

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

Институт химии и энергетики
(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»
(наименование)

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
(код и наименование направления подготовки, специальности)
Электроснабжение
(направленность (профиль)/специализация)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Электроснабжение механического производства ЗАО
«Механоремонтный комплекс»

Студент

Д.А. Белоусов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент Ю.В. Черненко

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2020

Аннотация

Объектом исследования является система электроснабжения механического производства.

Цель проекта – расчет проекта реконструкции системы электроснабжения механического производства с учетом современных требований электробезопасности и энергоэффективности.

Систематизированы характеристики электроприемников, выявлены недостатки действующей системы электроснабжения и предложены способы их устранения.

Выполнен расчет силовых и осветительных нагрузок, выбраны силовые трансформаторы, установки компенсации реактивной мощности, а также другое оборудование цеховой ТП. Рассчитаны питающая линия 10 кВ, силовая распределительная сеть 0,4 кВ и система освещения, выбраны кабели и автоматические выключатели.

Для выбора и проверки коммутационного и защитного оборудования произведен расчет токов короткого замыкания. Релейная защита и автоматика выполнена на основе микропроцессорного терминала «БМРЗ-101-Д-КЛ-01».

Рассчитаны контур заземления и система молниезащиты.

Замена устаревшего и изношенного оборудования действующей системы электроснабжения механического производства приведет к экономии электроэнергии и снижению аварийности.

Данная работа состоит из 62 страниц, содержит 12 рисунков, 24 таблицы, 22 источника литературы.

Содержание

	Введение	4
1	Описание объекта, обоснование необходимости реконструкции	5
1.1	Описание объекта проектирования	5
1.2	Обоснование необходимости реконструкции	9
2	Расчет силовых и осветительных нагрузок	11
2.1	Расчёт силовых нагрузок по электроприемникам	11
2.2	Определение расчетной мощности освещения	14
3	Выбор числа и мощности силовых трансформаторов	17
4	Выбор распределительных пунктов	19
5	Выбор элементов системы электроснабжения	20
5.1	Расчет питающей линии 10 кВ	20
5.2	Расчет распределительной сети 0,4 кВ	21
6	Расчет токов короткого замыкания	29
7	Выбор и проверка автоматических выключателей	39
8	Выбор и проверка высоковольтного оборудования	44
8.1	Выбор и проверка высоковольтных выключателей и разъединителей	44
8.2	Выбор и проверка шин РУВН 10 кВ цеховой ТП	46
8.3	Выбор трансформаторов тока	47
8.4	Выбор трансформаторов напряжения	48
8.5	Выбор ограничителей перенапряжения	49
9.	Заземление и молниезащита	52
9.1	Расчет контура заземления	52
9.2	Расчет системы молниезащиты	55
	Заключение	57
	Список используемых источников	58
	Приложение А Расчет токов короткого замыкания в точке КЗ	60

Введение

Производственный процесс любого современного промышленного предприятия осуществляется, как правило, оборудованием, расположенным в нескольких производственных цехах, системы электроснабжения которых играют ключевую роль в обеспечении работы производственного электрооборудования.

Актуальность темы ВКР заключается в том, что электроустановки современных производственных цехов должны отвечать современным требованиям. Действующие системы электроснабжения производственных цехов, по мере износа и технологического устаревания электрооборудования, должны быть реконструированы с применением нового, современного электрооборудования. В данной работе наглядно показан расчет проекта реконструкции электроснабжения механического производства.

Объектом исследования является система электроснабжения механического производства.

Цель работы заключается в расчете проекта реконструкции системы электроснабжения механического производства с учетом современных требований электробезопасности и энергоэффективности.

Практическая значимость работы заключается в том, что согласно данному проекту возможно провести реальную реконструкцию системы электроснабжения механического производства ЗАО «Механоремонтный комплекс».

Теоретическая и методологическая основа работы заключается в анализе современной литературы и методик проектирования и расчета систем электроснабжения цехов промышленных предприятий. Расчеты и иллюстрации производятся с применением компьютерных программ Word 2007, Excel 2007, AutoCAD 2019.

1 Описание объекта, обоснование необходимости реконструкции

1.1 Описание объекта проектирования

Основной тип электроприемников механического производства ЗАО «Механоремонтный комплекс» – это асинхронные электродвигатели и инверторы сварочных преобразователей. Отличительная особенность асинхронных электродвигателей – значительные пусковые токи и потребление реактивной мощности. Отличительная особенность сварочных преобразователей – повторно-кратковременный режим (ПКР) и повышенные рабочие токи в момент замыкания цепи электросварки.

Оборудование механического производства сгруппировано по производственным линиям: комплексы автоматизированной сварки (КАС), расточные станки, линия нанесения порошкового покрытия (ЛНПП). Также имеются компрессоры для покраски и пескоструйной очистки деталей, кран-балки, сварочные полуавтоматы.

Имеются вспомогательные помещения: водоподготовка, лаборатория, офисы.

Электроприемники механического производства относятся ко 2 категории надежности электроснабжения.

В действующей системе освещения используются светильники с лампами ДРЛ для основного освещения и лампами накаливания для аварийного освещения. Проектом реконструкции предусматривается использование светодиодных светильников в системе освещения.

Цех получает питание от шин ЗРУ 10 кВ ГПП предприятия ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», по кабельной линии 10 кВ длиной 0,805 км [19]. Цеховая ТП – двухтрансформаторная ТП 10/0,4 кВ с устройствами компенсации реактивной мощности.

Электроприемники механического производства и их характеристики представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Электроприемники механического производства

Номер на плане	Наименование электроприемника	$P_{уст.}$ кВт	$K_{и}$	$\cos\varphi$
1, 3-5, 7-10, 12-20	Комплекс автоматизированной сварки(КАС)	30	0,2	0,3
2	Комплекс автоматизированной сварки(КАС)	25	0,2	0,3
6,11	Комплекс автоматизированной сварки(КАС)	60	0,2	0,3
21,22	Расточный станок	55	0,17	0,65
23	Расточный станок	35	0,17	0,65
24-26	Расточный станок	45	0,17	0,65
27	Расточный станок	40	0,17	0,65
28,29,30	Компрессор	45	0,65	0,8
31	Водоподготовка	15	0,7	0,8
32	Лаборатория	7	0,3	0,8
33	Офис №1	5	0,4	0,7
34	Офис №2	5	0,4	0,7
35	Кран-балка, 5 тонн	20	0,15	0,5
36	Кран-балка, 16 тонн	50	0,15	0,5
37-39	Сварочные полуавтоматы	20	0,4	0,5
40	Линия нанесения порошкового покрытия(ЛНПП)	250	0,17	0,65

План механического производства и расположение оборудования показаны на рисунке 1.1. Действующая схема силовой сети цеха показана на рисунке 1.2.

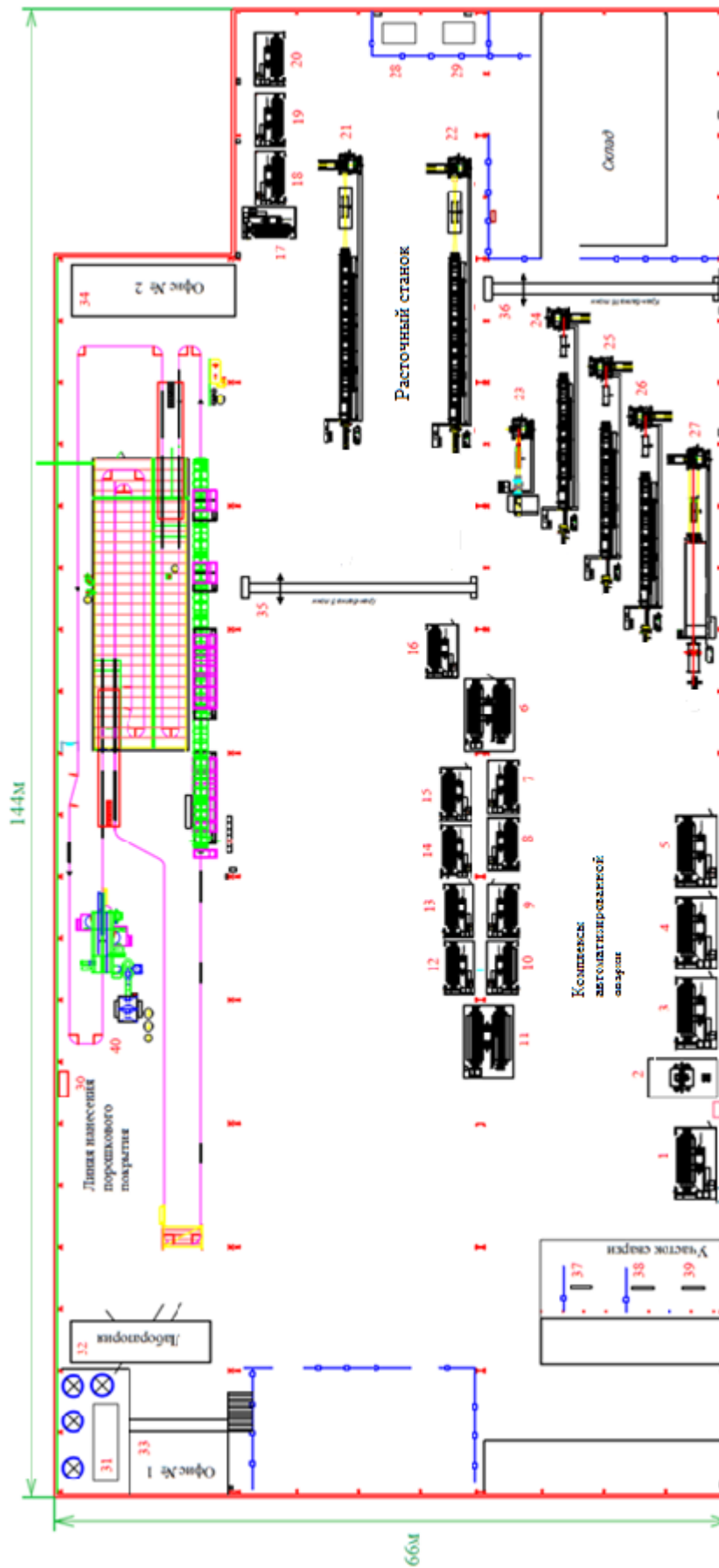


Рисунок 1.1– План механического производства

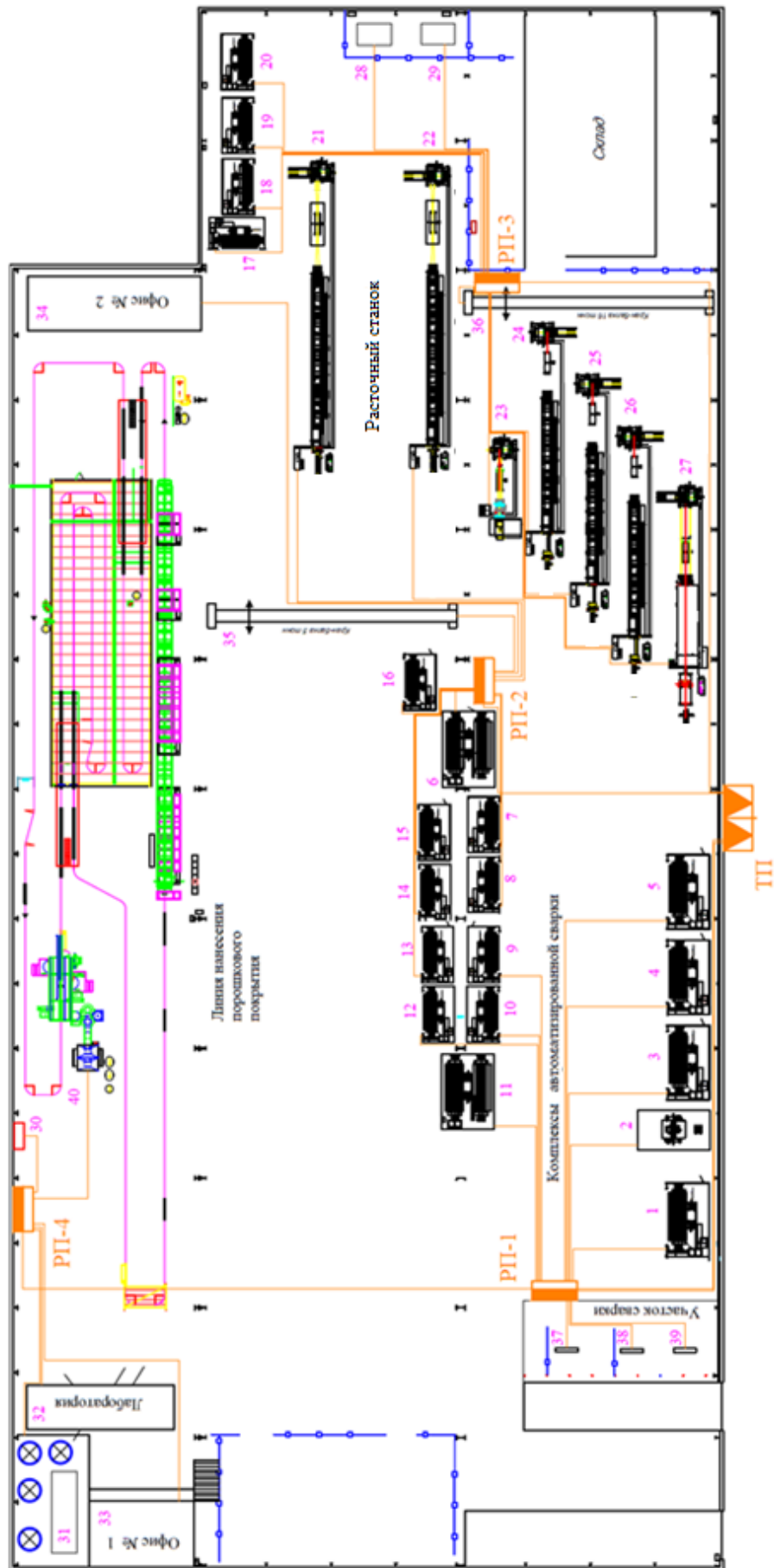


Рисунок 1.2– Действующая схема силовой сети цеха

1.2 Обоснование необходимости реконструкции

Приведем подробное обоснование необходимости реконструкции действующей системы электроснабжения механического производства.

При анализе действующей системы электроснабжения механического производства были выявлены следующие недостатки:

1) Высокая степень износа и малый остаточный ресурс электрооборудования предполагает высокую степень аварийности и травматизма, а также связанные с этим экономические убытки. Кроме того, значительная часть электрооборудования технологически устарела. Необходимо выбрать новое, современное электрооборудование;

2) Кабельные линии распределительной сети имеют высокую степень износа. Кроме того, сечение многих кабельных линий не является экономически эффективным. Используются устаревшие марки кабелей АВВГ для силовой сети и ВВГ для осветительной сети. Необходимо выбрать новые кабели в соответствии с современными требованиями пожаробезопасности (негорючие, с низким дымовыделением);

3) Питающая цеховую ТП кабельная линия 10 кВ также имеет высокую степень износа и выполнена кабелем ААБл с устаревшим типом изоляции БПИ (бумажная пропитанная изоляция). Требуется выбрать новый современный кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ);

4) В системе освещения цеха используются устаревшие светильники с лампами ДРЛ. В настоящее время ДРЛ, как источники света, имеют низкую энергоэффективность и подлежат частой замене. Светильники действующей системы освещения подлежат замене на светодиодные, в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54993-2012 по энергоэффективности;

5) Сопротивление контура заземления цеховой ТП составляет 4,308 Ом и превышает допустимые, согласно Правилам устройства электроустановок (ПУЭ) 4 Ом. Кроме того, в распределительной сети цеха используется устаревшая система нейтрали TN-C. Требуется рассчитать новый контур

заземления в соответствии с требованиями ПУЭ. Необходимо принять современную систему нейтрали TN-C-S;

6) Используются установки компенсации реактивной мощности УКРМ с фиксированной мощностью, что не позволяет точно осуществлять компенсацию в автоматическом режиме. Необходимо установить автоматические установки АУКРМ для точной компенсации реактивной мощности при изменении нагрузок цеховой ТП;

7) Оборудование релейной защиты и автоматики выполнено на основе устаревших электромеханических реле. Необходимо выбрать современный микропроцессорный терминал РЗА и выбрать уставки релейной защиты;

Таким образом, в ВКР требуется провести расчет проекта реконструкции системы электроснабжения механического производства, позволяющий избавиться от вышеперечисленных недостатков.

2 Расчет силовых и осветительных нагрузок

2.1 Расчёт силовых нагрузок по электроприемникам

Определение расчетных нагрузок по электроприемникам производится методом коэффициента использования (K_u) и расчетной мощности (K_p) [17].

Среднесменная активная мощность определяется по выражению:

$$P_c = K_u \cdot P_n, \text{ кВт}, \quad (2.1)$$

где K_u – коэффициент использования активной мощности [19];

P_n – номинальная активная мощность электроприемника, кВт.

Среднесменная реактивная мощность определяется по выражению:

$$Q_c = P_c \cdot \operatorname{tg}\varphi, \text{ квар}. \quad (2.2)$$

Среднесменная полная мощность определяется по выражению:

$$S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2}, \text{ кВА}. \quad (2.3)$$

Расчетная активная мощность определяется по выражению:

$$P_p = P_c \cdot K_p, \text{ кВт}, \quad (2.4)$$

где K_p – коэффициент расчетной нагрузки, по справочным данным [17].

Расчетная реактивная мощность определяется по выражению:

$$\text{при } n_s \leq 10: Q_p = 1,1 \cdot Q_c, \text{ квар}, \quad (2.5)$$

где n_s – эффективное число приемников, шт.

$$\text{при } n_s > 10: Q_p = Q_c, \text{ квар}; \quad (2.6)$$

$$n_s = \frac{(\sum P_n)^2}{\sum P_n^2}, \text{ шт}. \quad (2.7)$$

В качестве примера рассчитаем среднесменную мощность КАС №1, повторно-кратковременный режим работы (ПКР). Приведем паспортную мощность КАС №1 к длительному режиму работы:

$$P_n = P_{пн} \cdot \sqrt{\text{ПВ}}, \text{ кВт}, \quad (2.8)$$

где $P_{пн}$ – паспортная мощность электроприемника, кВт;

ПВ – продолжительность включения,

$$P_n = 30 \cdot \sqrt{0,6} = 23,25 \text{ кВт.}$$

Среднесменную активную мощность определим по выражению (2.1):

$$P_c = 23,25 \cdot 0,2 = 4,65 \text{ кВт.}$$

Среднесменную реактивную мощность определим по выражению (2.2):

$$Q_c = 4,65 \cdot 3,18 = 14,786 \text{ квар.}$$

Полная мощность за наиболее загруженную смену по выражению (2.3):

$$S_c = \sqrt{4,65^2 + 14,786^2} = 15,5 \text{ кВА.}$$

В данном случае для РП-1, групповой коэффициент использования электроприемников:

$$K_n = \frac{\sum P_c}{\sum P_n}; \quad (2.9)$$

$$K_n = \frac{60,893}{266,5} = 0,228.$$

Для значений $n_3 = 10$ и $K_n = 0,228$ коэффициент расчетной мощности равен $K_p = 1,79$ [17]. Расчетная активная мощность РП-1, по выражению (2.4):

$$P_p = 60,893 \cdot 1,79 = 108,998 \text{ кВт.}$$

Расчетная реактивная мощность РП-1, по выражению (2.5):

$$Q_p = 1,1 \cdot 171,668 = 188,835 \text{ квар.}$$

Расчетная полная мощность РП-1, по выражению (2.3):

$$S_c = \sqrt{108,998^2 + 188,835^2} = 218,035 \text{ кВА.}$$

Для остальных электроприемников и РП расчет силовых нагрузок аналогичен и сведен в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Расчет силовых нагрузок электроприемников и РП

№ п/п	Наименование ЭП	Rном, кВт	Сменная			n ₃	Kp	Максимальная		
			Pс,кВА	Qс,квар	Sc,кВА			Pp, кВт	Qp, квар	Sp, кВА
РП-1	РП-1									
1	КАС	23,25	4,650	14,786	15,500					
2	КАС	19,375	3,875	12,322	12,917					
3	КАС	23,25	4,650	14,786	15,500					
4	КАС	23,25	4,650	14,786	15,500					
5	КАС	23,25	4,650	14,786	15,500					
9	КАС	23,25	4,650	14,786	15,500					
10	КАС	23,25	4,650	14,786	15,500					
11	КАС	46,5	9,300	29,572	31,000					
12	КАС	23,25	4,650	14,786	15,500					
37	Сварочный полуавтомат	12,64	5,056	8,757	10,112					
38	Сварочный полуавтомат	12,64	5,056	8,757	10,112					
39	Сварочный полуавтомат	12,64	5,056	8,757	10,112					
ΣРП- 1	Итого по РП1	266,55	60,893	171,668	182,753	10	1,79	108,998	188,835	218,035
РП-2	РП-2									
6	КАС	46,5	9,300	29,572	31,000					
7	КАС	23,25	4,650	14,786	15,500					
8	КАС	23,25	4,650	14,786	15,500					
13	КАС	23,25	4,650	14,786	15,500					
14	КАС	23,25	4,650	14,786	15,500					
15	КАС	23,25	4,650	14,786	15,500					
16	КАС	23,25	4,650	14,786	15,500					
21	Расточный станок	55	9,350	10,931	14,385					
22	Расточный станок	55	9,350	10,931	14,385					
34	Офис №2	5	2,000	2,040	2,857					
35	Кран-балка, 5 тонн	10	1,500	2,598	3,000					
ΣРП- 2	Итого по РП2	311	59,400	144,790	158,626	8	2,01	119,394	159,269	199,051
РП-3	РП-3									
17	КАС	23,25	4,650	14,786	15,500					
18	КАС	23,25	4,650	14,786	15,500					
19	КАС	23,25	4,650	14,786	15,500					
20	КАС	23,25	4,650	14,786	15,500					
23	Расточный станок	35	5,950	6,956	9,154					
24	Расточный станок	45	7,650	8,944	11,769					
25	Расточный станок	45	7,650	8,944	11,769					
26	Расточный станок	45	7,650	8,944	11,769					
27	Расточный станок	40	6,800	7,950	10,462					
28	Компрессор	45	29,250	21,938	36,563					
29	Компрессор	45	29,250	21,938	36,563					
36	Кран-балка, 16 тонн	25	3,750	6,495	7,500					
ΣРП- 3	Итого по РП3	418	116,550	151,252	197,548	11	1,64	191,142	166,378	253,410

Продолжение таблицы 2.1

РП-4	РП-4									
30	Компрессор	45	29,250	21,938	36,563					
31	Водоподготовка	15	10,500	7,875	13,125					
32	Лаборатория	7	2,100	1,575	2,625					
33	Офис №1	5	2,000	2,040	2,857					
40	ЛНПП	250	42,500	49,688	65,385					
Σ РП-4	Итого по РП4	322	86,350	83,116	120,554	2	2,31	199,469	83,116	216,092
Σ	Итого	1317,5						619,003	597,597	886,589

2.2 Определение расчетной мощности освещения

Для определения нормативной освещенности для каждого помещения используем СНиП 23-05-2010. Результаты выбора сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Выбор нормативной освещенности помещений

Наименование помещения	Енор, лк
Водоподготовка	200
Офис №1	200
Офис №2	200
Лаборатория	200
Участок сварки	200
Склад	100
Основной участок	200

Условия электробезопасности и окружающей среды помещений приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3- Условия электробезопасности и окружающей среды помещений

Наименование помещения	Электробезопасность	Среда
Водоподготовка	Особо опасное	Влажная
Офис №1	Без повыш. опасности	Нормальная
Офис №2	Без повыш. опасности	Нормальная
Лаборатория	Повыш. опасность	Нормальная
Участок сварки	Особо опасное	Пожароопасная
Склад	Без повыш. опасности	Нормальная
Основной участок	Повыш. опасность	Пожароопасная

Произведем выбор типа и количества светильников для помещения водоподготовки. Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)}, \quad (2.10)$$

где A – длина, м;

B – ширина, м;

h – высота, м.

$$i = \frac{12,1 \cdot 6,6}{9 \cdot (12,1 + 6,6)} = 0,477.$$

Необходимый суммарный световой поток определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{K_{и}}, \text{ лм}, \quad (2.11)$$

где E – нормируемая освещенность, лм;

S – площадь помещения, м²;

K_3 – коэффициент запаса;

Z – коэффициент минимальной освещенности, принимается равным 1,1 для светодиодных ламп [14];

$K_{и}$ – коэффициент использования светового потока, зависит от индекса помещения [14].

$$\Phi = \frac{200 \cdot 80,7 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{0,36} = 73652,3 \text{ лм}.$$

Требуемое количество светильников:

$$N = \frac{\Phi}{\Phi_c}, \text{ шт}, \quad (2.12)$$

где Φ_c – световой поток одного светильника, лм.

Освещение выполняем светильниками NT-PROM 100 Л со световым потоком $\Phi_c=15100$ лм [12]. Необходимое число светильников:

$$N = \frac{73652,3}{15100} \approx 5 \text{ шт}.$$

Итого на водоподготовке принимаем к установке 5 светильников.

На основном участке используем световые модули 4*NT-PROM 100 Л с четырьмя светильниками в количестве 46 штук. Расчет освещения сводим в таблицу 2.4.

Таблица 2.4- Расчет освещения участков цеха

Наименование помещения	F, м ²	Kи	Инд. пом.	Длина,м	Ширина,м	Высота,м	Ф, лм	N	С ед.св, лм
Водоподготовка	80,7	0,361	0,477	12,1	6,6	9	73652,3	5	15100
Офис №1	58,5	0,314	0,414	9,6	6,1	9	61574,1	4	15100
Офис №2	80,6	0,322	0,425	16,1	5,0	9	82651,5	6	15100
Лаборатория	55,6	0,264	0,349	13,6	4,1	9	69396,6	5	15100
Участок сварки	135,1	0,447	0,590	17,9	7,5	9	99808,6	7	15100
Склад	269,6	0,66	0,872	22,3	12,1	9	67366,3	5	15100
Основной участок	8412,5	0,95	5,029	144	66	9	2922234,5	46	60400

В аварийном освещении также применяем светильники типа NT-PROM 100 Л, при этом каждое помещение и проход освещаются отдельными светильниками.

Итого расчетные мощности с учетом мощности освещения:

$$P_{po} = 78 \cdot 0,100 + 619,003 = 626,803 \text{ кВт};$$

$$Q_{po} = 78 \cdot 0,100 \cdot 0,88 + 597,597 = 604,461 \text{ квар};$$

$$S_{po} = \sqrt{626,803^2 + 604,461^2} = 870,778 \text{ кВА}.$$

Далее приступаем к выбору числа и мощности силовых трансформаторов.

3 Выбор числа и мощности силовых трансформаторов

Электроприемники цеха относятся ко 2 категории надежности электроснабжения. По требованиям ПУЭ электроприемники 2 категории должны иметь два независимых источника питания. Следовательно, принимаем к установке на цеховой КТПН два трансформатора.

Требуемая номинальная мощность силовых трансформаторов определяется по формуле:

$$S_T \geq K_{з.н.} \cdot S_{р.к.}, \text{ кВА}, \quad (3.1)$$

где $K_{з.н.}$ – нормативный коэффициент загрузки силовых трансформаторов для двухтрансформаторной подстанции согласно ГОСТ 14209-85.

$S_{р.к.}$ – расчетная мощность цеха с учетом компенсации реактивной мощности, кВА.

Компенсацию реактивной мощности производим до нормативного значения $\cos \varphi = 0,92 \dots 0,95$.

Требуемая мощность компенсирующих устройств рассчитывается по формуле:

$$Q_{к.у.} = \alpha \cdot P_p \cdot (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_k), \text{ квар}, \quad (3.2)$$

где α – коэффициент учитывающий повышение $\cos \varphi$ естественным способом, принимается $\alpha = 0,9$.

P_p – активная расчетная мощность нагрузки, кВт;

$\operatorname{tg} \varphi$ – тангенс угла φ до компенсации;

$\operatorname{tg} \varphi_k$ – нормативный тангенс угла φ после компенсации, принимается равным 0,33.

$$Q_{к.у.} = 0,9 \cdot 626,803 \cdot (0,964 - 0,33) = 357,85 \text{ квар}.$$

Устанавливаем две конденсаторные установки АУКРМ-Е-0,4-180 по одной на секцию шин 0,4 РУНН цеховой ТП. Определим приближенные потери мощности в трансформаторах:

$$\Delta P_T = 0,02 \cdot S_{po}, \text{ кВт}; \quad (3.3)$$

$$\Delta P_T = 0,02 \cdot 672,788 = 13,456 \text{ кВт};$$

$$\Delta Q_T = 0,1 \cdot S_{po}, \text{ квар}; \quad (3.4)$$

$$\Delta Q_T = 0,1 \cdot 672,788 = 67,279 \text{ квар}.$$

Далее определяются расчетные мощности цеховой ТП с учетом компенсации и потерь в силовых трансформаторах. Результаты расчетов представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1- Расчет компенсации реактивной мощности

Показатели	cosφ	tgφ	Pp, кВт	Qp, квар	Sp, кВА
Всего на НН без КУ	0,720	0,964	626,803	604,461	870,778
КУ, квар				360,000	
Всего на НН с КУ	0,932	0,390	626,803	244,461	672,788
Потери			13,456	67,279	
Всего на ВН с КУ			640,259	311,740	712,119

Требуемая мощность трансформаторов с учетом компенсации реактивной мощности, по (3.1):

$$S_T \geq 0,7 \cdot 672,788 = 470,95 \text{ кВА}.$$

Принимаем к установке два трансформатора ТМГ12-630, проверяем их по загрузке в аварийном режиме.

Коэффициент аварийной загрузки равен:

$$K_{з.ав.} = \frac{S_{p.к.}}{S_T}, \quad (3.5)$$

где S_T – номинальная мощность силового трансформатора, кВА.

$$K_{з.ав.} = \frac{672,788}{630} = 1,07.$$

Аварийная перегрузка составляет 7 % и не превышает допустимые согласно ПУЭ, 40 %. Расчетная мощность цеховой ТП с учетом потерь в трансформаторах и компенсации реактивной мощности:

$$S'_{po} = \sqrt{640,259^2 + 311,74^2} = 712,119 \text{ кВА}.$$

4 Выбор распределительных пунктов

В качестве РП принимаем специальные низковольтные распределительные устройства (РП) которые обеспечивают возможность электроснабжения всего перечня электроприемников, в том числе до переносного светильника напряжением 36 В.

Сравним три варианта исполнения распределительных пунктов (таблица 4.1).

Таблица 4.1 - Сравнительные характеристики распределительных пунктов

Параметр/марка РП	РП-11	РП-1	ШНРУ-0,4
Допустимый ток, А	630	630	630
Степень защиты	IP54	IP41	IP41
Размеры, мм	1200x650x200	1410x710x250	1550x750x250
Масса, кг	25,6	37,1	44,5

Выбираем распределительные пункты марки РП-11 ввиду лучших массогабаритных показателей и более высокой степени защиты.

Конструкция РП обеспечивает замену любого выключателя. Все РП оснащены выключателями нагрузки, трехполюсными автоматическими выключателями серии ВА, а также трех- и однополюсными дифференциальными автоматами. От РП запитываются электроприемники цеха. Прокладка кабелей к РП и отдельным приемникам выполняется в специальных каналах в полу помещения, поэтому приняты кабели АВВГнг-LS с поливинилхлоридной изоляцией проложенными в легких металлических коробах для защиты от механических повреждений, все короба соединяются с заземляющим устройством.

5 Выбор элементов системы электроснабжения

5.1 Расчет питающей линии 10 кВ

Исходя из полученной расчетной мощности цеховой ТП (712,119 кВА), проведем расчет питающей кабельной линии 10 кВ. Максимальный рабочий ток линии:

$$I_p = \frac{S_{p.тп}}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot n}, \text{ А}, \quad (5.1)$$

где $S_{p.тп}$ – итоговая расчетная мощность ТП, кВА;

U_n – номинальное напряжение линии, кВ;

n – число цепей, шт.

$$I_p = \frac{712,119}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 2} = 20,557 \text{ А.}$$

Ток линии в аварийном режиме:

$$I_{ав} = \frac{712,119}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 1} = 41,114 \text{ А.}$$

Экономическое сечение жилы кабеля:

$$F_{эк} = \frac{I_p}{j_{эк}}, \text{ мм}^2, \quad (5.2)$$

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

$$F_{эк} = \frac{20,557}{1,4} = 14,684 \text{ мм}^2.$$

Требуется выбрать кабель на напряжение 10 кВ. Выбираем трехжильный кабель АПВП с поперечным сечением жил 16 мм².

Длительно допустимый ток $I_{доп} = 70$ А. Проверяем кабель по длительно допустимому нагреву расчетным током:

$$I'_{доп} \geq I_{доп} \cdot K_{пов} \cdot K_{ср} \cdot K_{пон}, \text{ А}, \quad (5.3)$$

где $K_{пов}$ – коэффициент повышения при недогруженности КЛ, принимается

равным 1,25;

K_{cp} – коэффициент среды, учитывает температуру среды;

$K_{пон}$ – коэффициент понижения токовой нагрузки при групповой прокладке, принимается равным 0,93 для параллельной прокладки КЛ.

$$I'_{доп} \geq 70 \cdot 1,25 \cdot 1,08 \cdot 0,93 = 87,885 \text{ А.}$$

Сечение проходит. Проверяем выбранное сечение по потере напряжения по формуле:

$$\Delta U_{л} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\max} \cdot L \cdot 100}{U_{н}} (r_0 \cdot \cos \varphi + x_0 \cdot \sin \varphi), \% \quad (5.4)$$

где I_{\max} – максимальный расчетный ток линии, А;

L – длина линии, км;

r_0 – удельное активное сопротивление кабеля, Ом/км;

x_0 – удельное индуктивное сопротивление кабеля, Ом/км.

$$\Delta U_{л} = \frac{\sqrt{3} \cdot 41,114 \cdot 0,805 \cdot 100}{10} (1,94 \cdot 0,899 + 0,102 \cdot 0,438) = 0,25 \text{ \%}.$$

Потери не превышают допустимые 5% согласно ПУЭ [18]. Окончательно принимаем трехжильный кабель АПвП с поперечным сечением жил 16 мм².

5.2 Расчет распределительной сети 0,4 кВ

Согласно техническому заданию (ТЗ), требуется обеспечить возможность индивидуального отключения электроприемников для независимого проведения ремонтных работ и работ по обслуживанию [19]. Такому требованию удовлетворяет радиальная схема распределительной сети. Радиальная схема обеспечивает повышенную надежность системы электроснабжения и точную отстройку автоматических выключателей по

селективности срабатывания.

Принимаем радиальную схему распределительной сети 0,4 кВ, то есть каждый электроприемник запитывается отдельной линией по отдельному фидеру от РП.

Подвижные кран-балки запитываются гибкими кабелями КГнг-LS в защитной металлической гофре.

Расчётные токи кабельных линий (3 фазы) определяются по формуле:

$$I_p = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi}, \text{ А}, \quad (5.5)$$

где P_n – расчётное значение номинальной активной мощности, передаваемой по линии, кВт;

U_n – номинальное напряжение линии, кВ.

Произведем расчет КЛ питания электроприемника №1.

$$I_p = \frac{23,25}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 0,3} = 111,86 \text{ А}.$$

Принимаем для запитки кабель АВВГнг-LS - 3*35+1*25 с допустимым током 114,75 А, с учетом поправочного коэффициента 0,85 для нескольких рядом проложенных кабелей.

Схема питания электроприемника №1(КАС-1) показана на рисунке 5.1.

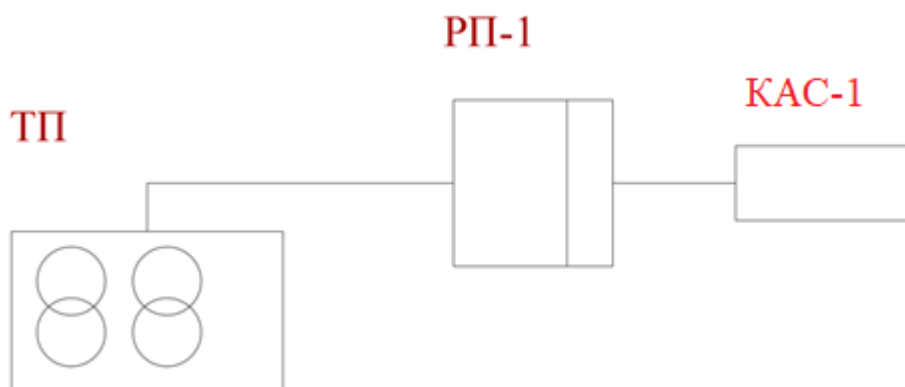


Рисунок 5.1- Схема питания электроприемника №1(КАС-1)

Длина кабеля L=11,49 м. Удельное активное сопротивление $r_0=0,00089$ Ом/м. Индуктивным сопротивлением в сети 0,4 кВ пренебрегаем [5].

Падение напряжения в линии составит, по формуле (5.4):

$$\Delta U_{л} = \frac{\sqrt{3} \cdot 111,86 \cdot 11,49 \cdot 100}{380} (0,00089 \cdot 0,3 + 0 \cdot 0,954) = 0,156 \text{ \%}.$$

Остальные линии рассчитываются так же, и кабели выбираются аналогично, результаты сведены в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – Выбор кабелей силовой сети

Участок	I_p , А	Кабель*	$I_{доп}$, А**
РП-1			
1	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	114,75
2	93,22	АВВГнг-LS-3*25+1*16	97,75
3	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	114,75
4	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	114,75
5	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	114,75
9	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	114,75
10	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	114,75
11	223,72	АВВГнг-LS-3*120+1*70	229,50
12	111,86	АВВГнг-LS-3*50+1*25	140,25
37	36,49	АВВГнг-LS-4*10	55,25
38	36,49	АВВГнг-LS-4*10	55,25
39	36,49	АВВГнг-LS-4*10	55,25
Σ РП-1	1209,44	4*АВВГнг-LS-3*240+1*120	1501,00
РП-2			
6	223,72	АВВГнг-LS-3*120+1*70	229,50
7	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	114,75
8	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	114,75
13	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	114,75
14	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	114,75
15	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	114,75
16	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	114,75

Продолжение таблицы 5.1

21	122,13	АВВГнг-LS-3*50+1*25	140,25
22	122,13	АВВГнг-LS-3*50+1*25	140,25
34	10,31	ВВГнг-LS-5*2,5	24,50
35	28,87	КГнг-LS 3*16+1*10	114,75
∑РП-2	1178,33	4*АВВГнг-LS-3*240+1*120	1501,00
РП-3			
17	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	114,75
18	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	114,75
19	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	114,75
20	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	114,75
23	77,72	АВВГнг-LS-3*25+1*16	97,75
24	99,93	АВВГнг-LS-3*35+1*25	114,75
25	99,93	АВВГнг-LS-3*35+1*25	114,75
26	99,93	АВВГнг-LS-3*35+1*25	114,75
27	88,82	АВВГнг-LS-3*25+1*16	97,75
28	81,19	АВВГнг-LS-3*25+1*16	97,75
29	81,19	АВВГнг-LS-3*25+1*16	97,75
36	72,17	КГнг-LS 3*16+1*10	114,75
∑РП-3	1148,32	4*АВВГнг-LS-3*240+1*120	1501,00
РП-4			
30	81,19	АВВГнг-LS-3*25+1*16	97,75
31	27,06	ВВГнг-LS-5*4	37,50
32	12,63	ВВГнг-LS-5*2,5	24,50
33	10,31	ВВГнг-LS-5*2,5	24,50
40	555,14	2*АВВГнг-LS-3*185+1*95	586,5
∑РП-4	686,34	2*АВВГнг-LS-3*240+1*120	750,50

Примечание:

* Для питания подвижных кранов выбраны гибкие кабели КГнг-LS;

** В случае групповой прокладки, допустимый ток кабеля принимается с учетом поправочного коэффициента на число рядом проложенных кабелей.

Произведем проверку кабельной линии для питания электроприемника №1 по потерям напряжения.

Удельное активное сопротивление кабеля $r_0=0,00129$ Ом/м.

Индуктивным сопротивлением в сети 0,4 кВ пренебрегаем. Падение напряжения в линии составит:

$$\Delta U_{\text{л}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 111,86 \cdot 11,49 \cdot 100}{380} (0,00089 \cdot 0,3 + 0 \cdot 0,954) = 0,156 \text{ \%}.$$

Потери не превышают допустимые 5% согласно ПУЭ [15].

Проверка остальных линий силовой сети по потерям напряжения выполняется аналогично, результаты сведены в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Проверка линий силовой сети по потерям напряжения

Участок	Ip, А	Кабель	го, Ом/м	L, м	г, Ом	dU, %
РП-1						
1	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	0,00089	11,49	0,01023	0,156
2	93,22	АВВГнг-LS-3*25+1*16	0,00124	18,65	0,02313	0,295
3	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	0,00089	26,49	0,02357	0,361
4	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	0,00089	34,52	0,03073	0,470
5	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	0,00089	42,60	0,03791	0,580
9	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	0,00089	31,83	0,02833	0,433
10	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	0,00089	26,28	0,02339	0,358
11	223,72	АВВГнг-LS-3*120+1*70	0,00026	18,05	0,00469	0,144
12	111,86	АВВГнг-LS-3*50+1*25	0,00062	33,48	0,02076	0,317
37	36,49	АВВГнг-LS-4*10	0,00310	4,39	0,01361	0,113
38	36,49	АВВГнг-LS-4*10	0,00310	10,19	0,03160	0,263
39	36,49	АВВГнг-LS-4*10	0,00310	14,87	0,04609	0,383
∑РП-1	1209,44	4*АВВГнг-LS-3*240+1*120	0,00003	54,76	0,00164	0,317
РП-2						
6	223,72	АВВГнг-LS-3*120+1*70	0,00026	3,57	0,00093	0,028
7	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	0,00089	14,74	0,01312	0,201
8	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	0,00089	20,50	0,01825	0,279
13	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	0,00089	32,65	0,02906	0,444
14	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	0,00089	26,33	0,02344	0,358
15	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	0,00089	20,65	0,01838	0,281
16	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	0,00089	10,01	0,00891	0,136
21	122,13	АВВГнг-LS-3*50+1*25	0,00062	35,53	0,02203	0,797
22	122,13	АВВГнг-LS-3*50+1*25	0,00062	25,48	0,01580	0,572
34	10,31	ВВГнг-LS-5*2,5	0,00680	65,47	0,44517	1,464
35	28,87	КГнг-LS 3*16+1*10	0,00129	152,72	0,19701	1,296
∑РП-2	1178,33	4*АВВГнг-LS-3*240+1*120	0,00003	30,40	0,00091	0,205
РП-3						
17	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	0,00089	44,52	0,03962	0,606
18	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	0,00089	36,86	0,03280	0,502
19	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	0,00089	32,68	0,02909	0,445
20	111,86	АВВГнг-LS-3*35+1*25	0,00089	38,71	0,03445	0,527
23	77,72	АВВГнг-LS-3*25+1*16	0,00124	19,58	0,02428	0,559
24	99,93	АВВГнг-LS-3*35+1*25	0,00089	25,41	0,02261	0,669

Продолжение таблицы 5.2

25	99,93	АВВГнг-LS-3*35+1*25	0,00089	35,22	0,03135	0,928
26	99,93	АВВГнг-LS-3*35+1*25	0,00089	43,97	0,03914	1,159
27	88,82	АВВГнг-LS-3*25+1*16	0,00124	50,81	0,06300	1,658
28	81,19	АВВГнг-LS-3*25+1*16	0,00124	31,38	0,03891	1,152
29	81,19	АВВГнг-LS-3*25+1*16	0,00124	25,05	0,03106	0,919
36	72,17	КГнг-LS 3*16+1*10	0,00129	100,78	0,13000	1,425
∑РП-3	1148,32	4*АВВГнг-LS-3*240+1*120	0,00003	65,73	0,00197	0,563
РП-4						
30	81,19	АВВГнг-LS-3*25+1*16	0,00124	6,87	0,00852	0,252
31	27,06	ВВГнг-LS-5*4	0,00450	20,89	0,09400	0,928
32	12,63	ВВГнг-LS-5*2,5	0,00680	15,36	0,10442	0,481
33	10,31	ВВГнг-LS-5*2,5	0,00680	39,09	0,26581	0,874
40	555,14	2*АВВГнг-LS-3*185+1*95	0,00008	16,86	0,00135	0,222
∑РП-4	686,34	2*АВВГнг-LS-3*240+1*120	0,00004	111,11	0,00444	1,043

Согласно требованиям ПУЭ, осветительные сети выполняются кабелями с медными жилами. Принимаем кабели ВВГнг-LS (негорючие, с низким дымовыделением).

Рассчитаем питание линии освещения водоподготовки. Линия питает 5 светильников.

Расчётный ток КЛ (1 фаза):

$$I_p = \frac{P_n}{U_n \cdot \cos \varphi}, \text{ А}, \quad (5.6)$$

где P_n – расчётное значение номинальной активной мощности, передаваемой по линии, Вт;

U_n – номинальное напряжение питаемого участка, В.

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности, для светодиодных светильников принимается равным 0,75 [14].

$$I_p = \frac{100 \cdot 5}{220 \cdot 0,75} = 3,03 \text{ А}.$$

Выбираем кабель ВВГнг-LS -3х1,5. Допустимый длительно ток равен 21 А. Для остальных линий расчеты и выбор кабелей аналогичны, результаты сведены в таблицу 5.3.

Таблица 5.3- Расчет сечений кабелей осветительной сети

Наименование помещения	N	Ip,А	Кабель	Идоп,А
Водоподготовка	5	3,03	ВВГнг-LS-3x1,5	21
Офис №1	4	2,42	ВВГнг-LS-3x1,5	21
Офис №2	6	3,64	ВВГнг-LS-3x4	36
Лаборатория	5	3,03	ВВГнг-LS-3x1,5	21
Участок сварки	7	4,24	ВВГнг-LS-3x1,5	21
Склад	5	3,03	ВВГнг-LS-3x4	36
Основной участок линия 1	9	21,82	ВВГнг-LS-3x6	48
Основной участок линия 2	11	26,67	ВВГнг-LS-3x4	36
Основной участок линия 3	10	24,24	ВВГнг-LS-3x4	36
Основной участок линия 4	9	21,82	ВВГнг-LS-3x4	36
Основной участок линия 5	7	16,97	ВВГнг-LS-3x1,5	21
Аварийное освещение	20	12,12	ВВГнг-LS-3x1,5	21
ΣЩО	78	43,64	ВВГнг-LS-5x16	105
ΣЩАО		12,12	ВВГнг-LS-3x1,5	21

Проверка кабельных линий осветительной сети по потере напряжения сведена в таблицу 5.4.

Таблица 5.4- Расчет падения напряжения в осветительной сети

Наименование помещения	L,м	Кабель	го, Ом/м	г, Ом	ΔU,В	dU,%
Водоподготовка	61,83	ВВГнг-LS-3x1,5	0,0121	0,748	3,401	1,546
Офис №1	58,45	ВВГнг-LS-3x1,5	0,0121	0,707	2,572	1,169
Офис №2	137,84	ВВГнг-LS-3x4	0,0039	0,538	2,932	1,333
Лаборатория	49,10	ВВГнг-LS-3x1,5	0,0121	0,594	2,700	1,227
Участок сварки	4,76	ВВГнг-LS-3x1,5	0,0121	0,058	0,366	0,167
Склад	124,57	ВВГнг-LS-3x4	0,0039	0,486	2,208	1,004
Основной участок линия 1	47,68	ВВГнг-LS-3x6	0,0021	0,100	3,277	1,490
Основной участок линия 2	32,68	ВВГнг-LS-3x4	0,0021	0,069	2,745	1,248
Основной участок линия 3	16,60	ВВГнг-LS-3x4	0,0039	0,065	2,354	1,070
Основной участок линия 4	31,91	ВВГнг-LS-3x4	0,0039	0,124	4,073	1,851
Основной участок линия 5	4,86	ВВГнг-LS-3x1,5	0,0121	0,059	1,495	0,680
Аварийное освещение	2,34	ВВГнг-LS-3x1,5	0,0121	0,028	0,515	0,234
ΣЩО	70,76	ВВГнг-LS-5x16	0,0008	0,057	0,926	0,421
ΣЩАО	2,34	ВВГнг-LS-3x1,5	0,0121	0,028	0,515	0,234

По результатам расчетов, падение напряжения не превышает допустимых для сетей освещения согласно ПУЭ 2,5 %.

Схема распределительной сети цеха после реконструкции показана на рисунке 5.1.

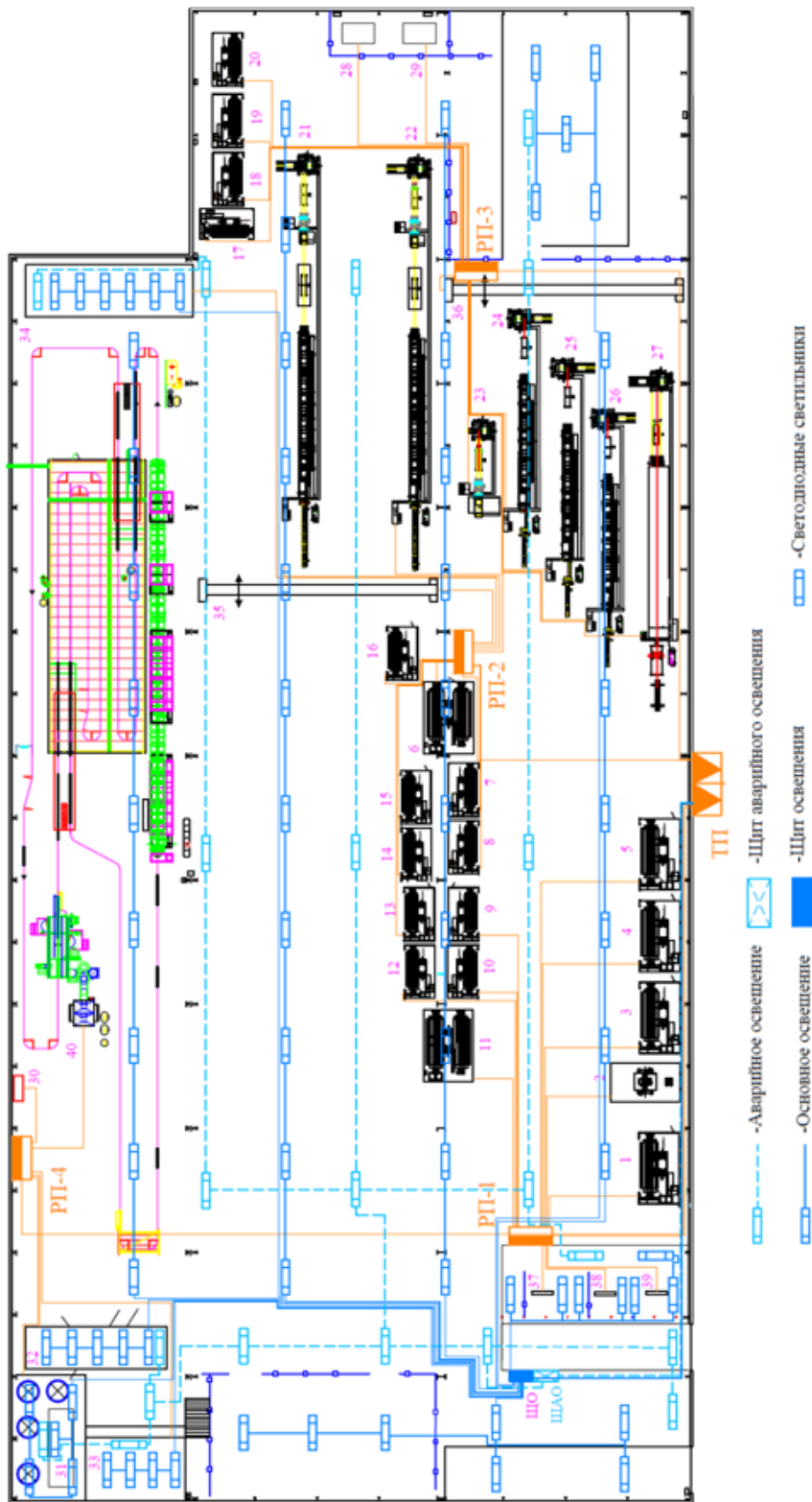


Рисунок 5.1– Схема распределительной сети цеха после реконструкции

6 Расчет токов короткого замыкания

Исходными для расчета являются принятый вариант схемы электроснабжения, выбранные к установке кабели. Составляется эквивалентная схема замещения, наносятся точки к.з. (рисунок 6.1).

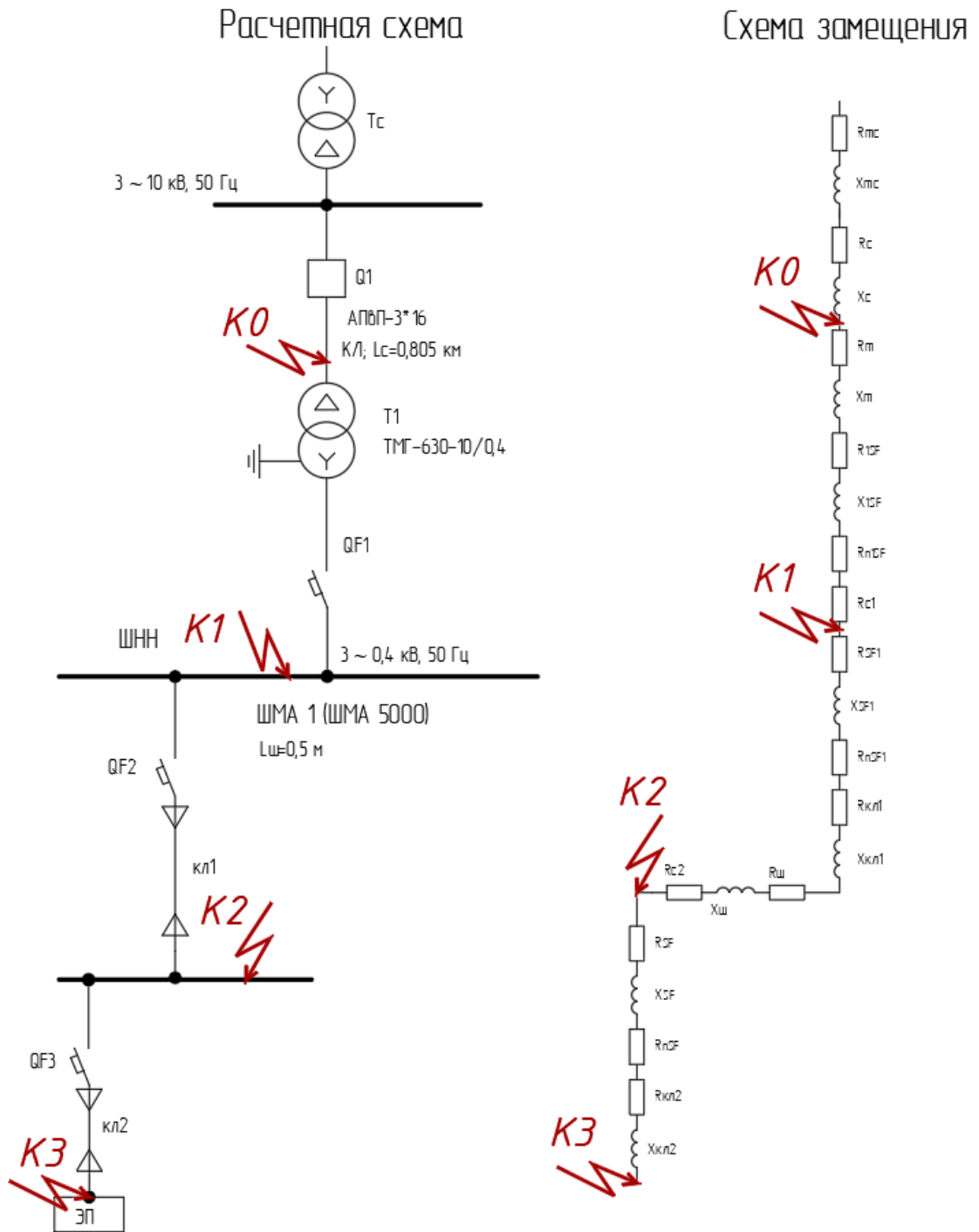


Рисунок 6.1 – Расчетная схема и схема замещения

Произведем расчет токов КЗ для линии питания электроприемника №1 (КАС). Для питающей энергосистемы значения эквивалентных сопротивлений равны, по данным ЗАО «Механоремонтный комплекс» [19]:

- активное сопротивление питающей энергосистемы: $R'_{тс} = 2,668 \text{ Ом}$;

- индуктивное сопротивление питающей энергосистемы: $X'_{тс} = 28,229 \text{ Ом}$.

Значения трехфазных токов к.з. в начале КЛ 10 кВ (выключатель 10 кВ ГПП), согласно данным по предприятию: $I_{к.з.макс}^{(3)} = 10,211 \text{ кА}$; $I_{к.з.мин}^{(3)} = 5,225 \text{ кА}$ [19].

Для питающей линии 10 кВ:

Удельное индуктивное сопротивление кабеля $x_0 = 0,102 \text{ Ом/км}$.

Индуктивное сопротивление линии 10 кВ:

$$X'_c = x_0 \cdot L_c, \text{ Ом}, \quad (6.1)$$

где L_c – длина линии, км.

$$X'_c = 0,102 \cdot 0,805 = 0,082 \text{ Ом}.$$

Удельное активное сопротивление кабеля $r_0 = 1,94 \text{ Ом/км}$.

Активное сопротивление линии 10 кВ:

$$R'_c = r_0 \cdot L_c, \text{ Ом}; \quad (6.2)$$

$$R'_c = 1,94 \cdot 0,805 = 1,562 \text{ Ом}.$$

Сопротивления приводятся к стороне НН:

$$R_{тс} = R'_{тс} \cdot \frac{U_{НН}^2}{U_{ВН}^2}, \text{ мОм}; \quad (6.3)$$

$$R_{тс} = 2668 \cdot \frac{0,4^2}{10^2} = 4,269 \text{ мОм};$$

$$X_{тс} = X'_{тс} \cdot \frac{U_{НН}^2}{U_{ВН}^2}, \text{ мОм}; \quad (6.4)$$

$$X_{тс} = 28229 \cdot \frac{0,4^2}{10^2} = 45,1664 \text{ мОм};$$

$$R_c = R'_c \cdot \frac{U_{\text{НН}}^2}{U_{\text{ВН}}^2}, \text{ мОм}; \quad (6.5)$$

$$R_c = 1562 \cdot \frac{0,4^2}{10^2} = 2,5 \text{ мОм};$$

$$X_c = X'_c \cdot \frac{U_{\text{НН}}^2}{U_{\text{ВН}}^2}, \text{ мОм}; \quad (6.6)$$

$$X_c = 82 \cdot \frac{0,4^2}{10^2} = 0,131 \text{ мОм}.$$

Для трансформатора ТП марки ТМГ12-630 по справочным данным [6]:

$R_T = 3,1 \text{ мОм}; X_T = 13,6 \text{ мОм}$. Для автоматов по справочным данным [12]:

QF1: $R_{\text{QF1}} = 0,04 \text{ мОм}; X_{\text{QF1}} = 0,04 \text{ мОм}; R_{\text{пQF1}} = 0,05 \text{ мОм}$.

QF2: $R_{\text{QF2}} = 0,08 \text{ мОм}; X_{\text{QF2}} = 0,08 \text{ мОм}; R_{\text{пQF2}} = 0,1 \text{ мОм}$.

QF3: $R_{\text{QF3}} = 0,7 \text{ мОм}; X_{\text{QF3}} = 0,7 \text{ мОм}; R_{\text{пQF3}} = 0,7 \text{ мОм}$.

Кабельная линия 1. Удельные сопротивления кабеля:

$$r_0 = 0,0325 \text{ мОм/м}; x_0 = 0,0193 \text{ мОм/м} [12].$$

Активное сопротивление линии:

$$R_{\text{кл1}} = r_0 \cdot L_{\text{кл1}}, \text{ мОм}, \quad (6.7)$$

где $L_{\text{кл1}}$ – длина линии, м.

$$R_{\text{кл1}} = 0,0325 \cdot 54,76 = 1,78 \text{ мОм}.$$

Индуктивное сопротивление линии:

$$X_{\text{кл1}} = x_0 \cdot L_{\text{кл1}}, \text{ мОм}; \quad (6.8)$$

$$X_{\text{кл1}} = 0,0193 \cdot 54,76 = 1,057 \text{ мОм}.$$

Кабельная линия 2. Удельные сопротивления кабеля:

$r_0 = 0,894 \text{ мОм/м}; x_0 = 0,088 \text{ мОм/м} [12]$. Активное сопротивление линии:

$$R_{\text{кл2}} = 0,894 \cdot 11,49 = 10,2721 \text{ мОм}.$$

Индуктивное сопротивление линии:

$$X_{\text{кл2}} = 0,088 \cdot 11,49 = 1,01 \text{ мОм}.$$

Для шинпровода ШМА1 (ШМА 5000) по справочным данным [12]:
 $r_0 = 0,01$ мОм/м; $x_0 = 0,005$ мОм/м. Удельные сопротивление петли «фаза-ноль»:

$r_{0п} = 0,019$ мОм/м; $x_{0п} = 0,031$ мОм/м.

$$R_{ш} = r_0 \cdot L_{ш}, \text{ мОм}; \quad (6.9)$$

$$R_{ш} = 0,01 \cdot 0,5 = 0,005 \text{ мОм};$$

$$X_{ш} = x_0 \cdot L_{ш}, \text{ мОм}; \quad (6.10)$$

$$R_{ш} = 0,05 \cdot 0,5 = 0,0025 \text{ мОм}.$$

Для ступеней распределения, переходные сопротивления, по справочным данным [12]: $R_{c1} = 15$ мОм; $R_{c2} = 20$ мОм. Далее упрощается схема замещения, вычисляются эквивалентные сопротивления на участках между точками к.з. и обозначаются на схеме (рисунок 6.2).

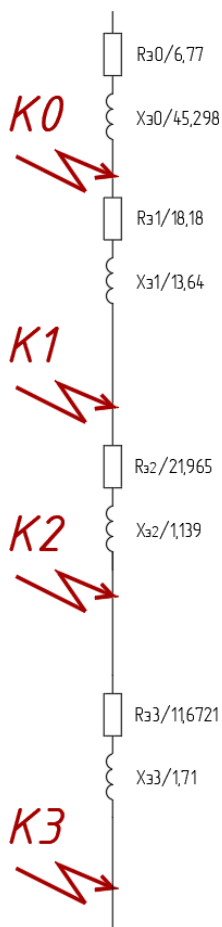


Рисунок 6.2 – Схема замещения упрощенная

$$R_{\text{э}0} = R_{\text{тс}} + R_{\text{с}}, \text{ мОм}; \quad (6.11)$$

$$R_{\text{э}0} = 4,269 + 2,5 = 6,77 \text{ мОм};$$

$$X_{\text{э}0} = X_{\text{тс}} + X_{\text{с}}, \text{ мОм}; \quad (6.12)$$

$$X_{\text{э}0} = 45,1664 + 0,131 = 45,298 \text{ мОм};$$

$$R_{\text{э}1} = R_{\text{т}} + R_{\text{QF1}} + R_{\text{пQF1}} + R_{\text{с1}}, \text{ мОм}; \quad (6.13)$$

$$R_{\text{э}1} = 3,1 + 0,04 + 0,05 + 15 = 18,18 \text{ мОм};$$

$$X_{\text{э}1} = X_{\text{т}} + X_{\text{QF1}}, \text{ мОм}; \quad (6.14)$$

$$X_{\text{э}1} = 13,6 + 0,04 = 13,64 \text{ мОм};$$

$$R_{\text{э}2} = R_{\text{QF2}} + R_{\text{пQF2}} + R_{\text{кп1}} + R_{\text{ш}} + R_{\text{с2}}, \text{ мОм}; \quad (6.15)$$

$$R_{\text{э}2} = 0,08 + 0,1 + 1,78 + 0,005 + 20 = 21,965 \text{ мОм};$$

$$X_{\text{э}2} = X_{\text{QF2}} + X_{\text{кп1}} + X_{\text{ш}}, \text{ мОм}; \quad (6.16)$$

$$X_{\text{э}2} = 0,08 + 1,057 + 0,0025 = 1,139 \text{ мОм};$$

$$R_{\text{э}3} = R_{\text{QF3}} + R_{\text{пQF3}} + R_{\text{кп2}}, \text{ мОм}; \quad (6.17)$$

$$R_{\text{э}3} = 0,7 + 0,7 + 10,2721 = 11,6721 \text{ мОм};$$

$$X_{\text{э}3} = X_{\text{QF3}} + X_{\text{кп2}}, \text{ мОм}; \quad (6.18)$$

$$X_{\text{э}3} = 0,7 + 1,01 = 1,71 \text{ мОм}.$$

Далее рассчитываются эквивалентные сопротивления до каждой точки

К3:

$$R_{\text{к0}} = R_{\text{э}0} = 6,77 \text{ мОм}.$$

$$X_{\text{к0}} = X_{\text{э}0} = 45,298 \text{ мОм}.$$

$$Z_{\text{к0}} = \sqrt{R_{\text{к0}}^2 + X_{\text{к0}}^2}, \text{ мОм}; \quad (6.19)$$

$$Z_{\text{к0}} = \sqrt{6,77^2 + 45,298^2} = 45,801 \text{ мОм};$$

$$R_{\text{к1}} = R_{\text{э}0} + R_{\text{э}1}, \text{ мОм}; \quad (6.20)$$

$$R_{\text{к1}} = 6,77 + 18,18 = 24,95 \text{ мОм};$$

$$X_{\text{к1}} = X_{\text{э}0} + X_{\text{э}1}, \text{ мОм}; \quad (6.21)$$

$$X_{\text{к1}} = 45,298 + 13,64 = 58,938 \text{ мОм};$$

$$Z_{k1} = \sqrt{24,95^2 + 58,938^2} = 64 \text{ мОм};$$

$$R_{k2} = R_{\text{г0}} + R_{\text{г1}} + R_{\text{г2}}, \text{ мОм}; \quad (6.22)$$

$$R_{k2} = 6,77 + 18,18 + 21,965 = 46,91 \text{ мОм};$$

$$X_{k2} = X_{\text{г0}} + X_{\text{г1}} + X_{\text{г2}}, \text{ мОм}; \quad (6.23)$$

$$X_{k2} = 45,298 + 13,64 + 1,139 = 60,077 \text{ мОм};$$

$$Z_{k2} = \sqrt{46,91^2 + 60,077^2} = 76,22 \text{ мОм};$$

$$R_{k3} = R_{k2} + R_{\text{г1}}, \text{ мОм}; \quad (6.24)$$

$$R_{k3} = 46,91 + 11,6721 = 58,584 \text{ мОм};$$

$$X_{k3} = X_{k2} + X_{\text{г3}}, \text{ мОм}; \quad (6.25)$$

$$X_{k3} = 60,077 + 1,71 = 61,788 \text{ мОм};$$

$$Z_{k3} = \sqrt{58,584^2 + 61,788^2} = 85,146 \text{ мОм}.$$

Трехфазный ток к.з. определяется по формуле:

$$I_k^{(3)} = \frac{U_k}{\sqrt{3} \cdot Z_k}, \text{ кА}, \quad (6.26)$$

где U_k – напряжение в точке к.з., кВ;

Z_k – эквивалентное сопротивление цепи до точки к.з., мОм.

Трехфазный ток короткого замыкания в точке К0:

$$I_{k0}^{(3)} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 45,801} = 5,04 \text{ кА}.$$

Для остальных точек расчет токов к.з. аналогичен.

Ударный ток к.з. рассчитывается по формуле:

$$i_y = \sqrt{2} \cdot K_y \cdot I_k^{(3)}, \text{ кА}, \quad (6.27)$$

где K_y – ударный коэффициент, для сетей 10 кВ принимаем равным 1,8; для сетей 0,4 кВ равным 1,3 [10].

Ударный ток к.з. в точке К0:

$$i_y = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 5,04 = 12,83 \text{ кА}.$$

Для остальных точек расчет ударных токов к.з. аналогичен.

Определяются двухфазные токи КЗ:

$$I_{\text{к}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\text{к}}^{(3)}, \text{ кА.} \quad (6.28)$$

Двухфазный ток к.з. в точке К0:

$$I_{\text{к}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 5,04 = 4,37 \text{ кА.}$$

Для остальных точек расчет двухфазных токов к.з. аналогичен.

Далее рассчитывается однофазный ток к.з. Составляется схема замещения (рисунок 6.3) и определяются сопротивления элементов.

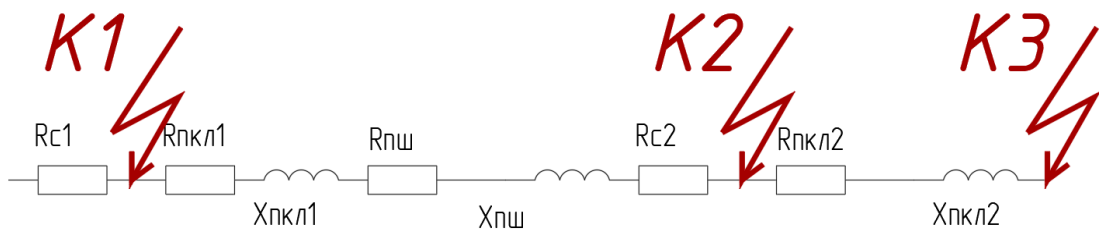


Рисунок 6.3 – Схема замещения для расчета однофазных токов КЗ

Активное сопротивление петли «фаза-ноль» для линии кл1:

$$R_{\text{пкл1}} = 2 \cdot r_0 \cdot L_{\text{кл1}}, \text{ мОм;} \quad (6.29)$$

$$R_{\text{пкл1}} = 2 \cdot 0,0325 \cdot 54,76 = 3,559 \text{ мОм.}$$

Индуктивное сопротивление петли «фаза-ноль» для линии кл1:

$$X_{\text{пкл1}} = x_{0\text{п}} \cdot L_{\text{кл1}}, \text{ мОм;} \quad (6.30)$$

$$X_{\text{пкл1}} = 0,15 \cdot 54,76 = 8,214 \text{ мОм.}$$

Активное сопротивление петли «фаза-ноль» для шинпровода:

$$R_{\text{пш}} = r_{0\text{пш}} \cdot L_{\text{ш}}, \text{ мОм;} \quad (6.31)$$

$$R_{\text{пш}} = 0,019 \cdot 0,5 = 0,0095 \text{ мОм.}$$

Индуктивное сопротивление петли «фаза-ноль» для шинпровода:

$$X_{\text{шш}} = x_{0\text{шш}} \cdot L_{\text{шш}}, \text{ мОм}; \quad (6.32)$$

$$X_{\text{шш}} = 0,031 \cdot 0,5 = 0,0155 \text{ мОм}.$$

Активное сопротивление петли «фаза-ноль» для линии кл2:

$$R_{\text{пкл}2} = 2 \cdot r_0 \cdot L_{\text{кл}2}, \text{ мОм}; \quad (6.33)$$

$$R_{\text{пкл}2} = 2 \cdot 0,894 \cdot 11,49 = 20,5441 \text{ мОм}.$$

Индуктивное сопротивление петли «фаза-ноль» для линии кл2:

$$X_{\text{пкл}2} = x_{0\text{п}} \cdot L_{\text{кл}2}, \text{ мОм}; \quad (6.34)$$

$$X_{\text{пкл}1} = 0,088 \cdot 11,49 = 1,011 \text{ мОм}.$$

Полное суммарное сопротивление петли «фаза-ноль» до точки К1:

$$Z_{\text{п1}} = R_{\text{с1}} = 15 \text{ мОм}.$$

Активное суммарное сопротивление петли «фаза-ноль» до точки К2:

$$R_{\text{п2}} = R_{\text{с1}} + R_{\text{пкл}1} + R_{\text{шш}} + R_{\text{с2}}, \text{ мОм}; \quad (6.35)$$

$$R_{\text{п2}} = 15 + 3,559 + 0,0095 + 20 = 38,569 \text{ мОм}.$$

Индуктивное суммарное сопротивление петли «фаза-ноль» до точки К2:

$$X_{\text{п2}} = X_{\text{пкл}1} + X_{\text{шш}}, \text{ мОм}; \quad (6.36)$$

$$X_{\text{п2}} = 8,214 + 0,0155 = 8,23 \text{ мОм}.$$

Полное суммарное сопротивление петли «фаза-ноль» до точки К2:

$$Z_{\text{п2}} = \sqrt{38,569^2 + 8,23^2} = 39,44 \text{ мОм}.$$

Активное суммарное сопротивление петли «фаза-ноль» до точки К3:

$$R_{\text{п3}} = R_{\text{п2}} + R_{\text{пкл}2}, \text{ мОм}; \quad (6.37)$$

$$R_{\text{п3}} = 38,569 + 20,5441 = 59,113 \text{ мОм}.$$

Индуктивное суммарное сопротивление петли «фаза-ноль» до точки К3:

$$X_{\text{п3}} = X_{\text{п2}} + X_{\text{пкл}2}, \text{ мОм}; \quad (6.38)$$

$$X_{\text{п3}} = 8,23 + 1,011 = 9,241 \text{ мОм}.$$

Полное суммарное сопротивление петли «фаза-ноль» до точки К3:

$$Z_{п3} = \sqrt{59,113^2 + 9,241^2} = 59,83 \text{ мОм.}$$

Однофазный ток к.з. рассчитывается по формуле:

$$I_k^{(1)} = \frac{U_{кф}}{Z_{п} + \frac{Z_{т}^{(1)}}{3}}, \text{ кА,} \quad (6.39)$$

где $U_{кф}$ – фазное напряжение, кВ;

$Z_{т}^{(1)}$ – сопротивление трансформатора в режиме однофазного КЗ, мОм.

Однофазный ток к.з. в точке К1:

$$I_{к1}^{(1)} = \frac{0,23}{15 + \frac{64,5}{3}} = 6,3 \text{ кА.}$$

Для остальных точек расчет однофазных токов к.з. аналогичен. Сведем результаты расчетов в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Сводная ведомость токов короткого замыкания (мин. режим)

Точка КЗ	Rк, мОм	Xк, мОм	Zк, мОм	Ky	Iк ⁽³⁾ , кА	i _y , кА	Iк ⁽²⁾ , кА	Zп, мОм	Iк ⁽¹⁾ , кА
К0	6,77	45,30	45,80	1,8	5,04	12,83	4,37	-	-
К1	24,95	58,94	64,00	1,3	3,61	6,63	3,12	15	6,30
К2	46,91	60,08	76,22	1,3	2,88	5,29	2,49	39,44	3,61
К3	58,58	61,79	85,15	1,3	2,58	4,74	2,23	59,83	2,70

Для максимального режима работы энергосистемы значения эквивалентных сопротивлений равны, по данным ЗАО «Механоремонтный комплекс» [19]:

- активное сопротивление питающей энергосистемы: $R'_{тс} = 1,334 \text{ Ом}$

- индуктивное сопротивление питающей энергосистемы: $X'_{тс} = 14,1145$

Ом.

Расчеты токов к.з. проводятся аналогично. Сведем результаты расчетов в таблицу 6.2.

Таблица 6.2— Сводная ведомость токов короткого замыкания (макс. режим)

Точка КЗ	R_k , мОм	X_k , мОм	Z_k , мОм	K_y	$I_k^{(3)}$, кА	i_y , кА	$I_k^{(2)}$, кА	$Z_{п}$, мОм	$I_k^{(1)}$, кА
К0	4,63	22,71	23,18	1,8	9,96	25,36	8,63	-	-
К1	22,81	36,35	42,92	1,3	5,38	9,89	4,66	15	6,30
К2	44,78	37,49	58,40	1,3	3,76	6,91	3,25	39,44	3,61
К3	56,45	39,21	68,73	1,3	3,19	5,87	2,76	59,83	2,70

Расчет токов к.з. в точке К3 для других электроприемников аналогичен и сведен в приложение А.

7 Выбор и проверка автоматических выключателей

Требуется выбрать и проверить автоматические выключатели для защиты линий распределительной сети; на вводе РУНН ТП и секционный автомат ТП.

Выбор автоматических выключателей необходимо производить по следующим правилам [3]:

- номинальное напряжение не должно быть меньше напряжения сети:

$$U_{\text{ном}} > U_c, \text{ В.} \quad (7.1)$$

- проверка по отключающей способности:

$$\text{ПКС} > i_y, \text{ кА,} \quad (7.2)$$

где ПКС – предельная коммутационная способность автомата, кА;

- проверка по номинальному току теплового расцепителя:

$$I_{\text{т.р.}} > I_p, \text{ А.} \quad (7.3)$$

- должна быть проведена отстройка от номинального тока нагрузки:

$$I_{\text{т.р.}} > 1,1 \cdot I_p, \text{ А.} \quad (7.4)$$

- должна быть проведена отстройка от кратковременной перегрузки:

$$I_{\text{эм.р.}} > 1,2 \cdot I_{\text{п}}, \text{ А,} \quad (7.5)$$

где $I_{\text{п}}$ – пиковый ток, А

Для группы электроприемников пиковый ток определяется по формуле:

$$I_{\text{п}} = I_{\text{п.макс}} + I_p - I_{\text{ном.макс}}, \text{ А,} \quad (7.6)$$

где $I_{\text{п.макс}}$ – наибольший из пусковых токов двигателей группы приёмников, А;

I_p – расчётный ток группы приёмников, А;

$I_{\text{ном.макс}}$ – наибольший номинальный ток электроприемника в группе, А.

Для одиночного асинхронного электродвигателя пиковый ток представляет собой пусковой ток:

$$I_{п} = (5 \div 7,5) \cdot I_{р}, \text{ А.} \quad (7.7)$$

Чувствительность срабатывания электромагнитного расцепителя:

$$K_{ч} = \frac{I_{к}^{(1)}}{I_{эм.р.}} > 1,1. \quad (7.8)$$

Рассмотрим выбор автомата на линии к электроприемнику №1.

Отстройка уставки теплового расцепителя автоматического выключателя:

$$1,1 \cdot 111,862 = 123 \text{ А.}$$

Для защиты кабельной линии выбираем автомат серии ВА-51-35 на номинальный ток 160 А. Уставку теплового расцепителя принимаем равной 0,8 от номинального тока автомата, т.е. 128 А.

Выбор автоматических выключателей для защиты других линий распределительной сети сведен в таблицу 7.1.

Таблица 7.1– Выбор автоматических выключателей распределительной сети

Участок	$I_{р}, \text{ А}$	$1,1 \cdot I_{р}, \text{ А}$	$I_{п}, \text{ А}$	$1,2 \cdot I_{п}, \text{ А}$	Выключатель	$I_{ном}, \text{ А}$	$I_{г.р.}, \text{ А}$
РП-1							
1	111,862	123,0	190,2	228,2	ВА-51-35	160	128
2	93,218	102,5	158,5	190,2	ВА-51-35	160	128
3	111,862	123,0	190,2	228,2	ВА-51-35	160	128
4	111,862	123,0	190,2	228,2	ВА-51-35	160	128
5	111,862	123,0	190,2	228,2	ВА-51-35	160	128
9	111,862	123,0	190,2	228,2	ВА-51-35	160	128
10	111,862	123,0	190,2	228,2	ВА-51-35	160	128
11	223,723	246,1	380,3	456,4	ВА-51-39	250	250
12	111,862	123,0	190,2	228,2	ВА-51-35	160	128
37	36,489	40,1	91,2	109,5	ВА-51-25	50	45
38	36,489	40,1	91,2	109,5	ВА-51-25	50	45
39	36,489	40,1	91,2	109,5	ВА-51-25	50	45
Σ РП-1	1209,438	1330,4	1366,0	1639,3	Электрон Э16	1600	1440
РП-2							
6	223,723	246,1	380,3	456,4	ВА-51-39	250	250
7	111,862	123,0	190,2	228,2	ВА-51-35	160	128
8	111,862	123,0	190,2	228,2	ВА-51-35	160	128
13	111,862	123,0	190,2	228,2	ВА-51-35	160	128
14	111,862	123,0	190,2	228,2	ВА-51-35	160	128
15	111,862	123,0	190,2	228,2	ВА-51-35	160	128
16	111,862	123,0	190,2	228,2	ВА-51-35	160	128
21	122,132	134,3	305,3	366,4	ВА-51-35	160	144

Продолжение таблицы 7.1

22	122,132	134,3	305,3	366,4	ВА-51-35	160	144
34	10,310	11,3	61,9	74,2	ВА-51-25	13	13
35	28,868	31,8	173,2	207,8	ВА-51-25	32	32
∑РП-2	1178,334	1296,2	1334,9	1601,9	Электрон Э16	1600	1440
РП-3							
17	111,862	123,0	190,2	228,2	ВА-51-35	160	128
18	111,862	123,0	190,2	228,2	ВА-51-35	160	128
19	111,862	123,0	190,2	228,2	ВА-51-35	160	128
20	111,862	123,0	190,2	228,2	ВА-51-35	160	128
23	77,720	85,5	466,3	213,7	ВА-51-35	100	90
24	99,926	109,9	599,6	274,8	ВА-51-35	160	128
25	99,926	109,9	599,6	274,8	ВА-51-35	160	128
26	99,926	109,9	599,6	274,8	ВА-51-35	160	128
27	88,823	97,7	532,9	244,3	ВА-51-35	100	100
28	81,190	89,3	487,1	584,6	ВА-51-35	100	90
29	81,190	89,3	487,1	584,6	ВА-51-35	100	90
36	72,169	79,4	433,0	519,6	ВА-51-35	80	80
∑РП-3	1148,316	1263,1	1636,0	1963,2	Электрон Э16	1600	1280
РП-4							
30	81,190	89,3	487,1	584,6	ВА-51-35	100	100
31	27,063	29,8	162,4	194,9	ВА-51-25	32	32
32	12,630	13,9	75,8	90,9	ВА-51-25	16	16
33	10,310	11,3	61,9	74,2	ВА-51-25	13	13
40	555,144	610,7	1010,4	1212,5	ВА-52-39	630	630
∑РП-4	686,337	755,0	1141,6	1369,9	Электрон Э16	1000	800

Выбор автоматических выключателей РУНН ТП сведен в таблицу 7.2.

Таблица 7.2– Выбор автоматических выключателей РУНН ТП

Участок	I_p, A	$1,1 \cdot I_p, A$	I_n, A	$1,2 \cdot I_n, A$	Выключатель	$I_{ном}, A$	$I_{т.р.}, A$
ввод ТП	4222,43	4644,7	4410,1	5512,6	Электрон Э40С	6300	5040
секционный	4222,43	4644,7	4410,1	5512,6	Электрон Э40С	6300	5040

Проводим проверку выбранного автоматического выключателя на линии к электроприемнику №1.

- отстройка от номинального тока нагрузки:

$$128 > 111,862 \text{ A.}$$

Условие выполняется;

Для комплекса автоматизированной сварки пиковый ток, согласно паспорту, составляет 170 % от номинального:

$$I_{\text{п}} = 1,7 \cdot 111,862 = 190,2 \text{ А.}$$

- отстройка от кратковременной перегрузки:

$$250 > 1,2 \cdot 190,2 = 228,2 \text{ А.}$$

Условие выполняется;

- проверка по чувствительности срабатывания электромагнитного расцепителя:

$$K_{\text{ч}} = \frac{2,7}{0,25} = 10,8 > 1,1.$$

Условие выполняется;

- проверка по ПКС:

$$36 > 4,74 \text{ кА.}$$

Условие выполняется;

Для остальных линий проверка автоматических выключателей аналогична, результаты сведены в таблицу 7.3.

Таблица 7.3– Проверка автоматических выключателей распределительной сети

Участок	Выключатель	Ином, А	Ит.р., А	Иэм.р., А	Ik(1) , кА	Kч	ПКС, кА	iy , кА
РП-1								
1	ВА-51-35	160	128	250	2,700	10,8	36,0	4,74
2	ВА-51-35	160	128	200	2,884	14,4	36,0	4,24
3	ВА-51-35	160	128	250	2,869	11,5	36,0	4,21
4	ВА-51-35	160	128	250	2,651	10,6	36,0	3,95
5	ВА-51-35	160	128	250	2,460	9,8	36,0	3,72
9	ВА-51-35	160	128	250	2,721	10,9	36,0	4,04
10	ВА-51-35	160	128	250	2,875	11,5	36,0	4,22
11	ВА-51-39	250	250	500	3,616	7,2	60,0	5,05
12	ВА-51-35	160	128	250	2,963	11,9	36,0	4,32
37	ВА-51-25	50	45	150	3,228	21,5	6,0	4,62
38	ВА-51-25	50	45	150	2,627	17,5	6,0	3,92
39	ВА-51-25	50	45	150	2,270	15,1	6,0	3,48
ΣРП-1	Электрон Э16	1600	1440	1700	3,610	2,1	60,0	5,29
РП-2								
6	ВА-51-39	250	250	500	3,801	7,6	60,0	5,24
7	ВА-51-35	160	128	250	3,248	13,0	36,0	4,65
8	ВА-51-35	160	128	250	3,052	12,2	36,0	4,42
13	ВА-51-35	160	128	250	2,699	10,8	36,0	4,01
14	ВА-51-35	160	128	250	2,874	11,5	36,0	4,22

Продолжение таблицы 7.3

15	ВА-51-35	160	128	250	3,047	12,2	36,0	4,42
16	ВА-51-35	160	128	250	3,424	13,7	36,0	4,84
21	ВА-51-35	160	144	400	2,920	7,3	36,0	4,27
22	ВА-51-35	160	144	400	3,143	7,9	36,0	4,53
34	ВА-51-25	13	13	100	0,444	4,4	6,0	0,78
35	ВА-51-25	32	32	250	0,900	3,6	6,0	1,53
∑РП-2	Электрон Э16	1600	1440	1650	3,802	2,3	60,0	5,24
РП-3								
17	ВА-51-35	160	128	250	2,418	9,7	36,0	3,66
18	ВА-51-35	160	128	250	2,593	10,4	36,0	3,88
19	ВА-51-35	160	128	250	2,698	10,8	36,0	4,01
20	ВА-51-35	160	128	250	2,549	10,2	36,0	3,83
23	ВА-51-35	100	90	250	2,846	11,4	36,0	4,19
24	ВА-51-35	160	128	300	2,901	9,7	36,0	4,25
25	ВА-51-35	160	128	300	2,634	8,8	36,0	3,93
26	ВА-51-35	160	128	300	2,429	8,1	36,0	3,68
27	ВА-51-35	100	100	250	1,952	7,8	36,0	3,06
28	ВА-51-35	100	90	600	2,435	4,1	36,0	3,69
29	ВА-51-35	100	90	600	2,642	4,4	36,0	3,94
36	ВА-51-35	80	80	550	1,238	2,3	36,0	2,05
∑РП-3	Электрон Э16	1600	1280	2000	3,748	1,9	60,0	5,19
РП-4								
30	ВА-51-35	100	100	600	3,441	5,7	36,0	4,86
31	ВА-51-25	32	32	200	1,545	7,7	6,0	2,50
32	ВА-51-25	16	16	100	1,442	14,4	6,0	2,35
33	ВА-51-25	13	13	100	0,702	7,0	6,0	1,21
40	ВА-52-39	630	630	1250	2,763	2,2	60,0	4,82
∑РП-4	Электрон Э16	1000	800	1400	3,628	2,6	60,0	5,06

Проверка автоматических выключателей РУНН ТП аналогична, результаты сведены в таблицу 7.4.

Таблица 7.4– Проверка автоматических выключателей РУНН ТП

Участок	Выключатель	Ином, А	Ит.р., А	Иэм.р., А	Ik(1) , кА	Кч	ПКС, кА	iy , кА
ввод ТП	Электрон Э40С	6300	5040	5600	6,3	1,13	80	6,63
секционный	Электрон Э40С	6300	5040	5600	6,3	1,13	80	6,63

8. Выбор и проверка высоковольтного оборудования

8.1 Выбор и проверка высоковольтных выключателей и разъединителей

Выключатели и выключатели нагрузки 10 кВ проверяются:

- по отключающей способности:

$$I_{\text{НОМ.ОТКЛ.}} > I_{\text{к}}, \text{ кА}, \quad (8.1)$$

где $I_{\text{НОМ.ОТКЛ.}}$ – номинальный ток отключения выключателя по каталогу, кА;

$I_{\text{к}}$ – ток трехфазного КЗ, кА.

- по ударному току КЗ:

$$i_{\text{пр.с.}} > i_{\text{у}}, \text{ кА}, \quad (8.2)$$

где $i_{\text{пр.с.}}$ – амплитудное значение предельного сквозного тока КЗ, кА;

$i_{\text{у}}$ – ударный ток КЗ, кА.

- на термическую стойкость:

$$I_{\text{т}}^2 \cdot t_{\text{т}} \geq B_{\text{к}}, \text{ кА}^2 \cdot \text{с}, \quad (8.3)$$

где $I_{\text{т}}$ – предельный ток термической стойкости по каталогу, кА;

$t_{\text{т}}$ – время протекания тока термической стойкости по каталогу, с;

$B_{\text{к}}$ – тепловой импульс тока КЗ, $\text{кА}^2 \cdot \text{с}$.

$$B_{\text{к}} = I_{\text{к}}^2 \cdot (t_{\text{откл}} + T_{\text{а}}), \text{ кА}^2 \cdot \text{с}, \quad (8.4)$$

где $T_{\text{а}}$ – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ, $T_{\text{а}} = 0,05$ с для сети 10 кВ [17].

$t_{\text{откл}}$ – время отключения КЗ, с.

$$t_{\text{откл}} = t_{\text{р.з.}} + t_{\text{откл.В}}, \text{ с}, \quad (8.5)$$

где $t_{\text{р.з.}}$ – время срабатывания релейной защиты, с;

$t_{\text{откл.В}}$ – собственное время отключения выключателя, с.

Выбираем вакуумные выключатели серии ВВ/TEL – 10/630 (на фидере РУ 10 кВ ГПП предприятия). На цеховой ТП установка высоковольтных выключателей не требуется, так как релейная защита блока КЛ 10 кВ

цеховой трансформатор ТП осуществляется на РУ 10 кВ ГПП; секционирование и АПВ также осуществляется на РУ 10 кВ ГПП.

Выбираем выключатели нагрузки серии ВНРп-10/400-10з (на цеховой ТП), так как они значительно дешевле вакуумных выключателей серии ВВ/TEL. Время отключения КЗ составит, по формуле (8.5):

$$t_{\text{откл}} = 0,05 + 0,025 = 0,075 \text{ с.}$$

Тепловой импульс тока КЗ на фидере РУ 10 кВ ГПП составит, по формуле (8.4):

$$B_{\text{к}} = 10,211^2 \cdot (0,075 + 0,05) = 13,033 \text{ кА}^2 \cdot \text{с.}$$

Тепловой импульс тока КЗ на стороне 10 кВ цеховой ТП составит, по формуле (8.4):

$$B_{\text{к}} = 9,96^2 \cdot (0,075 + 0,05) = 12,4 \text{ кА}^2 \cdot \text{с.}$$

Проверка выключателей 10 кВ (на фидере РУ 10 кВ ГПП) сведена в таблицу 8.1.

Таблица 8.1 - Проверка выключателей 10 кВ

Расчетные данные	Значение	Выключатель ВВ/TEL-10/630 (на фидере РУ 10 кВ ГПП)
$U_{\text{уст}}$, кВ	10	10,0
$I_{\text{max p}}$, А	41,114	630,0
$U_{\text{уст}}$, кВ	10	10,0
$I_{\text{пт}}$, кА	10,211	31,5
$I_{\text{уд}}$, кА	28,18	80,0
$B_{\text{к}} = I_{\text{п(0)}}^2 \cdot t_{\text{откл}}$, кА ² /с	13,033	3600,0

Проверка выключателей нагрузки 10 кВ (на цеховой ТП) сведена в таблицу 8.2.

Таблица 8.2 - Проверка выключателей нагрузки 10 кВ

Расчетные данные	Значение	Выключатель нагрузки ВНРп-10/400-10з- (на цеховой ТП)
$U_{УСТ}$, кВ	10	10,0
$I_{\max p}$, А	41,114	400,0
$I_{пт}$, кА	9,96	25,0
$I_{уд}$, кА	25,36	40,0
$В_K = I_{п(0)}^2 \cdot t_{откл}$, кА ² /с	12,4	2500,0

Выбранные выключатели и выключатели нагрузки проходят проверку по всем параметрам.

При проведении ремонтных работ на питающей линии 10 кВ и цеховой ТП, гарантированный разрыв цепи 10 кВ обеспечивается выкатными ячейками выключателей 10 кВ на фидере РУ 10 кВ ГПП и снятием предохранителей 10 кВ на цеховой ТП, следовательно, установка дополнительных разъединителей в силовой цепи 10 кВ не требуется. Для заземляющих цепей выбираем разъединители марки РВ-10/400.

8.2 Выбор и проверка шин РУВН 10 кВ цеховой ТП

Выбираем прямоугольные алюминиевые шины АД31 15х3 мм (минимальный размер). Расположение шин вертикальное, расстояние между шинами 0,6 м. Проводим проверку:

- по длительно допустимому току: $I_{\text{доп}} = 165 \text{ А} > I_{\max p} = 41,114 \text{ А}$
- по электродинамической стойкости: расчетное напряжение в материале шин определяется по формуле

$$\sigma_{\text{расч}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-8} \cdot I_y^2 \cdot l^2}{a \cdot b \cdot h^2 / 6} \quad (8.6)$$

где l – длина шины, м;

a и b – высота и ширина шины, м;

h – расстояние между шинами, м.

Проводим расчет по формуле (8.6)

$$\sigma_{расч} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-8} \cdot 25,36^2 \cdot 2^2}{0,015 \cdot 0,003 \cdot 0,6^2 / 6} = 0,28 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{доп} = 75 \text{ МПа} > \sigma_{расч} = 0,28 \text{ МПа}$$

- проверка на механический резонанс: собственная частота колебания определяется по формуле

$$f_c = 5,02 \cdot 10^5 \cdot b / l^2 \quad (8.7)$$

Проводим расчет по формуле (8.7)

$$f_c = 5,02 \cdot 10^5 \cdot 0,015 / 2^2 = 1882 \text{ Гц}$$

$f_c > 200$ Гц, резонанс невозможен.

8.3 Выбор трансформаторов тока

В КРУ 10 кВ ГПП устанавливаем трансформаторы тока ТПЛК 50/5-У1.

Проверка на термическую стойкость определяется соотношением: расчетный тепловой импульс тока не должен превышать допустимый для данного ТТ. Расчет производится по формуле

$$B_k \leq (k_m \cdot I_{1н})^2 \cdot t_m \quad (8.8)$$

где B_k – расчетное значение теплового импульса к.з., $\text{kA}^2 \cdot \text{с}$;

k_m – коэффициент термической стойкости ТТ (паспортная величина);

$I_{1н}$ – номинальный ток первичной обмотки, А;

t_m – расчетное время проверки (трехсекундная стойкость), принимается равным 3 с.

Проверка на электродинамическую стойкость определяется соотношением: расчетный ударный ток к.з. не должен превышать допустимый для данного ТТ. Расчет производится по формуле

$$I_{уд} \leq \sqrt{2} \cdot k_{дин} \cdot I_{1н} \quad (8.9)$$

где $k_{дин}$ – коэффициент электродинамической стойкости ТТ (паспортная величина).

Произведем проверку на термическую стойкость по формуле (8.8)

$$12,4 \leq (95 \cdot 0,05)^2 \cdot 3$$

$$12,4 \leq 67,69$$

Соотношение выполняется, ТТ проходит проверку.

Произведем проверку на электродинамическую стойкость по формуле (8.9)

$$25,36 \leq \sqrt{2} \cdot 385 \cdot 0,05$$

$$25,36 \leq 27,22$$

Соотношение выполняется, ТТ проходит проверку.

Для остальных ТТ выбор и проверка аналогичны, сведены в таблицу 8.3.

Таблица 8.3 – Выбор и проверка трансформаторов тока

Место установки	Расчетные данные		Трансформатор тока	Каталожные данные	
КРУ 10 кВ ГПП	$U_{уст}$, кВ.	10	ТПЛК 10-50/5	U_H , кВ	10
	$I_{max p}$, А	41,114		I_H , А	50
	$I_{пт}$, кА	9,96		B_K , кА ² /с	67,69
	$I_{уд}$, кА	25,36		$I_{уд}$, кА	27,22
	B_K , кА ² /с	12,4			
РУНН цеховой ТП	$U_{уст}$, кВ.	0,4	ТШЛ 0,66/5000	U_H , кВ	0,66
	$I_{max p}$, А	4222,43		I_H , А	5000
	$I_{пт}$, кА	5,38		B_K , кА ² /с	28,56
	$I_{уд}$, кА	9,89		$I_{уд}$, кА	13,563
	B_K , кА ² /с	0,726			

8.4 Выбор трансформаторов напряжения

Трансформатор напряжения рассчитывается на мощность всех приборов присоединений данной секции.

Выбираем трансформаторы напряжения НАМИ – 10 – 200, номинальная мощность которого в классе точности 0,5 равна 200 ВА. Определяем нагрузку трансформатора (таблица 8.4).

Таблица 8.4 – Расчет нагрузки трансформаторов напряжения

Наименование приборов	Кол-во приборов	Потребляемая мощность, Вт	Класс точности	cos φ	Нагрузка		
					P, Вт	Q, Вар	S, ВА
Вольтметр Э335	4	2	1,5	1	8,00	0,00	8,00
Счетчик ЦЭ6803В	2	2,5	1	0,38	5	12,17	13,16
Итого :					13,0	12,17	21,16

$$S_{\text{ном.}} = 200 \text{ ВА.} > S_{\text{приб.}} = 21,16 \text{ ВА.}$$

Трансформатор напряжения обеспечивает класс точности 0,5.

8.5 Выбор ограничителей перенапряжения

Выбираются ограничители перенапряжения серии ОПН. Для защиты от перенапряжений предварительно выбираем ОПН-10/12,5-10/650.

1. Проверка по наибольшему длительно допустимому рабочему напряжению $U_{\text{нд}}$.

Для сетей напряжением 10 кВ наибольшее рабочее напряжение сети, согласно ГОСТ 1516.3-96: $U_{\text{нс}} = 11,5 \text{ кВ}$.

По условию обеспечения электрической прочности изоляции:

$$U'_{\text{нс}} = 1,05 \cdot U_{\text{нс}} \quad (8.10)$$

$$U'_{\text{нс}} = 1,05 \cdot 11,5 = 12,075 \text{ кВ}$$

Для ОПН-10/12,5-10/650: $U_{\text{нд}} = 12,5 \text{ кВ}$. $12,5 > 12,075 \text{ кВ}$

Условие выполняется.

2. Проверка по условиям взрывобезопасности.

Номинальный взрывобезопасный ток должен быть не менее, чем на 20% больше максимального тока КЗ в месте установки ОПН:

$$I_{\text{вб}} > 1,2 \cdot I_{\text{КЗ.макс}} \quad (8.11)$$

$$I_{BB} > 1,2 \cdot 9,96 = 11,952 \text{ кА}$$

Для ОПН-10/12,5-10/650: $I_{вб}=20$ кА. $20 > 11,952$ кА

Условие выполняется.

3. Проверка по грозovým перенапряжениям.

Максимальное значение остающегося на ОПН напряжения при грозovém импульсе с амплитудой 5 кА для ограничителей сетей 10 кВ не должно превышать 45 кВ [23].

Для ОПН-10/12,5-10/650: $U_{ост.г} = 35,8$ кВ < 45 кВ.

Условие выполняется.

4. Проверка по коммутационным перенапряжениям.

Остающееся на ОПН напряжение $U_{ост.к}$ при воздействии коммутационного импульса должно быть не менее, чем на 20% меньше испытательного напряжения коммутационного импульса $U_{ки}$ (согласно ГОСТ 1516.3-96 значения $U_{ки}$ нормируются для электрооборудования от 330 кВ).

Для электрооборудования от 6-220 кВ нормируются одномоментные испытательные напряжения частотой 50 Гц – $U_{исп50}$). В данном случае значение испытательного напряжения коммутационного импульса определяется по формуле:

$$U_{ки} = K_u \cdot K_k \cdot \sqrt{2} \cdot U_{исп50} \quad (8.12)$$

где K_u – коэффициент импульса, учитывающий упрочнение изоляции при коротком импульсе по сравнению с испытательным, принимается равным 1,35 [23];

K_k – коэффициент кумулятивности, учитывающий возможную многократность импульсов и старение изоляции, принимается равным 0,9 [23].

В данном случае:

$$U_{ки} = 1,35 \cdot 0,9 \cdot \sqrt{2} \cdot 35 = 60,13 \text{ кВ.}$$

Для ОПН-10/12,5-10/650: $U_{ост.к} = 30 \text{ кВ} < 60,13 \text{ кВ}$.

Условие выполняется.

5. Проверка по длине пути утечки внешней изоляции.

Согласно ГОСТ 9920-89 для района со II степенью загрязненности внешней среды удельная длина пути утечки должна быть не менее 2,0 см/кВ. То есть в данном случае минимальная длина пути утечки для ОПН:

$$L_{мин.ПУ} = 2,0 \cdot 11,5 = 23 \text{ см.}$$

Для ОПН-10/12,5-10/650: $L_{ПУ} = 25 \text{ см} > 23 \text{ см}$.

Условие выполняется.

Вывод: выбранный тип ОПН-10/12,5-10/650 соответствует требуемым параметрам, определенным в соответствии с условиями эксплуатации.

9 Заземление и молниезащита

9.1 Расчет контура заземления

Намечаем расположение вертикальных электродов по контуру. Максимально допустимое сопротивление со стороны 0,4 кВ $R_3=4$ Ом, согласно ПУЭ [18]. Удельное сопротивление грунта ρ_p (Ом·м) для вертикальных и горизонтальных электродов с учетом коэффициента сезонности определяется по формуле:

$$\rho_p = \rho \cdot K_c, \quad (9.1)$$

где ρ - удельное сопротивление грунта (суглинок), Ом·м;

K_c - коэффициент сезонности.

Для вертикальных электродов:

$$\rho_{pв} = 100 \cdot 1,7 = 170 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Для горизонтальных электродов:

$$\rho_{pг} = 100 \cdot 4,5 = 450 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Используем контурное заземление.

Характеристики заземляющего устройства сведены в таблицу 9.2.

Таблица 9.2 – Характеристики заземляющего устройства

Параметры вертикального электрода (сталь угловая)		Параметры горизонтального электрода (сталь полосовая)	Расположение вертикальных электродов
Длина l, м	Размер b, мм	Сечение полосы, мм ²	
3	50x50x5	50x5	верхний конец ниже уровня земли на 0,8 м

Сопротивление растеканию для одного вертикального заземлителя $R_{овэ}$ (Ом) определяется по формуле:

$$R_{\text{огэ}} = \frac{\rho_{\text{пв}}}{2 \cdot \pi \cdot l} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot l}{d} \right) + 0,5 \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot t + l}{4 \cdot t - l} \right) \right] \quad (9.2)$$

где l – длина вертикального электрода, м;

d – диаметр (для угловой стали приведенный диаметр) вертикального электрода, м;

t – расстояние от поверхности до центра вертикального электрода, м.

Приведенный диаметр вертикального электрода d (м) из угловой стали определяется по формуле:

$$d = 0,95 \cdot b, \quad (9.3)$$

где b – ширина уголка, м.

Рассчитываем сопротивление растеканию для одного вертикального заземлителя.

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

$$t = 3 / 2 + 0,8 = 2,3 \text{ м}$$

$$R_{\text{огэ}} = \frac{170}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot 3}{0,0475} \right) + 0,5 \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot 2,3 + 3}{4 \cdot 2,3 - 3} \right) \right] = 60,962 \text{ Ом}$$

Расчетное число вертикальных электродов определяется по формуле:

$$n' = R_{\text{огэ}} / R_{\text{н}} \quad (9.4)$$

где $R_{\text{н}} = 4$ Ом – требуемое сопротивление искусственного заземлителя.

$$n' = 60,962 / 4 = 15,2$$

Полученное число округляем до ближайшего большего значения $n=16$ шт. Длина горизонтальной полосы определяется по формуле:

$$l_{\text{г}} = 1,05 \cdot a \cdot n \quad (9.5)$$

где a – расстояние между вертикальными электродами, м;

n – количество вертикальных электродов, шт.

$$a = l_{\text{пер}} / n \quad (9.6)$$

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

Периметр здания:

$$l_{\text{пер}} = 2 \cdot (144 + 66) = 420 \text{ м}$$

Расстояние между вертикальными электродами:

$$a = 420 / 16 = 26,25 \text{ м}$$

Длина горизонтальной полосы:

$$l_z = 1,05 \cdot 26,25 \cdot 16 = 441 \text{ м}$$

Определяем сопротивление растеканию горизонтальных электродов $R_{гэ}$ (Ом) по формуле:

$$R_{гэ} = \frac{\rho_{пз}}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left(\frac{l^2}{d \cdot t} \right) \quad (9.7)$$

где l - длина горизонтального электрода, м;

d – диаметр (для полосовой стали расчетный диаметр) электрода, м;

t - расстояние от поверхности до центра горизонтального электрода, м.

Расчетный диаметр горизонтального электрода d (м) из стальной полосы $50 \cdot 5$ мм определяется по формуле:

$$d = 0,5 \cdot b, \quad (9.8)$$

где b – ширина полосы, м.

Рассчитываем сопротивление растеканию для горизонтального заземлителя.

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

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

$$R_{гэ} = \frac{450}{2 \cdot 3,14 \cdot 441} \cdot \ln \left(\frac{441^2}{0,025 \cdot 0,825} \right) = 5,21 \text{ Ом}$$

Рассчитаем эквивалентное сопротивление группового заземлителя:

$$R_{гп} = \frac{R_{гэ} \cdot R_{гэ}}{R_{гэ} \cdot \eta_г \cdot n + R_{гэ} \cdot \eta_z} \quad (9.9)$$

где $\eta_г$ - коэффициент использования вертикальных электродов;

η_z - коэффициент использования горизонтальных электродов.

$$R_{гп} = \frac{60,962 \cdot 5,21}{60,962 \cdot 0,74 \cdot 16 + 5,21 \cdot 0,48} = 3,657 \text{ Ом}$$

Эквивалентное сопротивление группового заземлителя меньше допустимого согласно ПУЭ значения 4 Ом, т.е. удовлетворяет требованиям.

В итоге контур заземления состоит из 16 вертикальных электродов длиной 3 м из угловой стали 50x50x5 мм, расстояние между вертикальными электродами 26,25 м; верхний конец ниже уровня земли; на глубине 0,8 м вертикальные электроды соединены горизонтальной стальной полосой 50x5 мм.

9.2 Расчет системы молниезащиты

Исходя из большой относительной длины здания, принимаем тип системы молниезащиты: двойной тросовой молниеотвод на крыше. Разделив площадь защиты на 4 части по ширине и на 8 частей по длине, принимаем к установке 14 стержневых молниеотводов.

Так как стержневые молниеотводы будут установлены на крыше здания, то в данном случае достаточно рассчитать зону защиты на уровне крыши. Высоту молниеотводов подбираем эмпирически, так, чтобы обеспечивалась защищенность объекта. Рассчитаем защитную зону двойного тросового молниеотвода на крыше. высота несущих опор $h=16,5$ м при расстоянии между несущими опорами $a=18$ м (по длине здания), $b=16,5$ м (по ширине здания).

Радиус конуса защиты для одного молниеотвода на уровне крыши определяется по формуле:

$$r_0 = 1,5 \cdot h \quad (9.10)$$

где h – высота стержневого молниеотвода, м.

Высоту стержневого молниеотвода подбираем эмпирически, так, чтобы обеспечивалась защищенность объекта, должно выполняться соотношение:

$$\sqrt{(A/4)^2 + (B/8)^2} < r_0 \quad (9.11)$$

где A – длина цеха, м;

B – ширина цеха, м.

Рассчитаем зону защиты для системы молниезащиты с несущими опорами высотой 16,5 м. Радиус конуса защиты для одного молниеотвода на уровне крыши определяется по формуле (9.10):

$$r_0 = 1,5 \cdot 16,5 = 24,75 \text{ м}$$

Проверяем обеспечение защиты по выражению (9.11):

$$\sqrt{(144 / 8)^2 + (66 / 4)^2} < 24,75$$

$$\sqrt{(18)^2 + (16,5)^2} < 24,75$$

$$24,42 \text{ м} < 24,75 \text{ м}$$

Условие соблюдается, защита обеспечивается. План контура заземления и системы молниезащиты с учетом полученных данных показан на рисунке 9.1.

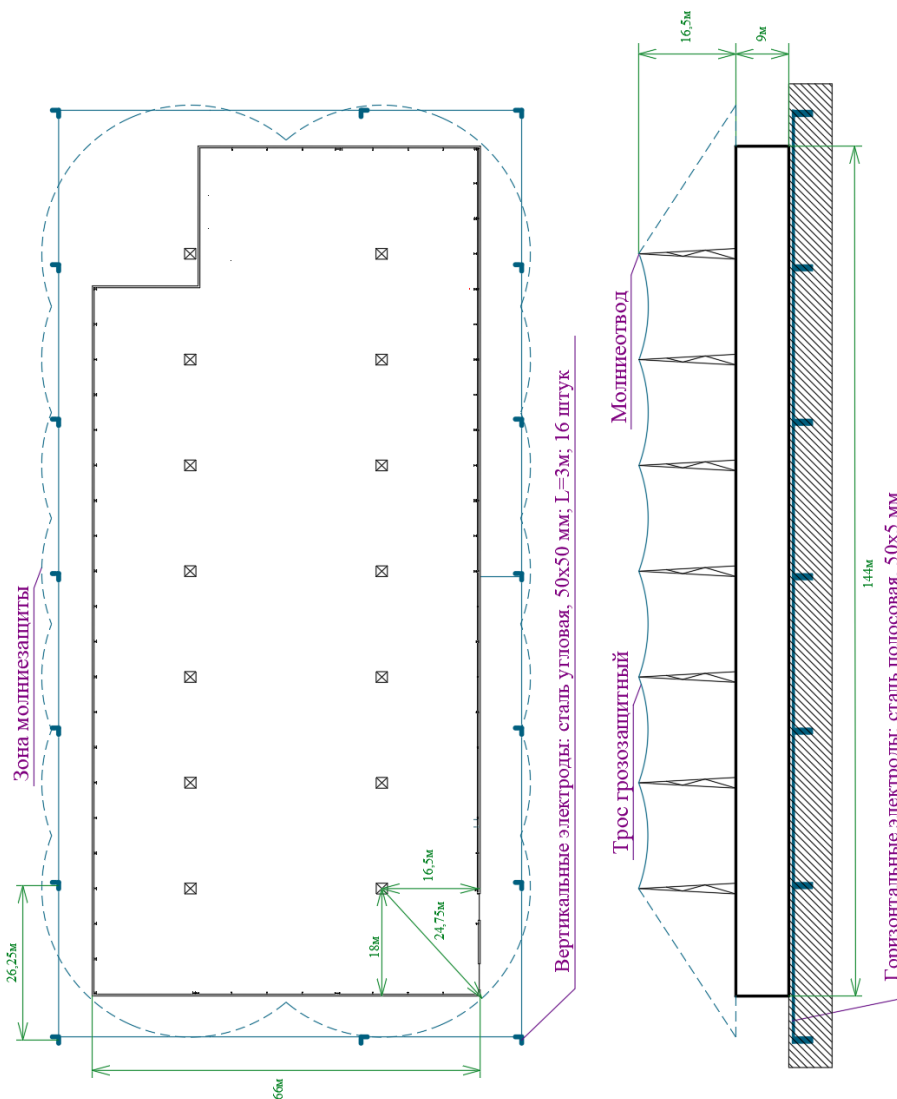


Рисунок 9.1– План контура заземления и системы молниезащиты

Заключение

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы рассчитан проект реконструкции системы электроснабжения механического производства ЗАО «Механоремонтный комплекс». Систематизированы характеристики электроприемников, выявлены недостатки действующей системы электроснабжения и предложены способы их устранения.

Рассчитаны нагрузки цеховой ТП с учетом компенсации реактивной мощности. Общая расчетная нагрузка составила 886, 589 кВА. Приняты к установке два силовых трансформатора марки ТМГ12-630 и две конденсаторные установки компенсации реактивной мощности АУКРМ-Е-0,4-180.

Цеховая ТП запитана от ГПП предприятия по КЛ 10 кВ, выполненной кабелем АПВП-3х16 мм². Распределительная сеть 0,4 кВ выполнена кабельными линиями с кабелем марки АВВГнг-LS. Кран-балки запитаны гибкими кабелями КГнг-LS в защитных кожухах. Линии освещения выполняются кабелями марки ВВГнг-LS. Линии силовой сети 0,4 кВ и линии осветительной сети защищаются автоматическими выключателями марки ВА. Для выбора и проверки коммутационного и защитного оборудования произведен расчет токов короткого замыкания. Были выбраны автоматические выключатели типа ВА-51-35 на стороне 0,4 кВ. На стороне 10 кВ выбраны вакуумные выключатели серии ВВ/TEL – 10/630, выключатели нагрузки типа ВНРп-10/400, трансформаторы тока типа ТПЛК.

Релейная защита и автоматика выполнена на основе микропроцессорного терминала «БМРЗ-101-Д-КЛ-01». Произведен расчет контура заземления и система молниезащиты.

Эксплуатационные и технико-экономические показатели проекта реконструкции системы электроснабжения механического производства ЗАО «Механоремонтный комплекс» соответствуют современным требованиям надежности, электробезопасности и энергоэффективности.

Список используемых источников

1. Андреев В. А. Релейная защита систем электроснабжения в примерах и задачах / В.А. Андреев. Москва: Высшая школа, 2014. 256 с.
2. Дубинский Г.Н. Наладка устройств электроснабжения напряжением выше 1000 В / Г.Н. Дубинский. Москва: Солон-Пресс, 2017. 538 с.
3. Дубинский Г.Н. Наладка устройств электроснабжения напряжением до 1000 В / Г.Н. Дубинский. Москва: Солон-Пресс, 2017. 400 с.
4. Конюхова Е.А. Электроснабжение объектов: Учебное пособие для среднего профессионального образования / Е.А. Конюхова. Москва: ИЦ Академия, 2013. 320 с.
5. Коробов Г.В. Электроснабжение. Курсовое проектирование / Г.В. Коробов. Санкт-Петербург: Лань, 2016. 192 с.
6. Копылов И.П. Справочник по электрическим машинам /И.П. Копылов. – Москва: Энергоатомиздат, 2016. 337 с.
7. Можаяева С.В. Экономика энергетического производства: Учебное пособие / С.В. Можаяева. Санкт-Петербург: Лань, 2017. 208 с.
8. Полуянович Н. К. Монтаж, наладка, эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий / Н.К. Полуянович. – Москва: Лань, 2012. 400 с.
9. Почаевец В.С. Электрические подстанции: учебник для техникумов ж.–д. трансп. / В.С. Почаевец. – Москва: Энергоатомиздат, 2018. 512 с.
10. Свириденко Э. А. Основы электротехники и электроснабжения / Э.А. Свириденко, Ф.Г. Китунович. Москва: Техноперспектива, 2016. 436 с.
11. Сибикин Ю.Д. Электроснабжение: Учебное пособие / Ю.Д. Сибикин. Москва: РадиоСофт, 2018. 328 с.
12. Смирнов А.Д. Справочная книжка энергетика / А.Д. Смирнов. Москва: Энергоатомиздат, 2018. 553 с.
13. Стромиллова Н.А. Организация, планирование и управление энергетикой / Н.А. Стромиллова. Москва: Лань, 2015. 130 с.

14. Анчарова Т.В. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений / Т.В. Анчарова, Е.Д. Стебунова, М.А. Рашевская. Вологда: Инфра-Инженерия, 2016. 416 с.
15. Гуревич Ю.Е. Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя / Ю.Е. Гуревич, К.В. Кабиков. Москва: Торус Пресс, 2015. 408 с.
16. Немировский А.Е. Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций: учебное пособие / Немировский А. Е., Сергиевская И. Ю. – 4-е год., доп. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. 174 с.
17. Федоров А.А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / А.А. Федоров, В.В. Каменова. Москва: Энергоатомиздат, 2016. 330 с.
18. Правила устройства электроустановок, издание 7: официальное издание: утв. Министерством энергетики Российской Федерации, приказ от 8 июля 2002 г. N 204. Москва: МОРКнига, 2019. 584 с.
19. Проектная документация «Реконструкция электроснабжения механического производства ЗАО «Механоремонтный комплекс» – Магнитогорск, 2016. 75 с.
20. Школа электрика: сайт. – URL: <http://electricalschool.info/> (дата обращения: 21.03.2020). – Режим доступа: для авториз. пользователей. – Текст: электронный.
21. Современные технологии производства: сайт. – URL: <https://extxe.com/> (дата обращения: 22.03.2020). – Режим доступа: для авториз. пользователей. – Текст: электронный.
22. Energy Systems. Архитектура, дизайн, инженерия: сайт. – URL: <https://energy-systems.ru/> (дата обращения: 23.03.2020). – Режим доступа: для авториз. пользователей. – Текст: электронный.

Приложение А

Расчет токов короткого замыкания в точке КЗ

Таблица А.1 – Расчет токов короткого замыкания в точке КЗ (минимальный режим)

№ ЭП	Rк, мОм	Xк, мОм	Zк, мОм	Ky	Iк ⁽³⁾ , кА	iу, кА	Iк ⁽²⁾ , кА	Zп, мОм	Iк ⁽¹⁾ , кА
РП-1									
2	70,04	64,70	95,35	1,3	2,301	4,24	1,99	54,79	2,884
3	70,48	64,79	95,74	1,3	2,292	4,21	1,98	55,17	2,869
4	77,64	66,22	102,05	1,3	2,150	3,95	1,86	61,49	2,651
5	84,82	67,66	108,50	1,3	2,022	3,72	1,75	67,94	2,460
9	75,24	65,74	99,92	1,3	2,196	4,04	1,90	59,35	2,721
10	70,30	64,76	95,58	1,3	2,295	4,22	1,99	55,02	2,875
11	51,60	61,02	79,91	1,3	2,746	5,05	2,38	39,35	3,616
12	67,67	64,23	93,30	1,3	2,352	4,32	2,04	52,74	2,963
37	60,52	62,80	87,22	1,3	2,516	4,62	2,18	46,65	3,228
38	78,51	66,40	102,82	1,3	2,134	3,92	1,85	62,26	2,627
39	93,00	69,30	115,98	1,3	1,892	3,48	1,64	75,42	2,270
ΣРП-1	46,91	60,08	76,22	1,3	2,88	5,29	2,49	39,44	3,61
РП-2									
6	47,84	60,26	76,94	1,3	2,851	5,24	2,47	36,38	3,801
7	60,03	62,70	86,81	1,3	2,527	4,65	2,19	46,24	3,248
8	65,16	63,73	91,14	1,3	2,407	4,42	2,08	50,58	3,052
13	75,97	65,89	100,56	1,3	2,182	4,01	1,89	60,00	2,699
14	70,35	64,77	95,62	1,3	2,294	4,22	1,99	55,06	2,874
15	65,29	63,75	91,26	1,3	2,404	4,42	2,08	50,69	3,047
16	55,82	61,86	83,32	1,3	2,633	4,84	2,28	42,76	3,424
21	68,94	64,48	94,40	1,3	2,324	4,27	2,01	53,84	2,920
22	62,71	63,24	89,06	1,3	2,463	4,53	2,13	48,50	3,143
34	492,08	149,11	514,18	1,3	0,427	0,78	0,37	473,62	0,444
35	243,92	99,48	263,43	1,3	0,833	1,53	0,72	222,86	0,900
ΣРП-2	47,82	60,26	76,93	1,3	2,852	5,24	2,47	36,37	3,802
РП-3									
17	86,53	68,00	110,05	1,3	1,994	3,66	1,73	69,49	2,418
18	79,71	66,64	103,90	1,3	2,112	3,88	1,83	63,33	2,593
19	76,00	65,90	100,59	1,3	2,181	4,01	1,89	60,03	2,698

Продолжение таблицы А.1

20	81,36	66,97	105,38	1,3	2,082	3,83	1,80	64,81	2,549
23	71,19	64,93	96,36	1,3	2,277	4,19	1,97	55,79	2,846
24	69,52	64,60	94,90	1,3	2,312	4,25	2,00	54,34	2,901
25	78,26	66,35	102,60	1,3	2,138	3,93	1,85	62,04	2,634
26	86,05	67,91	109,62	1,3	2,001	3,68	1,73	69,06	2,429
27	109,91	72,68	131,77	1,3	1,665	3,06	1,44	91,20	1,952
28	85,82	67,86	109,41	1,3	2,005	3,69	1,74	68,85	2,435
29	77,97	66,29	102,34	1,3	2,144	3,94	1,86	61,78	2,642
36	176,91	86,08	196,74	1,3	1,115	2,05	0,97	156,18	1,238
ΣРП-3	48,88	60,47	77,76	1,3	2,822	5,19	2,44	37,19	3,748
РП-4									
30	55,43	61,78	83,00	1,3	2,643	4,86	2,29	42,44	3,441
31	140,91	78,88	161,49	1,3	1,359	2,50	1,18	120,92	1,545
32	151,33	80,96	171,63	1,3	1,278	2,35	1,11	131,07	1,442
33	312,72	113,24	332,59	1,3	0,660	1,21	0,57	292,03	0,702
40	52,26	65,35	83,68	1,3	2,622	4,82	2,27	58,11	2,763
ΣРП-4	51,35	60,97	79,71	1,3	2,752	5,06	2,38	39,15	3,628

Таблица А.2— Расчет токов короткого замыкания в точке КЗ (максимальный режим)

№ ЭП	Rк, мОм	Xк, мОм	Zк, мОм	Ky	Iк ⁽³⁾ , кА	iу, кА	Iк ⁽²⁾ , кА	Zп, мОм	Iк ⁽¹⁾ , кА
РП-1									
2	67,91	42,12	79,91	1,3	2,746	5,06	2,38	39,35	3,616
3	68,35	42,21	80,33	1,3	2,731	5,02	2,37	39,77	3,591
4	75,51	43,64	87,21	1,3	2,516	4,62	2,18	46,65	3,228
5	82,69	45,08	94,18	1,3	2,330	4,28	2,02	53,61	2,929
9	73,11	43,16	84,90	1,3	2,584	4,75	2,24	44,33	3,342
10	68,17	42,17	80,16	1,3	2,737	5,03	2,37	39,60	3,601
11	49,47	38,43	62,64	1,3	3,502	6,44	3,03	22,08	5,048
12	65,54	41,65	77,65	1,3	2,825	5,19	2,45	37,09	3,755
37	58,39	40,22	70,90	1,3	3,095	5,69	2,68	30,33	4,244
38	76,38	43,81	88,05	1,3	2,492	4,58	2,16	47,49	3,189
39	90,87	46,71	102,17	1,3	2,147	3,95	1,86	61,61	2,647
РП-2									
6	45,71	37,68	59,24	1,3	3,704	6,81	3,21	18,67	5,476

Продолжение таблицы А.2

7	57,90	40,12	70,44	1,3	3,115	5,73	2,70	29,88	4,282
8	63,03	41,14	75,27	1,3	2,915	5,36	2,52	34,71	3,914
13	73,84	43,31	85,60	1,3	2,563	4,71	2,22	45,04	3,306
14	68,22	42,18	80,21	1,3	2,735	5,03	2,37	39,64	3,598
15	63,16	41,17	75,39	1,3	2,910	5,35	2,52	34,83	3,906
16	53,69	39,28	66,52	1,3	3,298	6,06	2,86	25,96	4,636
21	66,81	41,90	78,86	1,3	2,782	5,11	2,41	38,30	3,679
22	60,58	40,65	72,95	1,3	3,007	5,53	2,60	32,39	4,082
34	489,95	126,53	506,02	1,3	0,434	0,80	0,38	465,46	0,452
35	241,79	76,90	253,72	1,3	0,865	1,59	0,75	213,16	0,938
ПП-3									
17	84,40	45,42	95,84	1,3	2,289	4,21	1,98	55,28	2,865
18	77,58	44,05	89,21	1,3	2,459	4,52	2,13	48,65	3,136
19	73,87	43,31	85,63	1,3	2,562	4,71	2,22	45,07	3,305
20	79,23	44,38	90,81	1,3	2,416	4,44	2,09	50,25	3,066
23	69,06	42,35	81,01	1,3	2,708	4,98	2,35	40,45	3,551
24	67,39	42,02	79,41	1,3	2,763	5,08	2,39	38,85	3,645
25	76,13	43,76	87,81	1,3	2,499	4,59	2,16	47,25	3,200
26	83,92	45,32	95,37	1,3	2,300	4,23	1,99	54,81	2,883
27	107,78	50,09	118,85	1,3	1,846	3,39	1,60	78,29	2,205
28	83,69	45,28	95,15	1,3	2,306	4,24	2,00	54,59	2,891
29	75,84	43,71	87,53	1,3	2,507	4,61	2,17	46,97	3,213
36	174,78	63,49	185,95	1,3	1,180	2,17	1,02	145,39	1,318
ПП-4									
30	53,30	39,20	66,16	1,3	3,316	6,10	2,87	25,60	4,671
31	138,78	56,29	149,76	1,3	1,465	2,69	1,27	109,20	1,683
32	149,20	58,38	160,21	1,3	1,369	2,52	1,19	119,65	1,559
33	310,59	90,66	323,55	1,3	0,678	1,25	0,59	282,99	0,723
40	50,13	42,76	65,89	1,3	3,330	6,12	2,88	40,33	3,558