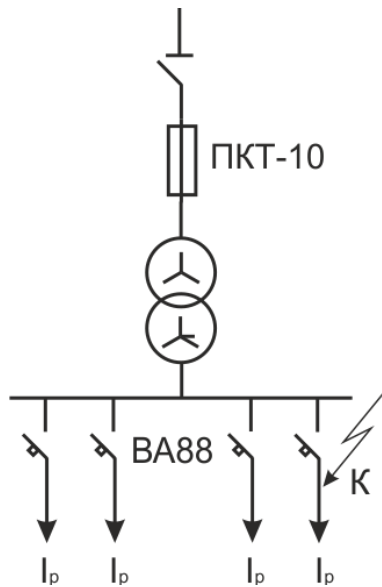


Рисунок 9.1 – Электрическая схема согласования защит

Чтобы определить $t_{ав}$ рассчитываем кратность тока срабатывания автомата

$$I_a = \frac{I_{K2}^{(3)}}{I_n} \quad (7.7)$$

где $I_{K2}^{(3)}$ – ток короткого замыкания в точке K2; I_n – ток теплового расцепителя автомата.

Находим эту точку на характеристике автомата (рис.2 прил.), так как она находится на независимой части характеристики, $t_{ав}=0,02с$. Тогда время срабатывания предохранителя должно быть не менее $0,32с$ ($t_{пр} \geq 0,32с$).

Для определения $t_{пр}$ надо рассчитать ток на шинах 0,4 кВ (т. K3) приведённый к напряжению 10 кВ, то есть определить какой ток будет протекать по шинам 10 кВ при к.з. на шинах 0,4 кВ. Например, ток трехфазного короткого замыкания на шинах 0,4кВ ($I_{к3}^{(3)}$) равен 3,73кА, тогда

$$I'_{к3} = \frac{I_{к3}^{(3)}}{K} = \frac{3730}{25} = 149 А, \quad (7.8)$$

где $K = 10/0,4 = 25$ – коэффициент трансформации трансформатора 10/0,4 кВ.

По время-токовым характеристикам (рис.3 прил.) определяем время срабатывания плавкого предохранителя при токе к.з. равным 149 А.

$$t_{пр} = 0,5с > 0,32с.$$

Условие селективности выполняется при токе короткого замыкания на шинах 0,4кВ равном 3,73кА. Чтобы проверить выполнение этого условия при всех возможных значениях тока, надо построить карту селективности. Порядок построения карты селективности следующий:

Переносим независимую часть характеристики автомата ($t_{ав}=0,02 с$) в координаты «время-ток» (рис. 9.2.).

Переносим в эту же систему координат характеристику предохранителя. Для этого выбираем на ней не менее 3-х точек, для каждой точки определяем ток и время срабатывания предохранителя. Затем приводим токи к напряжению 0,38кВ. Для этого их умножаем на коэффициент

$$k = \frac{U_B}{U_H} = \frac{10}{0,4} = 25. \quad (7.9)$$

По полученным точкам строим характеристику предохранителя, приведенную к напряжению 0,38кВ. Пример приведения токов к напряжению 0,38кВ дан в таблице 9.1. Расстояние между характеристиками на всем их протяжении должно быть не менее ступени селективности Δt . Если это условие соблюдается, защита будет работать селективно.

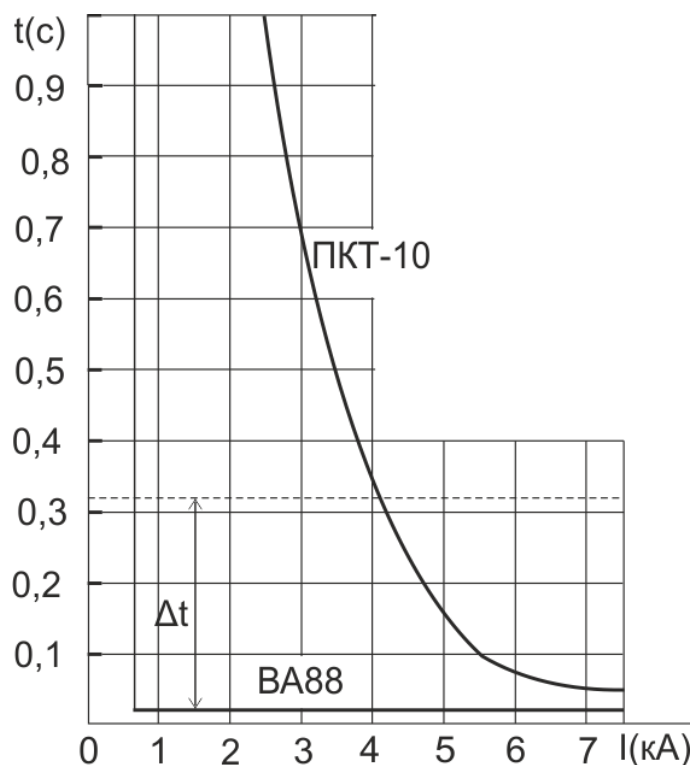


Рисунок 7.2 – Карта селективности

Условие селективности соблюдается при токе короткого замыкания до 4кА.

Таблица 7.1 – Пример приведения токов срабатывания плавкого предохранителя.

Ток КЗ на шинах 0,4кВ (А)	Ток КЗ на шинах 10кВ (А)	Время срабатывания предохранителя $t_{пр}$ (с)
3850	114	1,0
3730	149	0,5
5000	200	0,12
7500	300	0,05

По условию термической стойкости трансформатора к токам короткого замыкания

$$t_{пр} \leq 5 \text{ с.}, \quad (7.10)$$

Так как в данном случае максимальное значение тока срабатывания предохранителя равно 1с, условие обеспечения термической стойкости трансформатора выполняется.

8. Выводы

В выводах необходимо кратко описать методику решения задач сформулированных во введении. Например, нагрузки потребителей определялись по справочным таблицам, однородные нагрузки суммировались при помощи коэффициента одновременности, разнородные табличным методом и т.д. Можно также

отметить сложности, с которыми пришлось столкнуться в ходе курсового проектирования и свои пожелания по его совершенствованию.

9. Библиографический список

1. Правила устройства электроустановок / Минэнерго РФ. 7-е изд. , перераб. и доп. М.: ЗАО «Энергосервис», 2015.

2. РД 34.20.187 (СО 153 – 34.20.187) Методические указания по расчету электрических нагрузок в сетях 0,38-110 кВ сельскохозяйственного назначения.

3. Лещинская Т.Б., Наумов И.В. Электроснабжение сельского хозяйства./ Учебное пособие для студентов высших учебных заведений, М.: Колос, 2008.– 655 с.

4. Техническая информация. Комплектные трансформаторные подстанции киоскового типа мощностью от 25 до 1000 кВА. ООО «Сторге».

ПРИЛОЖЕНИЯ

ФГБОУ ВО Саратовский государственный университет генетики,
биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова

Кафедра «Электрооборудование, энергоснабжение и роботизация»

Курсовая работа по дисциплине «Электроснабжение»

Тема курсовой работы:
«Электроснабжение ... »
(по варианту)

Вариант ____ Схема ____

Курсовую работу выполнил

(подпись)

(фамилия, инициалы)

Курсовую работу принял

(подпись)

(фамилия, инициалы)

(оценка)

(дата)

Саратов, 20_

Таблица 1 – Электрические нагрузки производственных, общественных и коммунально-бытовых потребителей

Наименование объекта	Установленная мощность, кВт	Дневной максимум		Вечерний максимум	
		Р _{дн}	Q _{дн}	Р _в	Q _в
1	2	3	4	5	6
Коровник с электроводонагревателем: на 100 коров на 200 коров	10 18	10 18	- -	10 18	- -
Коровник привязного содержания с механизированной уборкой навоза: на 100 коров на 200 коров	10 16	4 6	4 6	4 6	4 6
Коровник привязного содержания с механизированным доением, уборкой навоза и электроводонагревателем: на 100 коров на 200 коров на 400 коров	20-30 35-60 65	10-18 17-13 45-25	8 13 33	10 17 45	8 13 33
Телятник с родильным отделением: на 120 телят на 230 телят на 340 телят	14 20 26	5 6 7	3 4 5	8 10 12	5 6 8
Свинарник доразбивания на 100 свиней 250 свиней	12 20	5 7	3 4	8 11	4 5
Птичник на 5000 кур	60	48	26	18	9
Инкубаторий	15	12	7	10	5
Комплект машин и оборудования зерноочистительного агрегата ЗАВ-20	30	25	25	26	23
Зернохранилище с передвижными механизмами емкостью: 500 т 1000-2000 т	20 60	10 20	10 18	5 10	3 5
Кормоцех	65	25	20	12	5
Теплица	30	28	11	25	10
Склад рассыпных и гранулированных кормов	30	20	12	1	-
Склад строительных материалов	5	4	1	2	-
Склад минеральных удобрений	16	12	4	1	-
Площадка для транспорта	3	-	-	2	1,5
Склад нефтепродуктов	7	5	4	2	-
Склад готовой продукции	21	18	7	15	7
Лесопильный цех с					

пилорамой:					
ЛРМ-70	35	16	18	2	-
Р-65	45	20	27	2	-
Склад запасных частей	5	3	2	1	-
Машинно-тракторная мастерская:					
на 10-20 тракторов	35	15	12	5	4
30-40	45	20	10	10	8
Гараж:					
на 10 автомашин	45	20	18	10	8
25	65	30	25	15	12
60	115	45	40	20	18
Центральная ремонтная мастерская:					
на 25 тракторов	110	45	40	25	20
Пункт ремонта электрооборудования	43	27	20	18	12
Насосные станции для водоснабжения	4,5	4,5	3,5	4,5	3,5
	5,5	5,5	4	5,5	4
	8	8	6	8	6
	10,5	10,5	7,5	10,5	7,5
	13	13	9	13	9
	15	15	10	15	10
	20,5	20,5	13,5	20,5	13,5
	29	29	20	29	20
Дом культуры (клуб) со зрительным залом:					
на 150-200 мест	30	8	3	14	8
300-400	65	10	6	32	20
400-600	100	10	6	50	30
Начальная школа:					
на 40 учащихся	10	5	-	2	-
80	12	7	-	2	-
160	20	11	-	4	-
Общеобразовательная школа с мастерской:					
на 190 учащихся	55	14	7	20	10
320	80	20	10	40	20
Мастерская при сельской школе	15	7	5	2	-
Административное здание:					
на 15-25 рабочих мест	25	15	10	8	-
25-50	40	25	18	10	-
70	55	35	25	15	-
Сельсовет с отделением связи	10	7	3	3	-
Отделение связи	3	2	1	1	-
Бригадный дом	6	2	-	5	-
Проходная	1	1	-	0,5	-
Медицинский пункт	12	9	3	2	-
Сельская участковая больница					
на 50 коек	150	60	35	50	35
Столовая:					

на 25 мест	10	5	3	2	-
35-50	15	9	4	3	-
75-100	20	12	6	4	-
Столовая с электронагревательным оборудованием:					
на 35 мест	40	25	10	10	4
50	70	35	15	15	5
75	80	35	15	15	5
Столовая с электронагревательным оборудованием и с электроплитой:					
на 35 мест	65	35	15	15	5
50	100	50	20	20	10
75	110	55	25	22	10
100	150	70	35	45	20
Магазин: на 2 рабочих места смешанный ассортимент на 4 места продовольственный промтоварный смешанный ассортимент на 6-10 мест продовольственный промтоварный					
на 2 рабочих места смешанный ассортимент	5	2	-	4	-
на 4 места продовольственный промтоварный	15	10	5	10	5
смешанный ассортимент на 6-10 мест	7	6	-	6	-
продовольственный промтоварный	10	4	-	4	-
смешанный ассортимент на 6-10 мест	20	10	5	10	5
продовольственный промтоварный	10	3	-	3	-
Комбинат бытового обслуживания:					
на 6 рабочих мест	5	3	2	1	-
10	8	5	3	2	-
25	30	15	10	5	-
Баня:					
на 5 мест	3	3	2	3	2
10	10	7	2	7	2
20	16	8	5	8	5
Котельная	40	27	16	10	4
Сельский жилой дом (квартира) с плитой на газе, жидком или твердом топливе	-	2	0,72	5	1,45
Жилой дом с электроплитой	-	3,5	1,15	6	1,5
Жилой дом с электроплитой и электроводонагревателем	-	4,5	1,5	7,5	1,87
Жилой дом с электроплитой и кондиционером	-	4,1	1,75	7	2,5

Таблица 2 – Коэффициенты мощности сельскохозяйственных потребителей и трансформаторных пунктов напряжением 10/0,38 кВ

Потребители, трансформаторные подстанции	Коэффициент мощности $\cos \varphi$ и коэффициент реактивной мощности $\operatorname{tg} \varphi$ в максимум нагрузки			
	дневной		вечерний	
	$\cos \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$	$\cos \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$
Животноводческие и птицеводческие помещения То же, с электрообогревом	0,75	0,88	0,85	0,62
Отопление и вентиляция животноводческих помещений	0,92	0,43	0,96	0,29
Кормоцехи	0,99	0,15	0,99	0,15
Зерноочистительные тока, зернохранилища	0,75	0,88	0,78	0,80
Установки орошения и дренажа почвы	0,70	1,02	0,75	0,88
Парники и теплицы на электрообогреве				
Мастерские, тракторные станы, гаражи	0,80	0,75	0,80	0,75
Мельницы, маслобойки	0,92	0,43	0,96	0,29
Цеха по переработки с/х продукции	0,70	1,02	0,75	0,88
Общественные учреждения и коммунальные предприятия	0,80	0,75	0,85	0,62
Жилые дома без электроплит	0,75	0,88	0,80	0,75
Жилые дома с электроплитами и водонагревателями	0,85	0,62	0,90	0,48
Трансформаторные пункты напряжением 10/0,38 кВ с нагрузкой:	0,90	0,48	0,93	0,40
производственной	0,92	0,43	0,96	0,29
коммунально-бытовой	0,70	1,02	0,75	0,88
смешанной	0,90	0,48	0,92	0,43
	0,80	0,75	0,83	0,67

Таблица 3 – Суммирование нагрузок в сетях напряжения 0,38 кВ

S_m	$S_{доб}$	S_m	$S_{доб}$	S_m	$S_{доб}$	S_m	$S_{доб}$
0,2	+0,2	12	+7,3	50	+34,0	170	+123
0,4	+0,3	14	+8,5	55	+37,5	180	+130
0,6	+0,4	16	+9,8	60	+41,0	190	+140
0,8	+0,5	18	+11,2	65	+44,5	200	+150
1,0	+0,6	20	+12,5	70	+48,0	210	+158
2,0	+1,2	22	+13,8	80	+55,0	220	+166
3,0	+1,8	24	+15,0	90	+62,0	230	+174
4,0	+2,4	26	+16,4	100	+69,0	240	+182
5,0	+3,0	28	+17,7	110	+76	250	+190
6,0	+3,6	30	+19,0	120	+84	260	+198
7,0	+4,2	32	+20,4	130	+92	270	+206
8,0	+4,8	35	+22,8	140	+100	280	+214
9,0	+5,4	40	+26,5	150	+108	290	+222
10	+6,0	45	+30,2	160	+116	300	+230

Таблица 4 – Электрические параметры проводов СИП-4

Число и номинальное сечение жил СИП-4, мм ²	Активное сопротивление проводов при 50 Гц, Ом/км	Индуктивное сопротивление проводов при 50 Гц, Ом/км	Допустимый ток нагрузки, А	Ток термической стойкости, кА
	R_0	X_0		
СИП-4 4×16	1,91	0,091	70	1,0
СИП-4 4×25	1,2	0,089	95	1,6
СИП-4 4×35	0,868	0,087	115	2,3
СИП-4 4×50	0,641	0,085	140	3,2
СИП-4 4×70	0,443	0,085	180	4,5
СИП-4 4×95	0,320	0,082	220	5,2

Таблица 5 – Основные технические данные трехфазных двухобмоточных силовых трансформаторов 10 (6)/0,4 кВ

Номинальная мощность кВА	Потери, кВт			Напряжение короткого замыкания U_k , % U_H	Ток холостого хода I_x , % I_H
	холостого хода		короткого замыкания (в меди)		
	уровень А	уровень В			
25	130	135	0,600	4,5	3,2
			0,690	4,7	
40	175	190	0,880	4,5	3
			1,000	4,7	
63	240	265	1,280	4,5	2,8
			1,470	4,7	
100	330	365	1,970	4,5	2,6
			2,270	4,7	
160	510	565	2,650	4,5	2,4
250	740	820	3,700	4,5	2,3
			4,200	4,7	
400	950	1050	5,500	4,5	2,1
630	1310	1560	7,600	5,5	2,0

Таблица 6 – Расчетные сопротивления трансформаторов 10/0,4 кВ (схема соединения обмоток «звезда-звезда с нулем»)

Номинальная мощность трансформатора (кВА)	Схема соединения обмоток	Сопротивление прямой последовательности (Ом)			Сопротивление трансформатора при однофазном замыкании $Z_T^{(1)}$ (Ом)
		R_{T1}	X_{T1}	Z_{T1}	
25	Y/Y	0,154	0,244	0,288	3,11
40	Y/Y	0,088	0,157	0,180	1,95
63	Y/Y	0,058	0,101	0,114	1,24
100	Y/Y	0,032	0,071	0,072	0,779
160	Y/Y	0,017	0,042	0,045	0,487
250	Y/Y	0,0095	0,0268	0,0288	0,312
400	Y/Y	0,0055	0,0171	0,018	0,195
630	Y/Y	0,00307	0,0137	0,014	0,129

Таблица 7 – Значение угла φ , $\sin \varphi$ и $\operatorname{tg} \varphi$ для данного $\cos \varphi$

cos φ	φ	sin φ	tgφ	cos φ	φ	sin φ	tgφ
1	0	0	0	0,72	43°57'	0,6937	0,9635
0,99	8°06'	0,1412	0,1412	0,71	44°46'	0,7042	0,9918
0,98	11°29'	0,1990	0,2031	0,70	45°34'	0,7140	1,020
0,97	14°04'	0,2430	0,2505	0,69	46°22'	0,7238	1,049
0,96	16°16'	0,2800	0,2917	0,68	47°09'	0,7330	1,078
0,95	18°12'	0,3123	0,3287	0,67	47°56'	0,7424	1,108
0,94	19°57'	0,3412	0,3630	0,66	48°42'	0,7511	1,138
0,93	21°34'	0,3676	0,3953	0,65	49°27'	0,7592	1,169
0,92	23°04'	0,3919	0,4260	0,64	50°12'	0,7686	1,201
0,91	24°30'	0,4146	0,4556	0,63	50°57'	0,7768	1,233
0,90	25°51'	0,4360	0,4844	0,62	51°41'	0,7845	1,265
0,89	27°08'	0,4560	0,5124	0,61	52°25'	0,7924	1,299
0,88	28°21'	0,4750	0,5398	0,60	53°08'	0,8000	1,334
0,87	29°32'	0,4931	0,5668	0,59	53°51'	0,8071	1,368
0,86	30°41'	0,5103	0,5934	0,58	54°33'	0,8145	1,403
0,85	31°47'	0,5267	0,6197	0,57	55°15'	0,8214	1,441
0,84	32°52'	0,5426	0,6459	0,56	55°57'	0,8282	1,482
0,83	33°54'	0,5578	0,6520	0,55	56°38'	0,8350	1,520
0,82	34°55'	0,5724	0,6980	0,54	57°19'	0,8419	1,559
0,81	35°54'	0,5864	0,7240	0,53	58°00'	0,8480	1,600
0,80	36°52'	0,6000	0,7500	0,52	58°40'	0,8544	1,643
0,79	37°11'	0,6131	0,7761	0,51	59°20'	0,8599	1,686
0,78	38°44'	0,6257	0,8023	0,50	60°00'	0,8660	1,732
0,77	39°39'	0,6380	0,8286	0,45	63°15'	0,8930	1,984
0,76	40°32'	0,6499	0,8551	0,40	66°25'	0,9164	2,290
0,75	41°25'	0,6614	0,8819	0,35	69°31'	0,9366	2,674
0,74	42°16'	0,6726	0,9089	0,30	72°32'	0,9539	3,180
0,73	43°07'	0,6834	0,9362	0,25	75°31'	0,9680	3,867

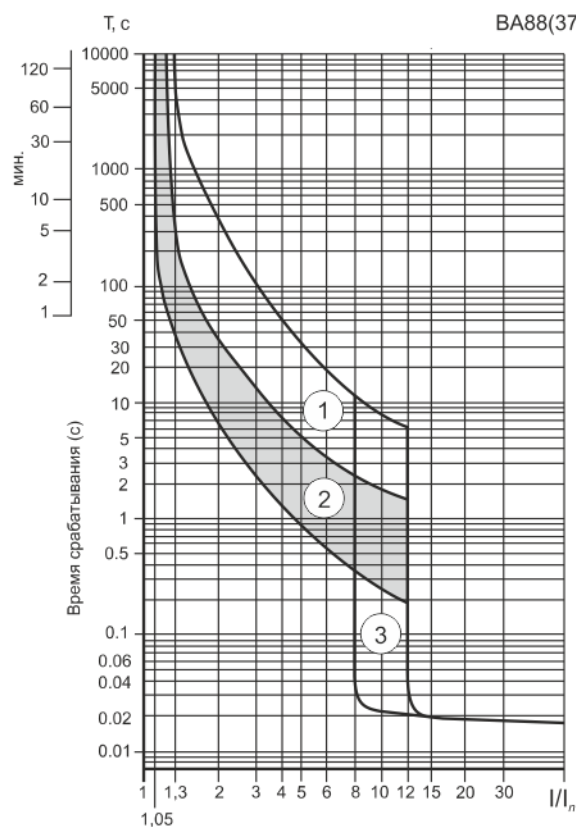
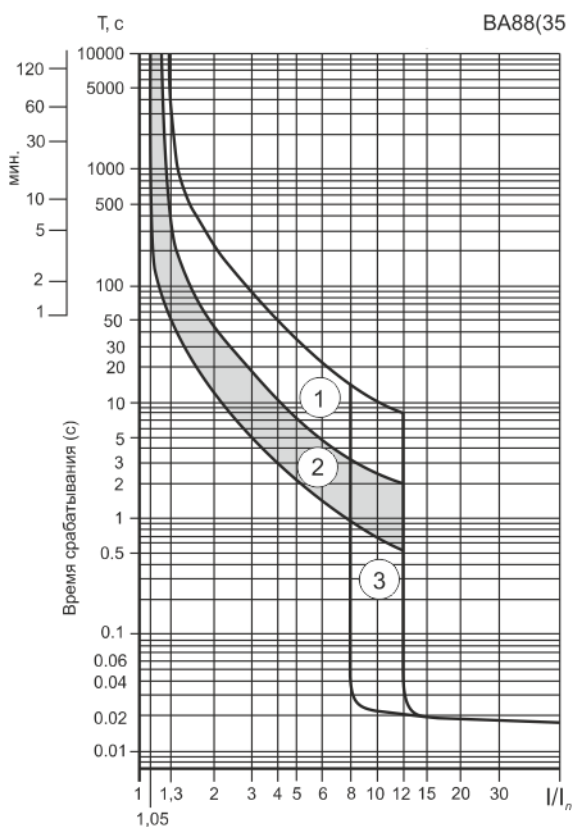
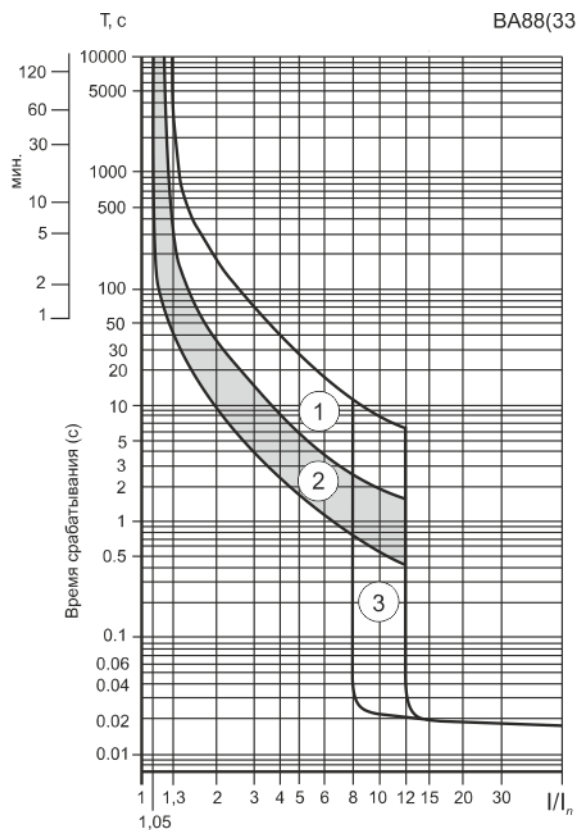
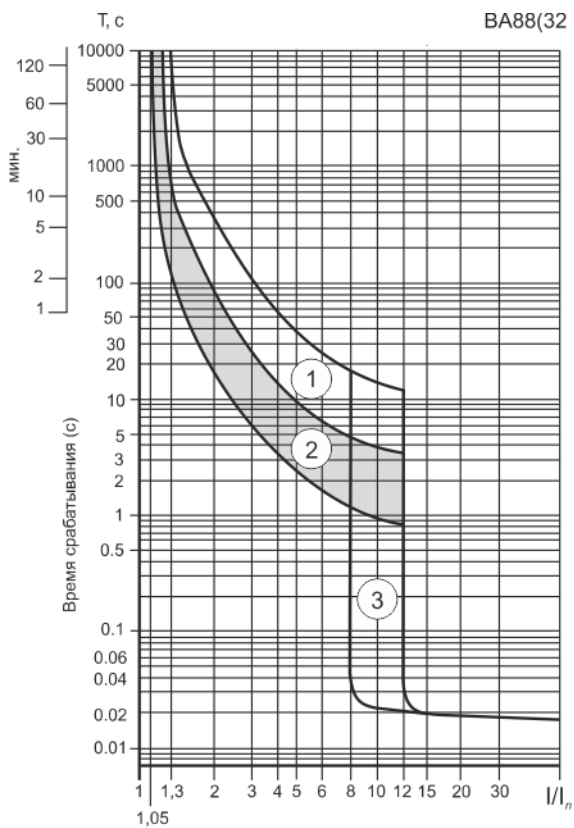


Рисунок 1п – Время-токовые характеристики срабатывания выключателя ВА88 с тепловым и электромагнитным расцепителем

Таблица 9 – Номинальные токи плавких вставок предохранителей рекомендуемые для защиты трансформаторов 10/0,4 кВ

Номинальная мощность трансформатора, кВА	Первичное напряжение трансформатора, кВ					
	6		10		20	
	Номинальный ток трансформатора, А	Номинальный ток плавкой вставки, А	Номинальный ток трансформатора, А	Номинальный ток плавкой вставки, А	Номинальный ток трансформатора, А	Номинальный ток плавкой вставки, А
25	2,4	8	1,45	5	-	-
40	3,85	10	2,31	8	-	-
63	6,06	6	3,64	10	1,82	3
100	9,62	20	5,77	16	2,89	5
160	15,4	32	9,25	20	4,63	7,5
250	24,0	50	14,5	32	7,25	10
400	38,6	80	23,1	50	11,55	20
630	60,6	160	36,4	80	18,2	30

Таблица 10 – Технические данные предохранителей напряжением 10 кВ

Тип предохранителя	Номинальный ток предохранителя (А)	Номинальный ток плавкой вставки (А)	Максимальный ток отключения (кА)
ПКТ-10/30	30	2; 3; 5; 7,5; 10; 15; 20; 30	12,0
ПКТ-10/50	50	40; 50	12,0
ПКТ-10/100	100	75; 100	12,0
ПКТ-10/200	200	150; 200	12,0
ПКТ-10Н/30	30	2; 3; 5; 7,5; 10; 15; 20; 30	12,0

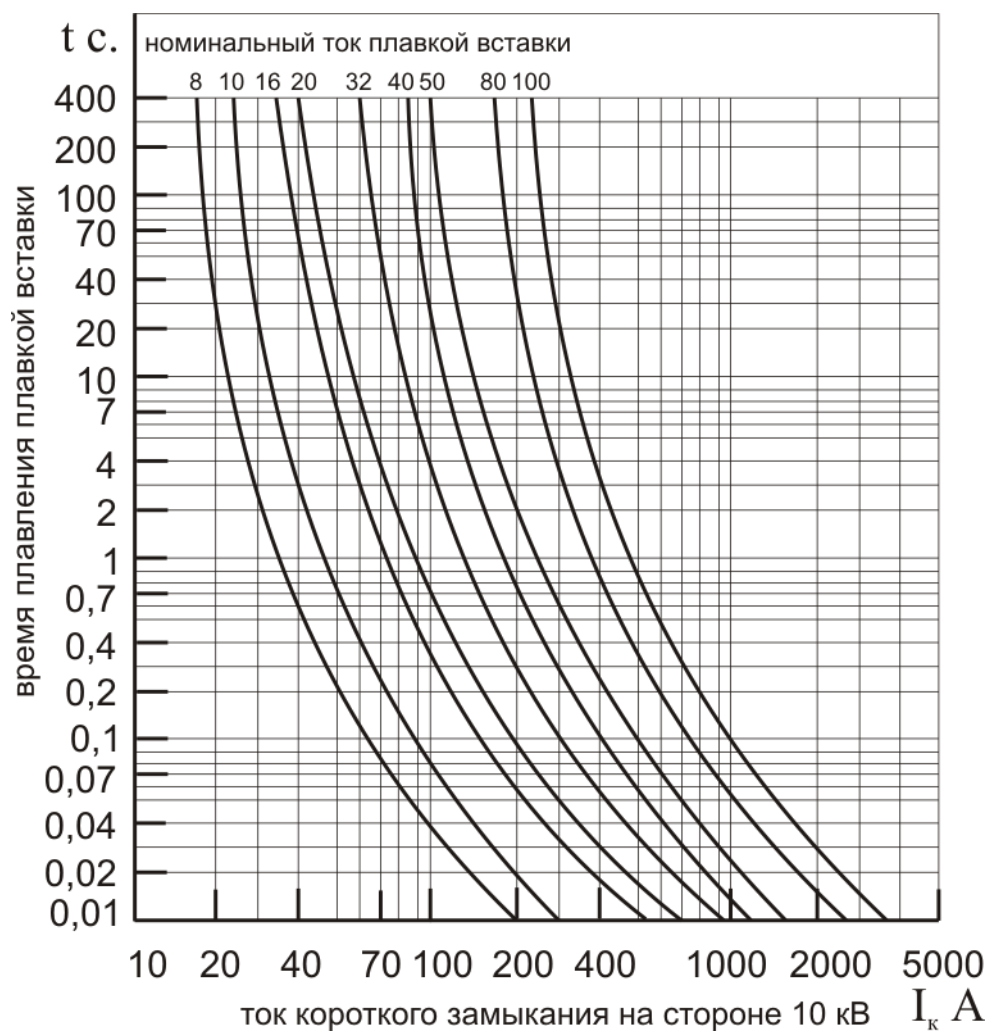


Рисунок 2п. – Время-токовые характеристики предохранителей ПКТ-10