

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)

Цифровые технологии в электроэнергетике

(направленность (профиль) / специализация)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Интеграция цифрового управления в систему электроснабжения организации

Обучающийся

Д.О. Бирюков

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., О.В. Самолина

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

Консультант

А.В. Прошина

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

Тольятти 2025

Аннотация

В выпускной квалификационной работе представлены результаты по интеграция цифровых устройств в систему электроснабжения такой организации как «Озон Медика».

Актуальность работы заключается в том, что интеграция цифровых устройств даёт возможность обеспечить надёжность и безопасность производств, произвести оптимизацию управления и повысить эффективность работы предприятий.

Необходимость в интеграции цифровых устройств возникла из-за того, что развитие технологий не стоит на месте, и для повышения качества и скорости производства всё чаще используется автоматика и автоматизация. Так как человек не способен поспеть за скоростью обработки информации системой, то было принято решения переложить на него роль элемента, контролирующего и отслеживающего работу самой системы автоматизации, и имеющего возможность вносить необходимые корректировки. Использование системы управления «SCADA» позволит отслеживать состояния энергосистемы без необходимости покидать диспетчерскую и, при этом, получать самую актуальную информацию по потреблению энергии, а также управлять системой при помощи взаимодействия с элементами управления оборудования.

Выпускная квалификационная работа содержит 9 разделов и занимает 69 страниц. Содержит 11 таблиц и 9 рисунков. Графическая часть состоит из 6 чертежей формата А1.

Abstract

The final qualification work presents the results of integrating digital devices into the power supply system of an organization such as "Ozon Medica."

The relevance of the work lies in the fact that the integration of digital devices makes it possible to ensure the reliability and safety of production, optimize management, and improve the efficiency of enterprises.

The need for integrating digital devices arose because technological development is constantly advancing, and automation is increasingly being used to enhance production quality and speed. Since humans cannot keep up with the speed at which systems process information, it was decided to assign them the role of monitoring and tracking the operation of the automation system itself, with the ability to make necessary adjustments.

The use of a "SCADA" control system will allow monitoring the state of the power system without leaving the control room while receiving the most up-to-date information on energy consumption. It also enables system control through interaction with equipment control elements.

The graduation thesis consists of 9 sections and spans 69 pages. It includes 11 tables and 9 figures. The graphical part comprises 6 A1-format drawings.

Содержание

Введение.....	5
1 Характеристика объекта выпускной квалификационной работы.....	7
2 Информация по электроснабжению потребителей организации и возможности цифрового управления	11
3 Расчет электрических нагрузок	12
3.1 Исходные данные	12
3.2 Расчет нагрузок	12
4 Расчет и выбор трансформатора и компенсирующих устройств	26
4.1 Расчет и выбор числа и мощности трансформаторов	26
4.2 Расчет и выбор компенсирующих устройств.....	27
5 Расчет и выбор аппаратов защиты и проводников.....	30
5.1 Расчет и выбор аппаратов защиты	30
5.2 Расчет и выбор проводников	35
6 Расчет токов короткого замыкания	37
7 Проверка аппаратов защиты по токам короткого замыкания	49
8 Расчет заземления и молниезащиты	51
8.1 Расчет заземления	51
8.2 Расчет молниезащиты.....	55
9 Разработка предложений по цифровому управлению электроснабжения организации.....	58
Заключение	66
Список используемой литературы и используемых источников	68

Введение

В современном мире всё более важную роль играют цифровые технологии и автоматизация производственных процессов с их помощью. Интеграция цифровых устройств даёт возможность обеспечить надёжность и безопасность производств, произвести оптимизацию управления и повысить эффективность работы предприятий.

Энергетическую отрасль, как одну из самых важнейших в жизни человека и организаций, тоже не обошла стороной автоматизация. При помощи цифровых устройств, в которых применяются инновационные решения и подходы к получению, передаче команд управления, а также информационных пакетов, производится управление и отслеживание затрат электроэнергии.

В последнее десятилетие развитие промышленности меняется и всё больше ориентируется на отстранение человека от непосредственной работы, отводя ему роль оператора и диспетчера, чья основная деятельность заключается в отслеживании показаний систем учёта и контроля электроэнергии, а также отдающего команды при аварийных ситуациях.

Целью ВКР является повышение энергоэффективности данного производства.

Внедрение цифровых систем управления, учёта и передачи данных позволяет сократить не только время на получение информации о состоянии системы, но и время реагирования и корректировки процессов производства.

В данной работе осуществляется интеграция цифрового управления в систему электроснабжения такой организации как «Озон Медика», что и является главной целью работы, направленной на решение данной задачи, при помощи цифровых устройств.

Для достижения данной цели была получена техническая информация, содержащая в себе условия, предъявляемые к выбираемому оборудованию.

Исходя из цели работы были определены «объект и предмет исследования»:

– объект исследования представляет собой вводную систему электроснабжения предприятия;

– предмет исследования представляет собой электрическое оборудование и аппараты, схема электроснабжения объекта.

Актуальность данной работы определяется необходимостью модернизации системы электроснабжения с использованием цифровых устройств и систем управления для отслеживания работы предприятия, учёта электроэнергии и передачи данных, с последующим вводом в эксплуатацию.

Представленная пояснительная записка выполнена при помощи редактора документов «Microsoft Word».

Графическая часть работы выполнена при помощи отечественной системы автоматизированного проектирования (САПР) «Компас-3D», предназначенной для проектирования схем и чертежей. Данная часть содержит в себе чертежи, использованные для выполнения ВКР, а именно: принципиальная схема электроснабжения вводной части объекта; план объекта с обозначением Электрощитовой, в которой и будет размещено оборудование; план размещения оборудования в электрощитовой и вид спереди на располагаемое оборудование.

1 Характеристика объекта выпускной квалификационной работы

Объектом модернизации является завод по производству лекарственных средств «Озон Медика».

На первом этапе модернизации необходимо привести характеристику технологического процесса данного объекта.

Технологический процесс производства является установленной последовательностью действий и операций, взаимосвязанных между собой и направленных на получение итоговой продукции – лекарственных средств.

Ниже приведены этапы технологического процесса:

- поступление сырья.
- измельчение: исходный материал (например, лекарственные травы) измельчается до нужной фракции.
- гранулирование: измельчённый материал превращается в гранулы определённого размера и формы.
- сушка: гранулы высушиваются до определённой влажности.
- смешивание: ингредиенты (активные вещества, вспомогательные вещества) смешиваются в определённых пропорциях.
- прессование: смесь прессуется в таблетки или другие формы.
- покрытие: на таблетки наносится оболочка или плёнка для защиты и улучшения вкуса.
- фасовка и упаковка: таблетки фасуются в блистеры или другие упаковки и упаковываются в коробки.
- контроль качества: каждая партия продукции проходит контроль качества на соответствие стандартам и нормам.

Последовательность этапов технологического процесса изображена на рисунке 1.

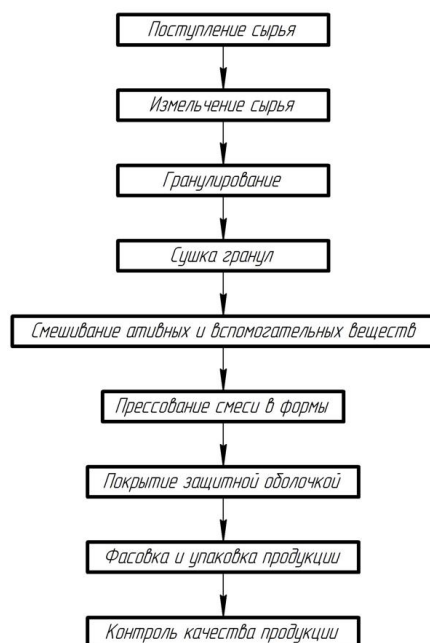


Рисунок 1 – Этапы технологического процесса производства

Технические условия:

- Организация работы по обеспечению качества, включая создание системы обеспечения качества, укомплектование квалифицированным персоналом, обеспечение необходимыми помещениями, оборудованием и материалами.

- Обеспечение качества разработки и производства лекарственных средств, включая соблюдение требований настоящего стандарта и других нормативных документов.

- Аттестация (испытания) критических стадий процессов производства и оборудования, контроль промежуточной продукции и технологического процесса.

- Выполнение утверждённых инструкций и методик для производства и контроля готовой продукции.

- Регулярная оценка эффективности системы обеспечения качества через проведение самоинспекций и/или аудитов качества.

Завод по производству лекарственной продукции относится ко 2й категории потребителей, а значит должен быть запитан от подстанции с

Непосредственным местом модернизации завода является электрощитовая, в которой будут располагать вводные распределительные устройства (далее ВРУ-1 и ВРУ-2) и низковольтное комплектное устройство вместе с уже установленными устройствами компенсации реактивной мощности.

В электрощитовую по кабельной линии к ВРУ-1 и ВРУ-2 подводится питающее напряжение 0,4 кВ и максимальная мощность составляет 1500 кВт. Обе ВРУ должны обеспечивать ввод и распределение электрической энергии по 1600 кВт, при этом номинальный ток одной секции для ВРУ-1 должен составлять 2500 А, а для ВРУ-2 1000 А. Оба устройства имеют номинальное напряжение в 380 В, напряжение изоляции 1000 В и частоту питающей сети 50 Гц.

Контроль электрических параметров на вводах будет производиться при помощи встроенных приборов, а технический учёт электроэнергии каждого отходящего фидера будет производиться через модули MODBUS RTU. Вводные устройства защиты – автоматические выключатели. ВРУ снабжены АВР, световой сигнализацией рабочего и аварийного состояния системы, а также положения вводных и секционных автоматических выключателей. Сами ВРУ по конструктивному исполнению являются напольными. Системы заземления: TN C и TN C S. Степень защиты IP33 и климатическое исполнение УХЛ4. Должен быть предусмотрен вывод показателей технического учёта в систему SCADA. ВРУ должны быть укомплектованы на каждую секцию шин УКРМ. Должна быть предусмотрена автоматизация ВРУ и иметь устройство вывода информации со всех отходящих фидеров. ВРУ должны иметь возможность быть отключены с подстанции через кнопку дистанционного отключения в случае пожара. ВРУ должны быть укомплектованы левым и правым шкафом ввода, секционным шкафом с двумя выводами, шкафами отходящих линий, комплектом сборных шин. Частота обновления значений на

мониторе должна быть не чаще чем раз в 10 секунд. На монитор на вводной ячейке ВРУ должен показывать мнемосхему с указанием состояния коммутационных аппаратов, линейные и фазные значения токов, напряжений, коэффициента мощности, а также значения активной и реактивной мощности с частотой выборки 1 раз в час.

НКУ является устройством, отвечающим за освещение в нормальном режиме работы предприятия и за аварийное освещение, в случае ЧП. Так как данное устройство имеет максимальную противопожарную защиту, а также подключено напрямую к кабелям 0,4 кВ, то в случае пожара в любой части комплекса и даже в самой щитовой, или любой другой чрезвычайной ситуации, на объекте будет работать освещение до тех пор, пока на подстанции не будет отключено напряжение, подаваемое на линию при помощи специальной кнопки.

Вывод по разделу:

Модернизация завода «Озон Медика» направлена на совершенствование технологического процесса производства лекарственных средств и модернизацию электрооборудования, в частности электрощитовой, для обеспечения бесперебойного и безопасного энергоснабжения.

Электрощитовая будет оснащена вводными распределительными устройствами на 2500 и 1000 А, низковольтным комплектным устройством, отвечающим за работу устройств при авариях на объекте и противопожарной защитой.

2 Информация по электроснабжению потребителей организации и возможности цифрового управления

Цифровое управление представляет собой использование современных информационных и операционных технологий для автоматизации, мониторинга и оптимизации производственных процессов, а также инженерных систем предприятия.

В первую очередь обеспечение ВРУ устройством АВР. Несмотря на то, что «Озон Медика» относится ко II категории безопасности, для повышения надёжности электроснабжения производства будет лучше снабдить вводное распределительное устройство оборудованием, позволяющим производить переключение на резервную линию электроснабжения.

Далее, вводятся умные счётчики и система АИИС КУЭ для более быстрой передачи данных по потреблению электроэнергии. Счётчики производят учёт потребления электроэнергии, а возможность передачи данных позволяет персоналу отслеживать работу системы в реальном времени.

Внедрение автоматизированных систем управления в виде SCADA (Supervision Control and Data Acquisition) – для диспетчеризации и контроля оборудования, а также DCS (Distributed Control System) – для управления технологическими процессами. Также внедрение данных систем сопровождается установкой датчиков и PLC (Programmable Logic Controller) – программируемыми контроллерами для автоматизации, передачи команд и информационных данных.

Вывод по разделу:

Внедрение цифрового управления на предприятии «Озон Медика» направлено на повышение надёжности и скорости передачи данных, эффективности, а также автоматизации производственных и инженерных процессов, что в свою очередь позволит повысить энергоэффективность предприятия.

3 Расчет электрических нагрузок

3.1 Исходные данные

Согласно полученным данным электроприёмники относятся ко 2-й категории электроснабжения, а значит, что комплектная трансформаторная подстанция (КТП) будет иметь 2 трансформатора. Трансформаторы должны быть одинаковой мощности, а нагрузка распределена в равной степени между секциями НН. Схема электроснабжения приведена на рисунке 2.

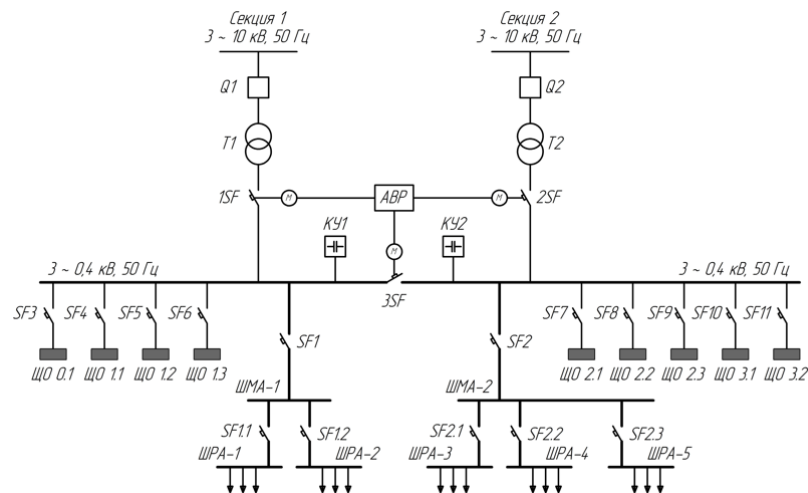


Рисунок 2 – Схема электроснабжения

3.2 Расчет нагрузок

Так как исходные параметры оборудования, как и его количество, известны, то производим расчет суммарной нагрузки одного вида оборудования. [3], [13].

$$\sum P_H = P_H \cdot n, \text{ кВт} \quad (1)$$

$$\sum P_H = 4 \cdot 8 = 32 \text{ кВт}$$

где P_H – номинальная мощность одной единицы оборудования, кВт;

n – количество единиц оборудования, шт.

Расчётная нагрузка освещения определяется по методу удельной мощности. [3], [15]. Нагрузка определяется по формуле 2:

$$P_{oy} = P_{уд} \cdot S, \text{ кВт} \quad (2)$$

$$P_{oy} = 10 \cdot 2775,02 \cdot 10^{-3} = 27,75 \text{ кВт}$$

где $P_{уд} = 10 \text{ Вт/м}^2$ – удельная мощность на 1 м^2 для производственных помещений;

S – площадь освещаемой территории, м^2 .

Производим распределение нагрузки по и заносим в таблицу 1

Таблица 1 – Распределение нагрузки по шинам низкого напряжения

Шина низкого напряжения №1	Приведенная нагрузка, кВт		Шина низкого напряжения №2
ЩО 0.1	67,23	29,74	ЩО 2.1
ЩО 1.1	27,75	19,4	ЩО 2.1
ЩО 1.2	19,14	18,63	ЩО 2.3
ЩО 1.3	19,12	20,12	ЩО 3.1
-	-	29,74	ЩО 3.2
ШМА - 1	-	-	ШМА - 2
Сушилка-гранулятов 4×16	64	16	Компьютеры 2×8
Перемешивающая машина 3×10	30	36	Стойка сервера 18×2
Смеситель-опудриватель 9×10	90	10	Стиральные машины 2,5×4
Вибрационный просеиватель 2×10	20	10	Машина сушки 2,5×4
Просеивающая мельница 2×2	4	144	Компрессор 24×6
Прессовочная машина 7×10	70	300	Чиллерная установка 75×4
Калибратор 2×2	4	70,4	Вентиляционная камера 8,8×8
Капсуляционная машина 3×14	42	30	Кондиционирование 15×2
Стерилизатор 4×4	16		
Кондиционирование 15×16	240		
Мешалка 3×6	18		
Сушильный шкаф 4×10	40		
Итого	771,24	734,03	Итого

Согласно распределению нагрузки заполняется таблица 2. [3].

Таблица 2 – Сводная ведомость нагрузок

Шинопровод	Наименование помещения	Наименование оборудования	Установленная нагрузка							Среднесменная нагрузка						Максимальная нагрузка			
			P_H , кВт	n, шт	$\sum P_H$, кВт	K_H	$\cos \phi$	$\operatorname{tg} \phi$	m	P_{CM} , кВт	Q_{CM} , квар	S_{CM} , кВА	n_{Σ}	K_M	K'_M	P_M , кВт	Q_M , квар	S_M , кВА	I_M , А
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1-й Этаж																			
Производственный корпус №1 (ШМА-1)																			
ШРА-1	Помещение сушки, гранулирования и перемешивания	Сушилка-гранулятор	4	8	32	0,92	0,8	0,75	-	29,4	22,01	36,8	-	-	-	-	-	-	-
		Перемешивающая машина	3	5	15	0,35	0,87	0,57	-	5,25	2,99	6,04	-	-	-	-	-	-	-
		Смеситель опудриватель	9	5	45	0,7	0,8	0,75	-	31,5	23,63	39,38	-	-	-	-	-	-	-
		Вибрационный просеиватель	2	5	10	0,2	0,75	0,88	-	2	1,76	2,66	-	-	-	-	-	-	-
		Просеивающая мельница	2	1	2	0,4	0,7	1,02	-	0,8	0,82	1,14	-	-	-	-	-	-	-
	Помещение таблетирования	Прессовочная машина	7	5	35	0,9	0,8	0,75	-	31,5	23,63	39,38	-	-	-	-	-	-	-
		Калибратор	2	1	2	0,5	0,5	1,73	-	1	1,73	1,99	-	-	-	-	-	-	-
	Помещение капсулирования	Капсуляционная машина	3	7	21	0,93	0,8	0,75	-	19,5	14,65	24,4	-	-	-	-	-	-	-
		Стерилизатор	4	1	4	0,5	0,9	0,48	-	2	0,96	2,22	-	-	-	-	-	-	-
	Временный склад	Кондиционер	15	2	30	0,9	0,8	0,75	-	27	20,25	33,75	-	-	-	-	-	-	-
	Склад готовой продукции	Кондиционер	15	4	60	0,9	0,8	0,75	-	54	40,5	67,5	-	-	-	-	-	-	-

Продолжение таблицы 2

Шинопровод	Наименование помещения	Наименование оборудования	Установленная нагрузка							Среднесменная нагрузка						Максимальная нагрузка			
			P_H , кВт	n, шт	$\sum P_H$, кВт	K_H	$\cos \phi$	$\operatorname{tg} \phi$	m	P_{CM} , кВт	Q_{CM} , квар	S_{CM} , кВА	n_{Σ}	K_M	K'_M	P_M , кВт	Q_M , квар	S_M , кВА	I_M , А
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ШРА-1	Помещение заготовки смеси	Мешалка	3	3	9	0,6	0,8	0,75	-	5,4	4,05	6,75	-	-	-	-	-	-	-
		Стерилизатор	4	1	4	0,5	0,9	0,48	-	2	0,96	2,22	-	-	-	-	-	-	-
		Сушильный шкаф	4	4	20	0,4	0,9	0,48	-	8	3,84	8,87	-	-	-	-	-	-	-
	Итого ШРА-1		-	53	289	0,76	0,8	0,74	7,5	219,4	161,8	272,7	39	1,05	1	230,4	161,84	281,6	427,8
Производственный корпус №2 (ШМА-1)																			
ШРА-2	Помещение сушки, гранулирования и перемешивания	Сушилка-гранулятор	4	8	32	0,92	0,8	0,75	-	29,4	22,01	36,8	-	-	-	-	-	-	-
		Перемешивающая машина	3	5	15	0,35	0,87	0,57	-	5,25	2,99	6,04	-	-	-	-	-	-	-
		Смеситель опудриватель	9	5	45	0,7	0,8	0,75	-	31,5	23,63	39,38	-	-	-	-	-	-	-
		Вибрационный просеиватель	2	5	10	0,2	0,75	0,88	-	2	1,76	2,66	-	-	-	-	-	-	-
		Просеивающая мельница	2	1	2	0,4	0,7	1,02	-	0,8	0,82	1,14	-	-	-	-	-	-	-
	Помещение таблетирования	Прессовочная машина	7	5	35	0,9	0,8	0,75	-	31,5	23,63	39,38	-	-	-	-	-	-	-
		Калибратор	2	1	2	0,5	0,5	1,73	-	1	1,73	1,99	-	-	-	-	-	-	-
	Помещение капсулирования	Капсуляционная машина	3	7	21	0,93	0,8	0,75	-	19,5	14,65	24,4	-	-	-	-	-	-	-
		Стерилизатор	4	1	4	0,5	0,9	0,48	-	2	0,96	2,22	-	-	-	-	-	-	-

Продолжение таблицы 2

Шинопровод	Наименование помещения	Наименование оборудования	Установленная нагрузка							Среднесменная нагрузка						Максимальная нагрузка			
			P _Н , кВт	n, шт	Σ P _Н , кВт	K _и	cos φ	tg φ	m	P _{см} , кВт	Q _{см} , квар	S _{см} , кВА	n _э	K _м	K' _М	P _м , кВт	Q _м , квар	S _м , кВА	I _м , А
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ШРА-2	Временный склад	Кондиционер	15	2	30	0,9	0,8	0,75	-	27	20,25	33,75	-	-	-	-	-	-	-
	Склад готовой продукции	Кондиционер	15	4	60	0,9	0,8	0,75	-	54	40,5	67,5	-	-	-	-	-	-	-
	Помещение заготовки смеси	Мешалка	3	3	9	0,6	0,8	0,75	-	5,4	4,05	6,75	-	-		-	-	-	-
		Стерилизатор	4	1	4	0,5	0,9	0,48	-	2	0,96	2,22	-	-	-	-	-	-	-
		Сушильный шкаф	4	4	20	0,4	0,9	0,48	-	8	3,84	8,87	-	-	-	-	-	-	-
Лабораторно-складской корпус (ШМА-1)																			
ШРА-2	Склад готовой продукции	Кондиционер	15	4	60	0,9	0,8	0,75	-	54	40,5	67,5	-	-	-	-	-	-	-
	Итого ШРА-2		-	57	349	0,78	0,8	0,74	7,5	273,4	202,34	340,15	47	1,04	1	284,4	202,3	349	530,2
Итого ШМА-1			-	110	638	0,77	0,8	0,75	7,5	492,8	369,5	615,9	85	1,02	1	502,7	369,5	623,9	947,9
Этаж №2																			
Производственный корпус №1 (ШМА-2)																			
ШРА-3	Серверная	Компьютеры	2	4	8	0,92	0,8	0,75	-	7,36	5,52	9,2	-	-	-	-	-	-	-
		Серверная стойка	18	1	18	0,35	0,87	0,57	-	6,3	3,59	7,25	-	-	-	-	-	-	-
	Помещение стирки	Стиральные машины	2,5	2	5	0,2	0,75	0,88	-	1	0,88	1,33	-	-	-	-	-	-	-
		Машины сушки	2,5	2	5	0,4	0,7	1,02	-	2	2,04	2,86	-	-	-	-	-	-	-
	Компрессорная	Компрессор	24	2	48	0,9	0,8	0,75	-	43,2	32,4	54	-	-	-	-	-	-	-

Продолжение таблицы 2

Шинопровод	Наименование помещения	Наименование оборудования	Установленная нагрузка							Среднесменная нагрузка						Максимальная нагрузка			
			P _Н , кВт	n, шт	Σ P _Н , кВт	K _и	cos φ	tg φ	m	P _{см} , кВт	Q _{см} , квар	S _{см} , кВА	n _э	K _м	K' _м	P _м , кВт	Q _м , квар	S _м , кВА	I _м , А
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ШРА-3	Помещение вентиляции	Чиллерная установка	75	2	150	0,5	0,5	1,73	-	75	129,75	149,87	-	-	-	-	-	-	-
		Вентиляционная камера	8,8	4	35,2	0,93	0,8	0,75	-	32,75	24,55	40,92	-	-	-	-	-	-	-
	Итого ШРА-3		-	17	269,2	0,62	0,64	1,19	37,5	167,6	198,73	259,97	4	1,29	1,1	216,2	218,6	307,5	467,1
Производственный корпус №2 (ШМА-2)																			
ШРА-4	Серверная	Компьютеры	2	4	8	0,92	0,8	0,75	-	7,36	5,52	9,2	-	-	-	-	-	-	-
		Серверная стойка	18	1	18	0,35	0,87	0,57	-	6,3	3,59	7,25	-	-	-	-	-	-	-
	Помещение стирки	Стиральные машины	2,5	2	5	0,2	0,75	0,88	-	1	0,88	1,33	-	-	-	-	-	-	-
		Машины сушки	2,5	2	5	0,4	0,7	1,02	-	2	2,04	2,86	-	-	-	-	-	-	-
	Компрессорная	Компрессор	24	2	48	0,9	0,8	0,75	-	43,2	32,4	54	-	-	-	-	-	-	-
	Помещение вентиляции	Чиллерная установка	75	1	75	0,5	0,5	1,73	-	37,5	64,88	74,93	-	-	-	-	-	-	-
		Вентиляционная камера	8,8	2	17,6	0,93	0,8	0,75	-	16,4	12,28	20,46	-	-	-	-	-	-	-
Лабораторно-складской корпус (ШМА-2)																			
ШРА-4	Помещение хранения реактивов	Кондиционер	15	2	30	0,9	0,8	0,75	-	27	20,25	33,75	-	-	-	-	-	-	-
	Итого ШРА-4		-	16	206,6	0,68	0,7	1,01	37,5	140,7	141,8	199,8	6	1,23	1,1	173,1	156	233	354,1

Продолжение таблицы 2

Шинопровод	Наименование помещения	Наименование оборудования	Установленная нагрузка							Среднесменная нагрузка						Максимальная нагрузка			
			P_H , кВт	n, шт	$\sum P_H$, кВт	$K_{и}$	$\cos \phi$	$\operatorname{tg} \phi$	m	$P_{см}$, кВт	$Q_{см}$, квар	$S_{см}$, кВА	$n_{э}$	K_M	K'_M	P_M , кВт	Q_M , квар	S_M , кВА	I_M , А
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Этаж №3																			
Лабораторно-складской корпус (ШМА-2)																			
ШРА-5	Компрессорная	Компрессор	24	2	48	0,9	0,8	0,75	-	43,2	32,4	54	-	-	-	-	-	-	-
	Помещение вентиляции	Чиллерная установка	75	1	75	0,5	0,5	1,73	-	37,5	64,88	74,93	-	-	-	-	-	-	-
		Вентиляционная камера	8,8	2	17,6	0,93	0,8	0,75	-	16,4	12,28	20,46	-	-	-	-	-	-	-
	Итого ШРА-5			-	5	140,6	0,69	0,66	1,13	8,5	97,1	109,6	146,4	4	1,29	1,1	125,2	120,5	173,8
Итого ШМА-2			-	38	616,4	0,66	0,67	1,11	37,5	405,4	450,2	605,8	16	1,12	1	454,04	450,12	639,3	971,4
ШНН	ЩО 0.1		-	-	67,2	0,85	0,95	0,33	-	57,2	18,9	60,2	-	-	-	57,2	18,9	60,2	91,4
	ЩО 1.1		-	-	27,8	0,85	0,95	0,33	-	23,6	7,8	24,8	-	-	-	23,6	7,8	24,8	37,7
	ЩО 1.2		-	-	19,1	0,85	0,95	0,33	-	16,3	5,4	17,1	-	-	-	16,3	5,4	17,1	26
	ЩО 1.3		-	-	19,1	0,85	0,95	0,33	-	16,3	5,4	17,1	-	-	-	16,3	5,4	17,1	26
	ЩО 2.1		-	-	29,7	0,85	0,95	0,33	-	25,3	8,3	26,6	-	-	-	25,3	8,3	26,6	40,4
	ЩО 2.2		-	-	19,4	0,85	0,95	0,33	-	16,5	5,4	17,4	-	-	-	16,5	5,4	17,4	26,4
	ЩО 2.3		-	-	18,6	0,85	0,95	0,33	-	15,8	5,2	16,7	-	-	-	15,8	5,2	16,7	25,3
	ЩО 3.1		-	-	20,1	0,85	0,95	0,33	-	17,1	5,6	18	-	-	-	17,1	5,6	18	27,4
	ЩО 3.2		-	-	29,7	0,85	0,95	0,33	-	25,3	8,3	26,6	-	-	-	25,3	8,3	26,6	40,4
-	Всего на ШНН		-	-	-	-	-	-	-	1111,5	890	1423,9	-	-	-	1169,9	890	1470	2233,5
-	Потери		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29,4	147	149,9	-
-	Всего на ВН		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,69	1037	1585,5	-

Колонки 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 в таблице 2 заполняются по исходным данным. [3].

Колонка 4 заполняется для всех видов оборудования, кроме освещения, по формуле 1, для ЩО используется формула 2. [3].

Среднесменная мощность оборудования для групп одинаковых электроприёмников находится по формуле 3 и заносится в колонку 11. [3].

$$P_{\text{см}} = K_{\text{И}} \cdot \sum P_{\text{Н}}, \text{ кВт} \quad (3)$$

$$P_{\text{см}} = 0,92 \cdot 32 = 29,44 \text{ кВт}$$

где $K_{\text{И}}$ – коэффициент использования оборудования.

Колонка 12, для групп электроприёмников, заполняется по формуле 4:

$$Q_{\text{см}} = P_{\text{см}} \cdot \tan \varphi, \text{ квар} \quad (4)$$

$$Q_{\text{см}} = 29,44 \cdot 0,75 = 22,08 \text{ квар}$$

Значения колонки 13 для групп электрооборудования и шинопроводов определяются по формуле 5:

$$S_{\text{см}} = \sqrt{P_{\text{см}}^2 + Q_{\text{см}}^2} \quad (5)$$

$$S_{\text{см}} = \sqrt{29,44^2 + 22,08^2} = 36,8 \text{ кВА}$$

Дальнейшие расчёты производятся для ШМА и ШРА.

Колонка 10 заполняется по формуле 6:

$$m = \frac{P_{\text{н.нб}}}{P_{\text{н.нм}}} \quad (6)$$

$$m = \frac{15}{2} = 7,5$$

где $P_{\text{н.нб}}$ – наибольшая мощность одного электроприёмника среди электроприёмников на шинопроводе;

$P_{н.нм.}$ – наименьшая мощность одного электроприёмника среди электроприёмников на шинопроводе.

В колонку 5 вносим число, согласно формуле 7:

$$n_{шра-1} = \sum n \quad (7)$$

$$n_{шра-1} = 8+5+5+5+1+5+1+7+1+2+3+1+5+4 = 53$$

Колонка 6 заполняется по формуле 8:

$$P_{н.шра-1} = \sum P_{н}, \text{ кВт} \quad (8)$$

$$P_{н.шра-1} = 32+15+45+10+2+35+2+21+4+30+9+4+20+60 = 289 \text{ кВт}$$

Колонки 11 и 12 заполняются по формулам 9 и 10:

$$P_{см.шра-1} = \sum P_{см}, \text{ кВт} \quad (9)$$

$$P_{см.шра-1} = 29,44+5,25+31,5+2+0,8+31,5+1+19,53+2+27+5,4+2+8+54 = \\ = 219,42 \text{ кВт}$$

$$Q_{см.шра-1} = \sum Q_{см}, \text{ квар} \quad (10)$$

$$Q_{см.шра-1} = 22,01+2,99+23,6+1,8+0,82+23,6+1,7+14,7+0,96+20,3+ \\ +4,1+0,96+3,84+40,5 = 161,84 \text{ квар}$$

Колонка 13 заполняется по формуле 11:

$$S_{см.шра-1} = \sqrt{P_{см.шра-1}^2 + Q_{см.шра-1}^2}, \text{ кВА} \quad (11)$$

$$S_{см.шра-1} = \sqrt{219,42^2 + 161,84^2} = 272,7 \text{ кВА}$$

Колонки 7, 8 и 9 заполняются по формулам 12, 13 и 14:

$$K_{и.шра-1} = \frac{P_{см.шра-1}}{P_{н.шра-1}} \quad (12)$$

$$K_{и.шра-1} = \frac{219,42}{289} = 0,76$$

$$\cos \varphi_{шра-1} = \frac{P_{см.шра-1}}{S_{см.шра-1}} \quad (13)$$

$$\cos \varphi_{шра-1} = \frac{219,42}{272,7} = 0,8$$

$$\tan \varphi_{шра-1} = \frac{Q_{см.шра-1}}{P_{см.шра-1}} \quad (14)$$

$$\tan \varphi_{шра-1} = \frac{161,84}{219,42} = 0,74$$

Значение n_3 определяется по формуле из таблицы 3

Таблица 3 – Упрощенные варианты определения n_3

n	$K_{и}$	m	$P_{н}$	Формула для n_3
1	2	3	4	5
< 5	$\geq 0,2$	≥ 3	Переменная	$n_3 = \frac{\left(\sum_1^n P_{н} \right)^2}{\sum_1^n P_{н}^2}$
≥ 5	$\geq 0,2$	≥ 3	Постоянная	$n_3 = n$
≥ 5	$\geq 0,2$	< 3	Переменная	$n_3 = n$
≥ 5	< 0,2	< 3		n_3 не определяется, а $P_{м} = K_3 P_{н.Σ}$, где K_3 – коэффициент загрузки $K_{3(пкр)} = 0,75$ (повторно-кратковременный режим) $K_{3(др)} = 0,9$ (длительный режим) $K_{3(ар)} = 1$ (автоматический режим)
≥ 5	$\geq 0,2$	≥ 3		$n_3 = \frac{2 \sum_1^n P_{н}}{P_{н.нб}}$
≥ 5	< 0,2	≥ 3		Применяются относительные единицы: $n_3 = n_3^* n$; $n_3^* = F(n^*, P^*)$; $n^* = \frac{n_1}{n}$; $P^* = \frac{P_{н1}}{P_{н.н}}$
> 300	$\geq 0,2$	≥ 3	–	$n_3 = n$

Согласно полученным результатам, используем формулу 15:

$$n_{\text{э.шра-1}} = \frac{2 \cdot P_{\text{н.шра-1}}}{P_{\text{н.нб}}} \quad (15)$$

$$n_{\text{э.шра-1}} = \frac{2 \cdot 289}{15} = 39$$

Полученное значение $n_{\text{э}}$ вносим в колонку 14.

В колонку 15 вносим значение, найденное по таблице 4.

Таблица 4 – Зависимость $K_{\text{м}} = F(n_{\text{э}}, K_{\text{и}})$

$n_{\text{э}}$	Коэффициент использования, $K_{\text{и}}$									
	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
4	3,43	3,22	2,64	2,14	1,87	1,65	1,46	1,29	1,14	1,05
5	3,23	2,87	2,42	2	1,76	1,57	1,41	1,26	1,12	1,04
6	3,04	2,64	2,24	1,88	1,66	1,51	1,37	1,23	1,1	1,04
7	2,88	2,48	2,1	1,8	1,58	1,45	1,33	1,21	1,09	1,04
8	2,72	2,31	1,99	1,72	1,52	1,4	1,3	1,2	1,08	1,04
9	2,56	2,2	1,9	1,65	1,47	1,37	1,28	1,18	1,08	1,03
10	2,42	2,1	1,84	1,6	1,43	1,34	1,26	1,16	1,07	1,03
12	2,24	1,96	1,75	1,52	1,36	1,28	1,23	1,15	1,07	1,03
14	2,1	1,85	1,67	1,45	1,32	1,25	1,2	1,13	1,07	1,03
16	1,99	1,77	1,61	1,41	1,28	1,23	1,18	1,12	1,07	1,03
18	1,91	1,7	1,55	1,37	1,26	1,21	1,16	1,11	1,06	1,03
20	1,84	1,65	1,5	1,34	1,24	1,2	1,15	1,11	1,06	1,03
25	1,71	1,55	1,4	1,28	1,21	1,17	1,14	1,1	1,06	1,03
30	1,62	1,46	1,34	1,24	1,19	1,16	1,13	1,1	1,05	1,03
35	1,55	1,41	1,3	1,21	1,17	1,15	1,12	1,09	1,05	1,02
40	1,5	1,37	1,27	1,19	1,15	1,13	1,12	1,09	1,05	1,02
45	1,45	1,33	1,25	1,17	1,14	1,12	1,11	1,08	1,04	1,02
50	1,4	1,3	1,23	1,16	1,14	1,11	1,1	1,08	1,04	1,02
60	1,32	1,25	1,19	1,14	1,12	1,1	1,09	1,07	1,03	1,02
70	1,27	1,22	1,17	1,12	1,1	1,1	1,09	1,06	1,03	1,02
80	1,25	1,2	1,15	1,11	1,1	1,1	1,08	1,06	1,03	1,02
90	1,23	1,18	1,13	1,1	1,09	1,09	1,08	1,06	1,02	1,02
100	1,21	1,17	1,12	1,1	1,08	1,08	1,07	1,05	1,02	1,02

В колонку 16 вносим значение, в соответствии с практикой проектирования, т.е. $K'_{\text{м}}$ принимается 1,1 при $n_{\text{э}} \leq 10$ или же 1, при $n_{\text{э}} > 10$.

Далее рассчитываем максимальные значения мощностей по формулам 16, 17 и 18:

$$P_M = K_M \cdot P_{\text{см.шпа-1}}, \text{ кВт} \quad (16)$$

$$P_M = 219,42 \cdot 1,05 = 230,4 \text{ кВт}$$

$$Q_M = K'_M \cdot Q_{\text{см.шпа-1}}, \text{ квар} \quad (17)$$

$$Q_M = 161,84 \cdot 1 = 161,84 \text{ квар}$$

$$S_M = \sqrt{P_M^2 + Q_M^2}, \text{ кВА} \quad (18)$$

$$S_M = \sqrt{230,4^2 + 161,84^2} = 281,6 \text{ кВА}$$

Полученные значения заносим в колонки 17, 18 и 19 соответственно.

Следующим действием для ШМА (ШРА) и ЩО находим максимальное значение тока по формуле 19:

$$I_M = \frac{S_M}{\sqrt{3} \cdot U_L}, \text{ А} \quad (19)$$

$$I_M = \frac{281,6}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 427,8 \text{ А}$$

где $U_L = 0,38 \text{ кВ}$ – линейное напряжение трёхфазной сети

Аналогично производим вычисления и выбор значений для остальных ШМА (ШРА) и ЩО, с последующим занесением полученных значений в таблицу 2. [3], [13].

Далее находим среднесменные значения мощностей на шинах низкого напряжения формулам 20, 21 и 22:

$$P_{\text{см.шнн}} = P_{\text{см.шма-1}} + P_{\text{см.шма-2}} + \sum P_{\text{см.щО}}, \text{ кВт} \quad (20)$$

$$P_{\text{см.шнн}} = 492,84 + 405,4 + 57,12 + 23,6 + 16,3 + 16,3 + 25,3 + 16,5 + 15,8 + 17,1 + 25,3 = 1111,5 \text{ кВт}$$

$$Q_{\text{см.шнн}} = Q_{\text{см.шма-1}} + Q_{\text{см.шма-2}} + \sum Q_{\text{см.щО}}, \text{ квар} \quad (21)$$

$$Q_{\text{см.шнн}} = 369,5 + 450,12 + 18,9 + 7,8 + 5,4 + 5,4 + 8,3 + 5,4 + 5,2 + 5,7 + 8,3 = 890,02 \text{ квар}$$

$$S_{\text{см.шнн}} = \sqrt{P_{\text{см.шнн}}^2 + Q_{\text{см.шнн}}^2}, \text{ кВА} \quad (22)$$

$$S_{\text{см.шнн}} = \sqrt{1111,5^2 + 890,02^2} = 1423,9 \text{ кВА}$$

Находим максимальные значения мощностей на шинах низкого напряжения (ШНН).

$$P_{\text{м.шнн}} = P_{\text{м.шма-1}} + P_{\text{м.шма-2}} + \sum P_{\text{м.щО}}, \text{ кВт} \quad (23)$$

$$P_{\text{м.шнн}} = 502,7 + 454,04 + 57,12 + 23,6 + 16,3 + 16,2 + 25,3 + 16,5 + 15,8 + 17,1 + 25,3 = 1169,98 \text{ кВт},$$

$$Q_{\text{м.шнн}} = Q_{\text{м.шма-1}} + Q_{\text{м.шма-2}} + \sum Q_{\text{м.щО}}, \text{ квар} \quad (24)$$

$$Q_{\text{м.шнн}} = 369,5 + 450,12 + 18,9 + 7,8 + 5,4 + 5,4 + 8,3 + 5,4 + 5,2 + 5,6 + 8,3 = 890,02 \text{ квар},$$

$$S_{\text{м.шнн}} = \sqrt{P_{\text{м.шнн}}^2 + Q_{\text{м.шнн}}^2}, \text{ кВА}, \quad (25)$$

$$S_{\text{м.шнн}} = \sqrt{1169,98^2 + 890,02^2} = 1470 \text{ кВА}.$$

Рассчитываем максимальный ток на ШНН по формуле 19 и заносим результат колонку 20 в таблице. [3], [15].

Далее определяем значения потерь в трансформаторе и заносим результаты вычислений в колонки 17, 18 и 19.

$$\Delta P_T = 0,02 S_{\text{м(НН)}}, \text{ кВт}, \quad (26)$$

$$\Delta P_T = 0,02 \cdot 1470 = 29,4 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_T = 0,1 S_{\text{м(НН)}}, \text{ квар}, \quad (27)$$

$$\Delta Q_T = 0,1 \cdot 1470 = 147 \text{ квар},$$

$$\Delta S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2}, \text{ А}, \quad (28)$$

$$\Delta S_T = \sqrt{29,4^2 + 147^2} = 149,91 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

После нахождения потерь производим расчёт максимальных значений мощностей на высокой стороне, а после полученные значения заносим также в колонки 17, 18 и 19.

$$P_{\text{м.вн}} = P_{\text{м.шнн}} + \Delta P_{\text{т}}, \text{ кВт}, \quad (29)$$

$$P_{\text{м.вн}} = 1169,98 + 29,4 = 1199,39 \text{ кВт},$$

$$Q_{\text{м.вн}} = Q_{\text{м.шнн}} + \Delta Q_{\text{т}}, \text{ квар}, \quad (30)$$

$$Q_{\text{м.вн}} = 890,02 + 147 = 1037,03 \text{ квар}$$

$$S_{\text{м.вн}} = \sqrt{P_{\text{м.вн}}^2 + Q_{\text{м.вн}}^2} = \quad (31)$$

$$S_{\text{м.вн}} = \sqrt{1199,39^2 + 1037,03^2} = 1585,54 \text{ кВА}$$

Вывод по разделу:

Итогом данного раздела стали значения нагрузок на стороне высокого напряжения, на шине низкого напряжения, найдены величины потерь, а также посчитаны максимальные значения мощностей и токов для магистральных и радиальных шинопроводов. Полученные значения позволят рассчитать и подобрать трансформаторы, питающие объект, компенсирующие устройства реактивной мощности, а также проводники и аппараты защиты.

4 Расчет и выбор трансформатора и компенсирующих устройств

4.1 Расчет и выбор числа и мощности трансформаторов

Трансформатор является важной частью энергоснабжения всего производства и его выбор влияет на технико-экономические показатели, а также определяет, насколько эффективно будет происходить передача и распределение электроэнергии. [3], [13].

Для различных объектов есть свои условия и критерии по выбору количества и исполнения трансформатора. Согласно техническом заданию завод по изготовлению лекарственных средств «Озон Медика» относится к объекту 2-й категории электроснабжения, а значит должен быть питаться от двух трансформаторов. Так как перебои с питанием могут привести к финансовым затратам и простоем производства, решено оснастить КТП системой АВР для быстрого переключения на резервную линию. [8], [11].

Расчетная мощность трансформатора для двухтрансформаторной КТП, с учетом потерь, определяется по максимальному значению полной мощности на стороне высокого напряжения. [3].

$$S_T \geq S_p = 0,7 S_{M(BH)}, \text{ кВА}, \quad (32)$$

$$S_T \geq S_p = 0,7 \cdot 1585,54 = 1109,9 \text{ кВА}.$$

где S_T – полная мощность выбранного трансформатора, кВА,

S_p – расчетная полная мощность трансформатора, кВА.

Определяется коэффициент загрузки по формуле 33:

$$K_3 = \frac{S_{HH}}{N_T \cdot S_T}, \quad (33)$$

$$K_3 = \frac{1470}{2 \cdot 1250} = 0,59.$$

где N_T – количество используемых трансформаторов.

Питающий кабель от трансформаторной подстанции к вводному распределительному устройству будет проложен в канале подземного исполнения из железобетонных конструкций. [3].

Вывод по разделу:

Используя каталоги ближайших производителей трансформаторов, а также комплектных трансформаторных подстанций предварительно выбираем 2КТПНБ-В-Plit-1250/10/0,4-УХЛ1.

К установке принимаем 2 трансформатора ТСЛЗ-СЭЩ-1250-10/0,4-У3; $\Delta P_{xx} = 2,5$ кВт; $\Delta P_{кз} = 11,96$ кВт; $u_{кз} = 6$ %. Данный трансформатор принят к установке, так как для объектов, подобных «Озон Медика» установлены повышенные требования к пожарной и экологической безопасности, имеет высокую степень надежности и проще в обслуживании. Коэффициент загрузки составляет $K_z = 0,59$.

4.2 Расчет и выбор компенсирующих устройств

Для расчета и выбора компенсирующего устройства используем значения, полученные в 3-й глав, а также принимаем такие значения, как: $\cos\varphi_k = 0,95$ и $\operatorname{tg}\varphi_k = 0,33$. [3].

Таблица 5 – Исходные данные

Параметр	$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$	P_M , кВт	Q_M , квар	S_M , кВА
Всего на НН без КУ	0,8	0,76	1169,98	890,02	1470

Определяется расчетная мощность КУ:

$$Q_{к.р} = \alpha \cdot P_M (\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi_k), \text{ квар}, \quad (34)$$

$$Q_{к.р} = 0,9 \cdot 1169,98 \cdot (0,76 - 0,33) = 453,5 \text{ квар}.$$

Выбирается 2×АУКРМ-0,4-250-25-УХЛ4 с автоматическим регулированием по 25 квар на ступень.

Определяются фактические значения $\operatorname{tg}\varphi_\phi$ и $\cos\varphi_\phi$ после компенсации реактивной мощности:

$$\operatorname{tg}\varphi_\phi = \operatorname{tg}\varphi - \frac{Q_{\text{к.ст}}}{\alpha \cdot P_M}, \quad (35)$$

$$\operatorname{tg}\varphi_\phi = 0,76 - \frac{2 \cdot 250}{0,9 \cdot 1169,98} = 0,33$$

$$\cos\varphi_\phi = 0,96.$$

Результаты расчетов заносятся в таблица 6.

Определяются расчетная мощность трансформатора с учетом потерь:

$$S_p = 0,7S_{(BH)}, \text{ кВА}, \quad (36)$$

$$S_p = 0,7 \cdot 1300,3 = 910,2 \text{ кВА},$$

$$\Delta P_T = 0,02S_{(HH)}, \text{ кВт}, \quad (37)$$

$$\Delta P_T = 0,02 \cdot 1233,3 = 24,67 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_T = 0,1S_{(HH)}, \text{ квар}, \quad (38)$$

$$\Delta Q_T = 0,1 \cdot 1233,3 = 123,33 \text{ квар},$$

$$\Delta S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2}, \text{ кВА}, \quad (39)$$

$$\Delta S_T = \sqrt{24,67^2 + 123,33^2} = 125,8 \text{ кВА}.$$

Выбирается трансформатор типа 2×ТСЛЗ-СЭЩ-1250-10/0,4-У3 с:
 $\Delta P_{\text{хх}} = 2,5 \text{ кВт}; \Delta P_{\text{кз}} = 11,96 \text{ кВт}; u_{\text{кз}} = 6 \%$.

Определяется:

$$K_3 = \frac{S_{HH}}{N_T \cdot S_T}, \quad (40)$$

$$K_3 = \frac{1233,3}{2 \cdot 1250} = 0,49.$$

Таблица 6 – Сводная ведомость нагрузок

Параметр	$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$	P_M , кВт	Q_M , квар	S_M , кВА
Всего на НН без КУ	0,8	0,76	1169,98	890,02	1470
КУ	-	-	-	2×250	-
Всего на НН с КУ	0,96	0,29	169,98	390,02	1233,3
Потери	-	-	24,67	123,33	125,8
Всего на ВН с КУ	-	-	1194,65	513,53	1300,3

Вывод по разделу.

Выбираем 2×АУКРМ–0,4–250–10–УХЛ4 с автоматическим регулированием реактивной мощности, мощностью одной установки, равной 250 квар и шагом регулирования мощности на одну ступень по 25 квар, с числом ступеней, равным 6.

Трансформаторы, используемые в КТП, остаются неизменны, так как в будущем планируется расширение завода по количеству оборудования. Коэффициент загрузки составляет 0,49, а использование устройств компенсации реактивной мощности позволило снизить значение реактивной мощности в 2,2 раза.

5 Расчет и выбор электрических аппаратов и проводников

5.1 Расчет и выбор аппаратов защиты

Для расчёта аппаратов защиты необходимо составить схему электроснабжения от источника питания до электроприемника. [13]. В данном случае выбираем в качестве электроприёмника чиллерную установку, подключённую к ШМА-2 через ШРА-3. Известные данные наносятся на схему как на рисунке 3.

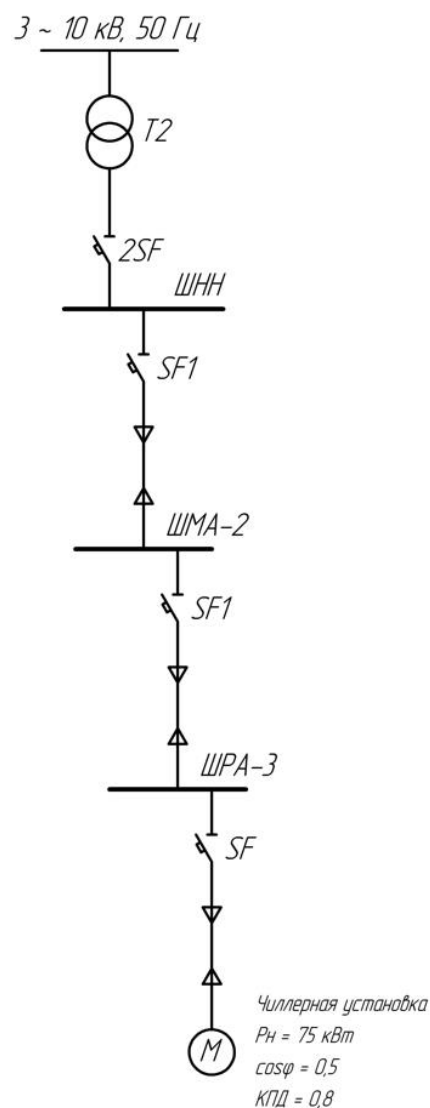


Рисунок 3 – Схема электроснабжения электроприемника № 2

Линия Т2–ШНН, 2SF:

Расчет предельного тока отключения:

$$I_T = \frac{S_T}{\sqrt{3}U_{н.т}}, \text{ А}, \quad (41)$$
$$I_T = \frac{1250}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 1804 \text{ А}.$$

Ток расцепителя принимается равным току трансформатора.

Выбирается воздушный автоматический выключатель серии SystemPact ACB SPA40H254FVNN5GRRU с номинальным током в 2500 А.

Линия ШНН–ШМА2, SF2:

Ток I_M принимается в соответствии с ШМА-2 и составляет:

$$I_M = 971,4 \text{ А}.$$

Расчет предельного тока отключения:

$$I_{н.р} \geq 1,1I_M, \text{ А}, \quad (42)$$
$$1,1I_M = 1,1 \cdot 971,4 \text{ А} = 1069 \text{ А}.$$

где 1,1 – коэффициент для групповой линии с несколькими ЭД.

Выбирается воздушный автоматический выключатель серии SystemPact ACB SPA16N124FVNN5GRRU с номинальным током в 1250 А

Линия ШМА-2–ШРА-3, SF2.3:

Ток I_M принимается в соответствии с ШРА-3 и составляет:

$$I_M = 467,1 \text{ А}.$$

Расчет предельного тока отключения:

$$I_{н.р} \geq 1,1I_{м}, \text{ A.} \quad (43)$$

$$1,1I_{м} = 1,1 \cdot 467,1 \text{ A} = 1069 \text{ A.}$$

Выбирается воздушный автоматический выключатель серии SystemPact ACB SPA16N063FHNN58VRU с номинальным током в 630 А

На ШРА наибольшей по мощности является чиллерная установка, следовательно:

$$I_{н.нб} = \frac{P_{н}}{\sqrt{3} \cdot U_{н} \cdot \cos \varphi \cdot \eta}, \text{ A,} \quad (44)$$

$$I_{н.нб} = \frac{75}{1,73 \cdot 0,4 \cdot 0,5 \cdot 0,9} = 240,9 \text{ A.}$$

Номинальным ток чиллерной установки будет равен $I_{н.нб}$, соответственно:

$$I_{н} = I_{н.нб} = 240,9 \text{ A.}$$

Находим ток расцепителя:

$$I_{н.р} \geq 1,25 \cdot I_{н}, \text{ A,} \quad (45)$$

$$1,25 \cdot I_{н} = 1,25 \cdot 240,9 = 301,13 \text{ A.}$$

Выбирается автоматический выключатель в литом корпусе SystemPact CCB SPC400F400L3D

Для остальных приборов выбор и расчёт производится аналогично, результаты расчёта и оборудование заносятся в таблицу 7.

Таблица 7 – Выбранные аппараты защиты

Оборудование (Линия)	Марка выключателя	$I_{п.расч.},$ А	$I_{расцеп.расч.},$ А	$I_n, А$	$I_{расцеп.},$ А
1	2	3	4	5	6
Т1–ШНН	SPA40H253FVNN5GRRU	1804	1804	2500	2500
Т2–ШНН	SPA40H253FVNN5GRRU	1804	1804	2500	2500
ШНН–ШМА-1	SPA16N123FVNN5GRRU	947,9	1043	1250	1250
ШНН–ШМА-2	SPA16N123FVNN5GRRU	971,4	1069	1250	1250
ШНН–ЩО 0.1	SPC100F10022L3DF	91,4	91,4	100	100
ШНН–ЩО 1.1	SPC100F04022L3DF	37,7	37,7	100	40
ШНН–ЩО 1.2	SPC100F03222L3DF	26	26	100	32
ШНН–ЩО 1.3	SPC100F03222L3DF	26	26	100	32
ШНН–ЩО 2.1	SPC100F05022L3DF	40,4	40,4	100	50
ШНН–ЩО 2.2	SPC100F03222L3DF	26,4	26,4	100	32
ШНН–ЩО 2.3	SPC100F03222L3DF	25,3	25,3	100	32
ШНН–ЩО 3.1	SPC100F05022L3DF	40,4	40,4	100	50
ШНН–ЩО 3.2	SPC100F03222L3DF	27,4	27,4	100	32
ШМА-1–ШРА-1	SPA16N064FHNN58VRU	427,8	470,58	630	630
ШМА-1–ШРА-2	SPA16N064FHNN58VRU	530,2	583,2	630	630
ШМА-2–ШРА-3	SPA16N064FHNN58VRU	467,1	513,8	630	630
ШМА-2–ШРА-4	SPA16N044FHNN58VRU	301,6	331,8	400	400
ШМА-2–ШРА-5	SPA16N044FHNN58VRU	264	290,4	400	400
Сушилка-гранулятор	SPC100F01022L3DF	7,6	9,5	100	10
Перемешивающая машина	SPC100F00622L3DF	5,24	6,55	100	6
Смеситель-опудриватель	SPC100F02522L3DF	17,1	21,4	100	25

Продолжение таблицы 7

Оборудование (Линия)	Марка выключателя	I _{п.расч.} , А	I _{расцеп.расч.} , А	I _п , А	I _{расцеп.} , А
1	2	3	4	5	6
Вибрационный просеиватель	SPC100F00622L3DF	4,1	5,1	100	6
Просеивающая мельница	SPC100F00622L3DF	4,3	5,4	100	6
Калибратор	SPC100F01022L3DF	6,1	7,6	100	10
Прессовочная машина	SPC100F01622L3DF	13,3	16,6	100	16
Капсуляционная машина	SPC100F00622L3DF	5,7	7,1	100	6
Стерилизатор	SPC100F01022L3DF	6,8	8,4	100	10
Кондиционер	SPC100F03222L3DF	28,5	35,6	100	32
Мешалка	SPC100F00622L3DF	5,7	7,1	100	6
Сушильный шкаф	SPC100F01022L3DF	6,8	8,4	100	10
Компьютер	SPC100F01022L3DF	9,9	11,36	100	10
Стойка сервера	SPC160F10022L3DF	81,8	102,3	160	100
Стиральная машина	SPC100F00622L3DF	5,1	6,3	100	6
Машина сушки	SPC100F00622L3DF	5,4	6,8	100	6
Компрессор	SPC100F05022L3DF	45,6	57	100	50
Чиллерная установка	SPC400F250L3D	240,9	301,1	400	250
Вентиляционная камера	SPC100F02522L3DF	16,7	20,9	100	25

5.2 Расчет и выбор проводников

Проводники, составляющие линии электроснабжения, необходимо выбирать согласно с ранее выбранными аппаратами защиты, а также согласно допустимому току. [3], [13].

Выбираются линии электроснабжения с учетом соответствия аппаратам защиты согласно условию:

$$I_{\text{доп}} \geq K_{\text{зщ}} I_{\text{у(п)}}.$$

Для прокладки в воздухе в помещениях с нормальной зоной опасности $K_{\text{зщ}} = 1,25$.

Для подключения к ВРУ-1 был предоставлен кабель Н1-6× (ПВВГнг(Cu)-LS 4х240).

В качестве магистральных шинопроводов ШМА-1 и ШМА-2 принимаем КХС-II-125-07 с номинальным током 1250 А.

В качестве радиальных шинопроводов ШРА-1, ШРА-2 и ШРА-3 принимаем КХС-II-065-07 с номинальным током 650 А.

В качестве радиальных шинопроводов ШРА-4 и ШРА-5 принимаем КХС-II-065-07 с номинальным током 400 А.

Линия с SF3.1:

$$I_{\text{доп}} \geq K_{\text{зщ}} I_{\text{у(п)}}, \text{ А}, \quad (46)$$

$$K_{\text{зщ}} I_{\text{у(п)}} = 1,25 \cdot 1,2 \cdot 250 = 375 \text{ А}.$$

Выбираем кабель ППГнг –FRHF – 3×(3×70), с $I_{\text{доп}} = 534 \text{ А}$

Аналогично производим расчёт проводников, отходящих непосредственно к оборудованию, и заносим результаты в таблицу 8.

Таблица 8 – Выбранные проводники

Подключаемое оборудование	Марка проводника	$I_{\text{доп.расч.}}, \text{ А}$	$I_{\text{доп.}}, \text{ А}$	Условия выбора
Сушилка-гранулятор	ППГнг –FRHF – 5×1,5	15	19	$I_{\text{доп.расч}} < I_{\text{доп}}$
Перемешивающая машина	ППГнг –FRHF – 5×1,5	9	19	$I_{\text{доп.расч}} < I_{\text{доп}}$
Смеситель-опудриватель	ППГнг –FRHF – 5×6	37,5	50	$I_{\text{доп.расч}} < I_{\text{доп}}$
Вибрационный просеиватель	ППГнг –FRHF – 5×1,5	9	19	$I_{\text{доп.расч}} < I_{\text{доп}}$
Просеивающая мельница	ППГнг –FRHF – 5×1,5	9	19	$I_{\text{доп.расч}} < I_{\text{доп}}$
Калибратор	ППГнг –FRHF – 5×1,5	15	19	$I_{\text{доп.расч}} < I_{\text{доп}}$
Прессовочная машина	ППГнг –FRHF – 5×2,5	24	27	$I_{\text{доп.расч}} < I_{\text{доп}}$
Капсуляционная машина	ППГнг –FRHF – 5×1,5	9	19	$I_{\text{доп.расч}} < I_{\text{доп}}$
Стерилизатор	ППГнг –FRHF – 5×1,5	15	19	$I_{\text{доп.расч}} < I_{\text{доп}}$
Кондиционер	ППГнг –FRHF – 5×6	48	50	$I_{\text{доп.расч}} < I_{\text{доп}}$
Мешалка	ППГнг –FRHF – 5×1,5	9	19	$I_{\text{доп.расч}} < I_{\text{доп}}$
Сушильный шкаф	ППГнг –FRHF – 5×1,5	15	19	$I_{\text{доп.расч}} < I_{\text{доп}}$
Компьютер	ППГнг –FRHF – 3×1,5	15	19	$I_{\text{доп.расч}} < I_{\text{доп}}$
Стойка сервера	ППГнг –FRHF – 5×50	150	175	$I_{\text{доп.расч}} < I_{\text{доп}}$
Стиральная машина	ППГнг –FRHF – 5×1,5	9	19	$I_{\text{доп.расч}} < I_{\text{доп}}$
Машина сушки	ППГнг –FRHF – 5×1,5	9	19	$I_{\text{доп.расч}} < I_{\text{доп}}$
Компрессор	ППГнг –FRHF – 5×16	75	90	$I_{\text{доп.расч}} < I_{\text{доп}}$
Чиллерная установка	ППГнг –FRHF – 3×(5×70)	375	534	$I_{\text{доп.расч}} < I_{\text{доп}}$
Вентиляционная камера	ППГнг –FRHF – 5×6	37,5	50	$I_{\text{доп.расч}} < I_{\text{доп}}$

Вывод по разделу:

Результатом данного раздела стал выбор аппаратов защиты и проводников, согласно полученным расчётным значениям, с последующим занесением выбранных устройств и проводников в таблицы 7 и 8.

6 Расчет токов короткого замыкания

Основной причиной нарушения нормального режима работы системы электроснабжения является короткое замыкание. Короткие замыкания могут быть однофазными, двухфазными и трёхфазными. [3], [13].

Для проверки аппаратов защиты используются расчётные данные трёхфазного короткого замыкания, а также характеристики проводник и самих аппаратов. [3], [9].

Перед началом расчёта, определяются и записываются значения протяженности проводников до точек КЗ.

Исходные данные:

- $L_{вн} = 6$ км;
- $L_{шма} = 4,5$ м (длина линии электроснабжения от ШНН до ответвления к ШРА);
- $L_{шра} = 49$ м (участок ШРА-I до ответвления);
- $L_{кл} = 20$ м (длина линии электроснабжения от ШРА-I до потребителя).

После внесения протяженности проводников составляется схема электроснабжения, на которую наносятся источник питания, трансформатор, аппараты защиты, проводники и электроприёмник, относительно которого ведётся расчёт КЗ. Также на схему наносятся известные параметры оборудования, длина проводников, точки КЗ и технические характеристики электроприёмника. В качестве электроприёмника выбирается самое мощное электрооборудование, имеющее в себе электродвигатель. [3], [9]. Схема электроснабжения для расчёта токов короткого замыкания приведена на рисунке 4.

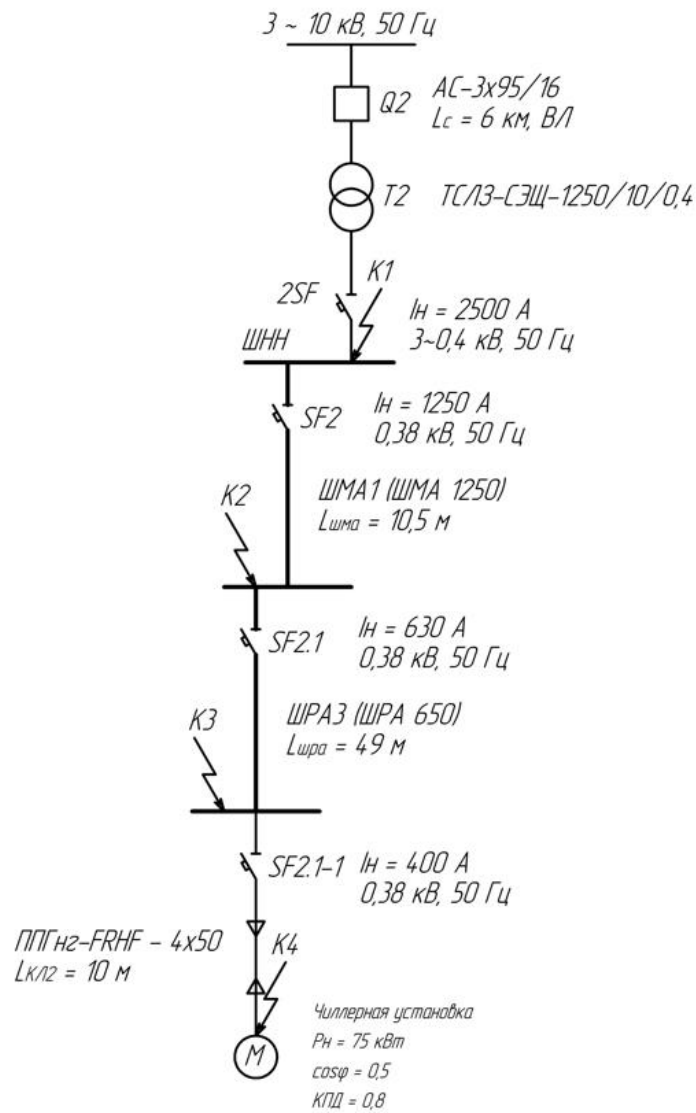


Рисунок 4 – Схема электроснабжения для расчета КЗ в разных точках

Вычисляются сопротивления элементов и наносятся на схему замещения.

Для системы:

$$I_c = \frac{S_T}{\sqrt{3}U_c}, \text{ A}, \quad (47)$$

$$I_c = \frac{1250}{1,73 \cdot 10} = 72,2 \text{ A}.$$

Наружная ВЛ AC-3×95/16:

$$\begin{aligned}
I_{\text{доп}} &= 265 \text{ A}, \\
x_0 &= 0,33 \text{ Ом/км}, \\
X'_c &= x_0 L_c, \text{ Ом}, \\
X'_c &= 0,33 \cdot 6 = 1,98 \text{ Ом},
\end{aligned}
\tag{48}$$

$$\begin{aligned}
r_0 &= 0,234 \text{ Ом/км}, \\
R'_c &= r_0 L_c, \text{ Ом}. \\
R'_c &= 0,234 \cdot 6 = 1,404 \text{ Ом}.
\end{aligned}
\tag{49}$$

Сопротивления приводятся к НН:

$$\begin{aligned}
R_c &= R'_c \left(\frac{U_{\text{НН}}}{U_{\text{ВН}}} \right)^2, \text{ мОм}, \\
R_c &= 1,404 \cdot \left(\frac{0,4}{10} \right)^2 \cdot 10^3 = 2,246 \text{ мОм},
\end{aligned}
\tag{50}$$

$$\begin{aligned}
X_c &= X'_c \left(\frac{U_{\text{НН}}}{U_{\text{ВН}}} \right)^2, \text{ мОм}, \\
X_c &= 1,98 \cdot \left(\frac{0,4}{10} \right)^2 \cdot 10^3 = 3,168 \text{ мОм}.
\end{aligned}
\tag{51}$$

Для трансформатора по справочным данным:

$$\begin{aligned}
R_T &= 2 \text{ мОм}, \\
X_T &= 8,5 \text{ мОм}, \\
Z_T^{(1)} &= 81 \text{ мОм}.
\end{aligned}$$

Для автоматов по справочным данным:

$$\begin{aligned}
2\text{SF}: R_{2\text{SF}} &= 0,06 \text{ мОм}; x_{2\text{SF}} = 0,07 \text{ мОм}; R_{\Pi 2\text{SF}} = 0,07 \text{ мОм}, \\
\text{SF2}: R_{\text{SF2}} &= 0,08 \text{ мОм}; x_{\text{SF2}} = 0,08 \text{ мОм}; R_{\Pi \text{SF2}} = 0,1 \text{ мОм}, \\
\text{SF2.1}: R_{\text{SF2.1}} &= 11,12 \text{ мОм}; X_{\text{SF2.1}} = 0,13 \text{ мОм}; R_{\Pi \text{SF2.1}} = 0,25 \text{ мОм}, \\
\text{SF2.1-1}: R_{\text{SF2.1-1}} &= 0,15 \text{ мОм}; X_{\text{SF2.1-1}} = 0,17 \text{ мОм}; R_{\Pi \text{SF2.1-1}} = 0,4 \text{ мОм}.
\end{aligned}$$

Для кабельной линии по справочным данным:

$$\text{КЛ: } r_0 = 0,484 \text{ мОм/м,}$$

$$x_0 = 0,1 \text{ мОм/м,}$$

$$R_{\text{кл}} = r_0 L_{\text{кл}}, \text{ мОм,} \quad (52)$$

$$R_{\text{кл}} = 0,484 \cdot 10 = 4,84 \text{ мОм,}$$

$$X_{\text{кл}} = x_0 L_{\text{кл}}, \text{ мОм,} \quad (53)$$

$$X_{\text{кл}} = 0,1 \cdot 10 = 1 \text{ мОм.}$$

Для шинопровода ШМА 1250 по справочным данным:

$$r_{0\text{шма}} = 0,034 \text{ мОм/м; } x_{0\text{шма}} = 0,016 \text{ мОм/м,}$$

$$r_{0\text{пшма}} = 0,068 \text{ мОм/м; } x_{0\text{пшма}} = 0,053 \text{ мОм/м,}$$

$$R_{\text{шма}} = r_{0\text{шма}} L_{\text{шма}}, \text{ мОм,} \quad (54)$$

$$R_{\text{шма}} = 0,034 \cdot 15 = 0,51 \text{ мОм,}$$

$$X_{\text{шма}} = x_{0\text{шма}} L_{\text{шма}}, \text{ мОм,} \quad (55)$$

$$X_{\text{шма}} = 0,016 \cdot 15 = 0,24 \text{ мОм.}$$

Для шинопровода ШРА 650 по справочным данным:

$$r_{0\text{шра}} = 0,01 \text{ мОм/м; } x_{0\text{шра}} = 0,13 \text{ мОм/м,}$$

$$r_{0\text{пшра}} = 0,2 \text{ мОм/м; } x_{0\text{пшра}} = 0,26 \text{ мОм/м,}$$

$$R_{\text{шра}} = r_{0\text{шра}} L_{\text{шра}}, \text{ мОм,} \quad (56)$$

$$R_{\text{шра}} = 0,01 \cdot 49 = 0,49 \text{ мОм,}$$

$$X_{\text{шра}} = x_{0\text{шра}} L_{\text{шра}}, \text{ мОм,} \quad (57)$$

$$X_{\text{шра}} = 0,13 \cdot 49 = 6,37 \text{ мОм.}$$

Для ступеней распределения по справочным данным:

$$R_{c1} = 15 \text{ мОм},$$

$$R_{c2} = 20 \text{ мОм}.$$

$$R_{c3} = 25 \text{ мОм}.$$

Составляется схема замещения, изображенная на рисунке 5, с указанием значений определенных и рассчитанных реактивных и активных сопротивлений. [3]

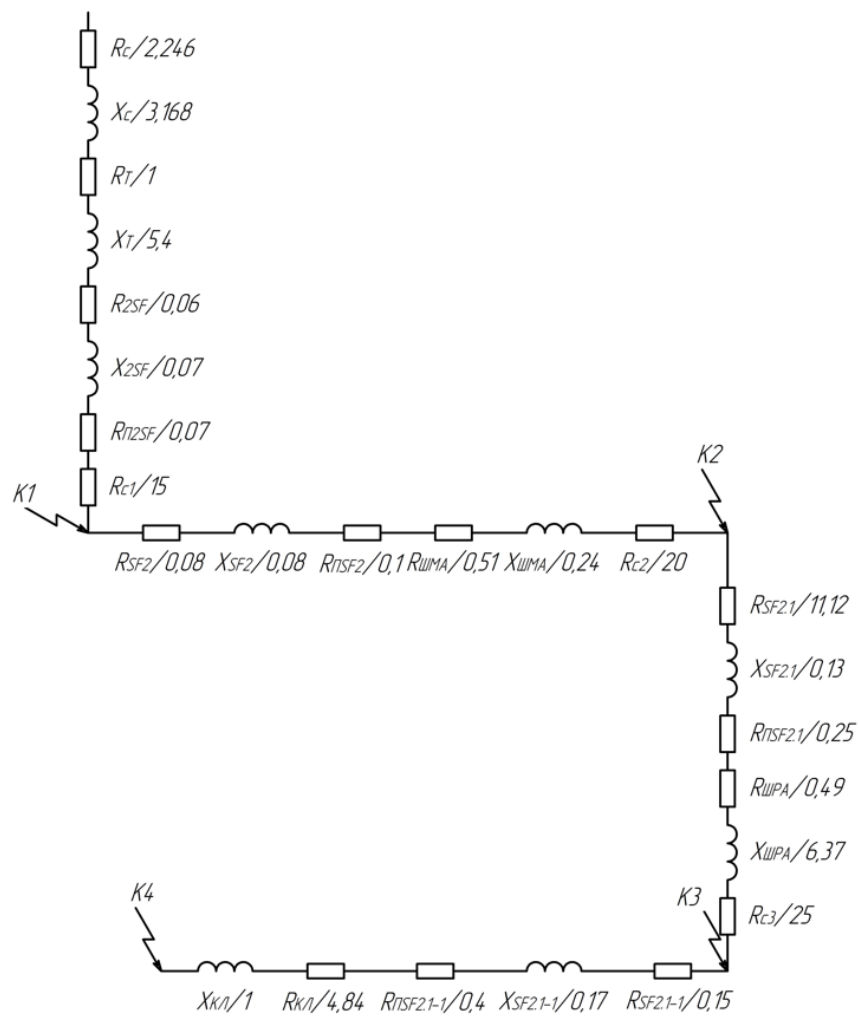


Рисунок 5 – Схема замещения электроснабжения

Упрощается схема замещения, вычисляются эквивалентные сопротивления на участках между точками КЗ и наносятся на схему, указанную на рисунке 6:

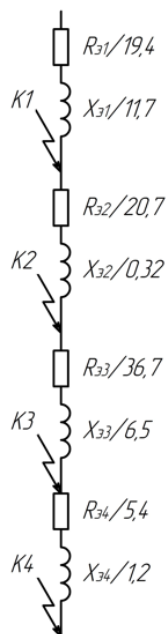


Рисунок 6 – Упрощенная схема замещения

Эквивалентные сопротивления вычисляются по следующим формулам:

$$R_{\Sigma 1} = R_c + R_T + R_{2SF} + R_{n2SF} + R_{c1}, \text{ мОм}, \quad (58)$$

$$R_{\Sigma 1} = 2,246 + 2 + 0,06 + 0,07 + 15 = 19,4 \text{ мОм},$$

$$X_{\Sigma 1} = X_c + X_T + X_{1SF}, \text{ мОм}, \quad (59)$$

$$X_{\Sigma 1} = 3,168 + 8,5 + 0,07 = 11,7 \text{ мОм},$$

$$R_{\Sigma 2} = R_{SF2} + R_{nSF2} + R_{шма} + R_{c2}, \text{ мОм}, \quad (60)$$

$$R_{\Sigma 2} = 0,08 + 0,1 + 0,51 + 20 = 20,7 \text{ мОм},$$

$$X_{\Sigma 2} = X_{SF1} + X_{шма}, \text{ мОм}, \quad (61)$$

$$X_{\Sigma 2} = 0,08 + 0,24 = 0,32 \text{ мОм},$$

$$R_{\Sigma 3} = R_{SF2.3} + R_{nSF2.3} + R_{шпа} + R_{c3}, \text{ мОм}, \quad (62)$$

$$R_{\Sigma 3} = 11,12 + 0,25 + 0,49 + 25 = 36,7 \text{ мОм},$$

$$X_{\Sigma 3} = X_{SF2.3} + X_{шпа} = 0,13 + 6,37 = 6,5 \text{ мОм}, \quad (63)$$

$$X_{\Sigma 3} = 0,13 + 6,37 = 6,5 \text{ мОм},$$

$$R_{\Sigma 4} = R_{SF2.1-1} + R_{nSF2.1-1} + R_{кл}, \text{ мОм}, \quad (64)$$

$$\begin{aligned}
R_{\text{э4}} &= 0,15 + 0,4 + 4,84 = 5,4 \text{ МОм}, \\
X_{\text{э4}} &= X_{\text{SF2.1-1}} + X_{\text{кл}}, \text{ МОм}, \\
X_{\text{э4}} &= 0,17 + 1 = 1,2 \text{ МОм}.
\end{aligned} \tag{65}$$

Вычисляются сопротивления до каждой точки КЗ и заносятся в «Сводную ведомость», указанную в таблице 6:

$$\begin{aligned}
R_{\text{к1}} &= R_{\text{э1}} = 19,4 \text{ МОм}, \\
X_{\text{к1}} &= X_{\text{э1}} = 11,7 \text{ МОм}, \\
Z_{\text{к1}} &= \sqrt{R_{\text{к1}}^2 + X_{\text{к1}}^2}, \text{ МОм},
\end{aligned} \tag{66}$$

$$\begin{aligned}
Z_{\text{к1}} &= \sqrt{19,4^2 + 11,7^2} = 22,7 \text{ МОм}, \\
R_{\text{к2}} &= R_{\text{э1}} + R_{\text{э2}}, \text{ МОм},
\end{aligned} \tag{67}$$

$$\begin{aligned}
R_{\text{к2}} &= 19,4 + 20,7 = 40,1 \text{ МОм}, \\
X_{\text{к2}} &= X_{\text{э1}} + X_{\text{э2}}, \text{ МОм},
\end{aligned} \tag{68}$$

$$\begin{aligned}
X_{\text{к2}} &= 11,7 + 0,32 = 12,1 \text{ МОм}, \\
Z_{\text{к2}} &= \sqrt{R_{\text{к2}}^2 + X_{\text{к2}}^2}, \text{ МОм},
\end{aligned} \tag{69}$$

$$\begin{aligned}
Z_{\text{к2}} &= \sqrt{40,1^2 + 12,1^2} = 41,8 \text{ МОм}, \\
R_{\text{к3}} &= R_{\text{к2}} + R_{\text{э3}}, \text{ МОм},
\end{aligned} \tag{70}$$

$$\begin{aligned}
R_{\text{к3}} &= 40,1 + 36,9 = 77 \text{ МОм}, \\
X_{\text{к3}} &= X_{\text{к2}} + X_{\text{э3}}, \text{ МОм},
\end{aligned} \tag{71}$$

$$\begin{aligned}
X_{\text{к3}} &= 12,1 + 6,5 = 18,6 \text{ МОм}, \\
Z_{\text{к3}} &= \sqrt{R_{\text{к3}}^2 + X_{\text{к3}}^2}, \text{ МОм},
\end{aligned} \tag{72}$$

$$\begin{aligned}
Z_{\text{к3}} &= \sqrt{77^2 + 18,6^2} = 79,1 \text{ МОм}, \\
R_{\text{к4}} &= R_{\text{к3}} + R_{\text{э4}}, \text{ МОм},
\end{aligned} \tag{73}$$

$$\begin{aligned}
R_{\text{к4}} &= 77 + 5,4 = 82,4 \text{ МОм}, \\
X_{\text{к4}} &= X_{\text{к3}} + X_{\text{э4}}, \text{ МОм},
\end{aligned} \tag{74}$$

$$\begin{aligned}
X_{\text{к4}} &= 18,6 + 1,2 = 19,8 \text{ МОм}, \\
Z_{\text{к4}} &= \sqrt{R_{\text{к4}}^2 + X_{\text{к4}}^2}, \text{ МОм}
\end{aligned} \tag{75}$$

$$Z_{K4} = \sqrt{82,4^2 + 19,8^2} = 84,7 \text{ МОм},$$

$$\frac{R_{K1}}{X_{K1}} = \frac{19,4}{11,7} = 1,7, \quad (76)$$

$$\frac{R_{K2}}{X_{K2}} = \frac{40,1}{12,1} = 3,3, \quad (77)$$

$$\frac{R_{K3}}{X_{K3}} = \frac{77}{18,6} = 4,2. \quad (78)$$

$$\frac{R_{K4}}{X_{K4}} = \frac{82,4}{19,8} = 4,2. \quad (79)$$

Определяются коэффициенты K_y и q :

$$K_{y1} = F\left(\frac{R_{K1}}{X_{K1}}\right) = F(1,7) = 1,0,$$

$$K_{y2} = F\left(\frac{R_{K2}}{X_{K2}}\right) = F(3,3) = 1,0,$$

$$K_{y3} = F\left(\frac{R_{K3}}{X_{K3}}\right) = F(4,2) = 1,0,$$

$$K_{y4} = F\left(\frac{R_{K4}}{X_{K4}}\right) = F(4,2) = 1,0,$$

$$q_1 = \sqrt{1 + 2(K_y - 1)^2} = \sqrt{1 + 2(1,0 - 1)^2} \approx 1,$$

$$q_2 = q_3 = q_4 = 1.$$

Определяются 3-фазные и 2-фазные токи КЗ и заносятся в «Ведомость»:

$$I_{K1}^{(3)} = \frac{U_{K1}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K1}}, \text{ кА}, \quad (80)$$

$$I_{K1}^{(3)} = \frac{0,38 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 22,7} = 10,2 \text{ кА},$$

$$I_{K2}^{(3)} = \frac{U_{K2}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K2}}, \text{ кА}, \quad (81)$$

$$I_{K2}^{(3)} = \frac{0,38 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 48,1} = 5,24 \text{ кА},$$

$$I_{K3}^{(3)} = \frac{U_{K3}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K3}}, \text{ кА}, \quad (82)$$

$$I_{\kappa 3}^{(3)} = \frac{0,38 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 79,1} = 2,8 \text{ кА},$$

$$I_{\kappa 4}^{(3)} = \frac{U_{\kappa 3}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\kappa 3}}, \text{ кА}, \quad (83)$$

$$I_{\kappa 4}^{(3)} = \frac{0,38 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 84,7} = 2,6 \text{ кА},$$

$$I_{y\kappa 1} = q_1 I_{\kappa 1}^{(3)}, \text{ кА}, \quad (84)$$

$$I_{y\kappa 1} = 1,0 \cdot 10,2 = 1,2 \text{ кА},$$

$$I_{y\kappa 2} = q_2 I_{\kappa 2}^{(3)}, \text{ кА}, \quad (85)$$

$$I_{y\kappa 2} = 1,0 \cdot 5,2 = 5,2 \text{ кА},$$

$$I_{y\kappa 3} = q_3 I_{\kappa 3}^{(3)}, \text{ кА}, \quad (86)$$

$$I_{y\kappa 3} = 1,0 \cdot 2,8 = 2,8 \text{ кА},$$

$$I_{y\kappa 4} = q_4 I_{\kappa 4}^{(3)}, \text{ кА}, \quad (87)$$

$$I_{y\kappa 4} = 1,0 \cdot 2,6 = 2,6 \text{ кА},$$

$$i_{y\kappa 1} = \sqrt{2} K_{y1} I_{\kappa 1}^{(3)}, \text{ кА}, \quad (88)$$

$$i_{y\kappa 1} = \sqrt{2} \cdot 1 \cdot 10,2 = 14,4 \text{ кА},$$

$$i_{y\kappa 2} = \sqrt{2} K_{y2} I_{\kappa 2}^{(3)}, \text{ кА}, \quad (89)$$

$$i_{y\kappa 2} = \sqrt{2} \cdot 1 \cdot 5,2 = 7,4 \text{ кА},$$

$$i_{y\kappa 3} = \sqrt{2} K_{y3} I_{\kappa 3}^{(3)}, \text{ кА}, \quad (90)$$

$$i_{y\kappa 3} = \sqrt{2} \cdot 1 \cdot 2,8 = 3,9 \text{ кА},$$

$$i_{y\kappa 4} = \sqrt{2} K_{y4} I_{\kappa 4}^{(3)}, \text{ кА}, \quad (91)$$

$$i_{y\kappa 4} = \sqrt{2} \cdot 1 \cdot 2,6 = 3,7 \text{ кА},$$

$$I_{\kappa 1}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\kappa 1}^{(3)}, \text{ кА}, \quad (92)$$

$$I_{\kappa 1}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 10,2 = 8,8 \text{ кА},$$

$$I_{\kappa 2}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\kappa 2}^{(3)}, \text{ кА}, \quad (93)$$

$$I_{\kappa 2}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 5,2 = 4,5 \text{ кА},$$

$$I_{к3}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{к3}^{(3)}, \text{ кА}, \quad (94)$$

$$I_{к3}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 2,8 = 2,4 \text{ кА},$$

$$I_{к4}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{к4}^{(3)}, \text{ кА}, \quad (95)$$

$$I_{к4}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 2,6 = 2,3 \text{ кА}.$$

Составляется схема замещения для расчета 1-фазных токов КЗ, изображенная на рисунке 7, и определяются сопротивления.

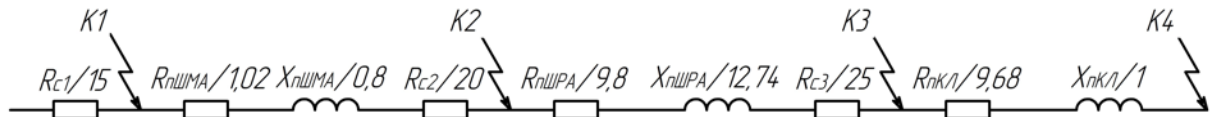


Рисунок 7 – Схема замещения для расчета 1-фазных токов КЗ

Для кабельных линий:

$$X_{пкл} = X_{0п} L_{кл}, \text{ мОм}, \quad (96)$$

$$X_{пкл} = 0,1 \cdot 10 = 1 \text{ мОм},$$

$$R_{пкл} = 2r_0 L_{кл}, \text{ мОм}, \quad (97)$$

$$R_{пкл} = 2 \cdot 0,484 \cdot 10 = 9,7 \text{ мОм},$$

$$R_{пшма} = r_{0пшма} L_{шма}, \text{ мОм}, \quad (98)$$

$$R_{пшма} = 0,068 \cdot 15 = 1,02 \text{ мОм},$$

$$X_{пшма} = X_{0пшма} L_{шма}, \text{ мОм}, \quad (99)$$

$$X_{пшма} = 0,053 \cdot 15 = 0,8 \text{ мОм},$$

$$R_{пшпа} = r_{0пшпа} L_{шпа}, \text{ мОм}, \quad (100)$$

$$R_{пшпа} = 0,2 \cdot 49 = 9,8 \text{ мОм},$$

$$X_{пшпа} = X_{0пшпа} L_{шпа}, \text{ мОм}, \quad (101)$$

$$X_{пшпа} = 0,26 \cdot 49 = 12,74 \text{ мОм},$$

$$Z_{\pi 1} = 15 \text{ МОМ},$$

$$R_{\pi 2} = R_{c1} + R_{\pi \text{шма}} + R_{c2} \text{ МОМ}, \quad (102)$$

$$R_{\pi 2} = 15 + 1,02 + 20 = 36,02 \text{ МОМ}$$

$$X_{\pi 2} = X_{\pi \text{шма}} = 0,8 \text{ МОМ},$$

$$Z_{\pi 2} = \sqrt{R_{\pi 2}^2 + X_{\pi 2}^2}, \text{ МОМ}, \quad (103)$$

$$Z_{\pi 2} = \sqrt{36,02^2 + 0,8^2} = 36,03 \text{ МОМ},$$

$$R_{\pi 3} = R_{\pi 2} + R_{\pi \text{шпа}} + R_{c3}, \text{ МОМ}, \quad (104)$$

$$R_{\pi 3} = 36,02 + 9,8 + 25 = 70,82 \text{ МОМ},$$

$$X_{\pi 3} = X_{\pi 2} + X_{\pi \text{шпа}}, \text{ МОМ}, \quad (105)$$

$$X_{\pi 3} = 0,795 + 12,74 = 13,5 \text{ МОМ},$$

$$Z_{\pi 3} = \sqrt{R_{\pi 3}^2 + X_{\pi 3}^2}, \text{ МОМ}, \quad (106)$$

$$Z_{\pi 3} = \sqrt{70,82^2 + 13,5^2} = 72,1 \text{ МОМ},$$

$$R_{\pi 4} = R_{\pi 3} + R_{\pi \text{кл}}, \text{ МОМ}, \quad (107)$$

$$R_{\pi 4} = 70,82 + 9,68 = 80,5 \text{ МОМ},$$

$$X_{\pi 4} = X_{\pi 3} + X_{\pi \text{кл}}, \text{ МОМ}, \quad (108)$$

$$X_{\pi 4} = 13,5 + 1 = 14,5 \text{ МОМ},$$

$$Z_{\pi 4} = \sqrt{R_{\pi 4}^2 + X_{\pi 4}^2}, \text{ МОМ}, \quad (109)$$

$$Z_{\pi 4} = \sqrt{80,5^2 + 14,5^2} = 81,8 \text{ МОМ},$$

$$I_{\kappa 1}^{(1)} = \frac{U_{\kappa \Phi}}{Z_{\pi 1} + Z_T^{(1)}/3}, \text{ кА}, \quad (110)$$

$$I_{\kappa 1}^{(1)} = \frac{0,22 \cdot 10^3}{15 + 81/3} = 5,24 \text{ кА},$$

$$I_{\kappa 2}^{(1)} = \frac{U_{\kappa \Phi}}{Z_{\pi 2} + Z_T^{(1)}/3}, \text{ кА}, \quad (111)$$

$$I_{\kappa 2}^{(1)} = \frac{0,22 \cdot 10^3}{36,03 + 81/3} = 3,5 \text{ кА},$$

$$I_{\kappa 3}^{(1)} = \frac{U_{\kappa \Phi}}{Z_{\pi 3} + Z_T^{(1)}/3}, \text{ кА}, \quad (112)$$

$$I_{\kappa 3}^{(1)} = \frac{0,22 \cdot 10^3}{72,1 + 81/3} = 2,22 \text{ кА},$$

$$I_{\kappa 4}^{(1)} = \frac{U_{\kappa \Phi}}{Z_{\pi 4} + Z_T^{(1)}/3}, \text{ кА}, \quad (113)$$

$$I_{к4}^{(1)} = \frac{0,22 \cdot 10^3}{81,8 + 81/3} = 2,02 \text{ кА}.$$

Результаты расчета токов КЗ представлены в «Сводной ведомости токов КЗ» (таблица 9).

Таблица 9 – Сводная ведомость токов КЗ

Точка КЗ	R _к , мОм	X _к , мОм	Z _к , мОм	$\frac{R_k}{X_k}$	K _у	q	I _к ⁽³⁾ , кА	i _у , кА	I _∞ ⁽³⁾ , кА	I _к ⁽²⁾ , кА	Z _п , мОм	I _к ⁽¹⁾ , кА
К1	19,4	11,74	22,7	1,65	1,0	1	10,2	14,42	10,2	8,83	15	5,24
К2	40,1	12,1	41,84	3,32	1,0	1	5,24	7,42	5,24	4,54	36,03	3,5
К3	76,93	18,6	79,13	4,15	1,0	1	2,8	3,92	2,8	2,4	72,1	2,22
К4	82,32	19,73	84,7	4,17	1,0	1	2,6	3,67	2,6	2,25	81,8	2,02

Вывод по разделу.

По результатам расчёта были вычислены значения трёхфазных, двухфазных и однофазных токов короткого замыкания на шинах низкого напряжения, магистральных и радиальных шинопроводах, а также непосредственно на самом оборудовании.

7 Проверка аппаратов защиты по токам короткого замыкания

Автоматические выключатели представляют собой аппараты защиты электрических цепей от перегрузок и коротких замыканий. [12].

Защита от перегрузок необходима для предотвращения перегрева проводников или возгорания при превышении допустимого тока, т.е., в результате подключения к сети слишком мощного оборудования. [11], [15].

Защита от коротких замыканий предназначена для разрыва цепи, тем самым обеспечивая защиту проводников и оборудования при резком увеличении значений тока в цепи. В противном случае высок риск возникновения пожара или выхода оборудования из строя, в следствие получения сильных повреждений. [10].

Автоматический выключатель также является коммутирующим аппаратом и позволяет вручную производить включения и отключения подачи питания на определённую линию при окончании смены или для проведения ремонта оборудования. [12].

Данный вид оборудования имеет широкое разнообразие характеристик, что позволяет сделать защиту селективной, т.е. производить отключение лишь аварийного участка, а не всей линии.

Для того, чтобы убедиться в правильности выбранного оборудования, проводят сравнение значения его отключающей способности со значением тока короткого замыкания, который он должен отключать. [13].

Проверка проводится по формуле 114:

$$I_{\text{откл.}} \geq I_{\text{кз}}, \text{ А} \quad (114)$$

где $I_{\text{откл.}}$ – значение тока отключающей способности оборудования, кА;

$I_{\text{кз}}$ – значение тока короткого замыкания на отключаемом участке, кА.

Наименование аппарата, его значение отключающей способности, значение тока короткого замыкания и условие сравнения заносим в таблицу 10.

Таблица 10 – Сводная ведомость значений отключающего тока и тока КЗ

Каталожный номер	Номинальное напряжение, $U_{ном.}$, кВ	Значение отключающей способности выключателя $I_{ном.}$, кА	Значение тока короткого замыкания $I_{кз.}$, кА	Условие выбора
1	2	3	4	5
SPA40H253FVNN5GRRU	0,4	65	10,2	$I_{откл.} \geq I_{кз.}$
SPC100F10022L3DF	0,4	36	10,2	$I_{откл.} \geq I_{кз.}$
SPC100F04022L3DF	0,4	36	10,2	$I_{откл.} \geq I_{кз.}$
SPC100F03222L3DF	0,4	36	10,2	$I_{откл.} \geq I_{кз.}$
SPC100F05022L3DF	0,4	36	10,2	$I_{откл.} \geq I_{кз.}$
SPA16N123FVNN5GRRU	0,4	50	2,8	$I_{откл.} \geq I_{кз.}$
SPA16N064FHNN58VRU	0,4	50	2,8	$I_{откл.} \geq I_{кз.}$
SPA16N044FHNN58VRU	0,4	50	2,8	$I_{откл.} \geq I_{кз.}$
SPC100F00622L3DF	0,4	36	2,6	$I_{откл.} \geq I_{кз.}$
SPC100F01022L3DF	0,4	36	2,6	$I_{откл.} \geq I_{кз.}$
SPC100F01622L3DF	0,4	36	2,6	$I_{откл.} \geq I_{кз.}$
SPC100F02522L3DF	0,4	36	2,6	$I_{откл.} \geq I_{кз.}$
SPC100F03222L3DF	0,4	36	2,6	$I_{откл.} \geq I_{кз.}$
SPC100F05022L3DF	0,4	36	2,6	$I_{откл.} \geq I_{кз.}$
SPC100F25022L3DF	0,4	36	2,6	$I_{откл.} \geq I_{кз.}$

Вывод по разделу:

По результатам проверки, можно утверждать, что предварительно выбранное оборудование подходит к установке по отключающей способности при возникновении коротких замыканий в разных точках электросети.

8 Расчет заземления и молниезащиты

8.1 Расчет заземления

Заземление любого объекта является важным элементом системы электробезопасности и защиты персонала и оборудования. [6], [7].

Оно выполняет такие функции как: предотвращение появления опасного напряжения на корпусах оборудования; обеспечивает безопасность при работе с электроустановками; устраняет электромагнитные помехи, которые могут существенно влиять на показания контрольно-измерительных приборов, а также элементы управления автоматизированных систем; предотвращает сбои в работе чувствительного оборудования; защищает от возгорания порошков и иных веществ при накоплении статического электричества на оборудовании или рабочих поверхностях. [6].

Заземление наиболее востребовано для цехов и производственных предприятий (и иных объектов, использующих оборудования на 380 В и выше), а также объектах, в которых статическое электричество может повлиять на качество продукции (фармацевтика). [6], [7].

Также, заземление регламентируется такими нормативными требованиями, как:

- ПУЭ (Правила устройства электроустановок, 7 изд.);
- ГОСТ Р 50571.5.54-2013 (Заземляющие устройства);
- ТР ЕАЭС 037/2016 (Электромагнитная совместимость);
- ТР ТС 012/2011 (О безопасности оборудования для работы во взрывоопасных средах).

Для расчета заземления объекта необходимы такие данные, как его габариты, а также удельное сопротивление грунта. [1], [2].

Согласно имеющимся габариты завода по производству лекарственных средств «Озон Медика» составляют 115,7×61×23 метров, а земля на территории особой экономической зоны представляют из себя террасовый

чернозём, но, преимущественно, имеет техногенные и урбанизированные почвы, с удельным сопротивлением грунта в диапазоне от 10 Ом·м до 1000 Ом·м. Примем сопротивление грунта равным 350 Ом·м. [1], [2].

Также следует определить длину заземляющей трубы, чей диапазон составляет 1,5 – 4 м. Примем значение, равным 1,5 м.

Находим сопротивление растеканию тока через одиночный заземлитель с диаметром 25 – 30 мм по формуле 121:

$$R_{\text{тр}} = 0,9 \cdot \frac{\rho}{l_{\text{тр}}}, \text{ Ом}, \quad (115)$$

$$R_{\text{тр}} = 0,9 \cdot \frac{350}{1,5} = 210 \text{ Ом}.$$

где ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м;

$l_{\text{тр}}$ – длина заземляющей трубы, м.

После находим приблизительное количество заземлителей без учета коэффициента экранирования:

$$n = \frac{R_{\text{тр}}}{r}, \text{ шт}, \quad (116)$$

$$n = \frac{210}{4} = 52,5 \text{ шт}.$$

где $r = 4 \text{ Ом}$ – допустимое сопротивление заземляющего устройства для электроустановок напряжением до 1 кВ.

Расстояние между трубами находится в диапазоне от 2,75 м до 3 м. Примем значение равным 2,75 м.

Отношение расстояния между трубами к их длине равняется 2.

Согласно вышеперечисленным параметрам, принимаем значение количества заземлителей равным 60 шт., а коэффициент экранирования 0,58.

Получив необходимые данные, находим число заземлителей с учетом коэффициента экранирования по формуле 123:

$$n_3 = \frac{n}{\eta_{тр}}, \text{ шт.}, \quad (117)$$

$$n_3 = \frac{52,2}{0,58} = 90,52 \text{ шт.}$$

где $\eta_{тр} = 0,58$ – коэффициент экранирования заземлителя.

Далее находим длину соединительной полосы:

$$l_{п} = n_3 \cdot l, \text{ м.}, \quad (118)$$

$$l_{п} = 90,52 \cdot 2,75 = 248,92 \text{ м.}$$

где $l = 2,75$ м – расстояние между заземлителями.

Рассчитываем значение периметра завода:

$$P = 2 \cdot (a + b), \text{ м.}, \quad (119)$$

$$P = 2 \cdot (115,7 + 61) = 353,4 \text{ м.}$$

где $a = 115,7$ м – длина завода;

$b = 61$ м – ширина завода.

Расчетная длина соединительной полосы должна быть не менее периметра цеха. Так как значение получилось меньше, то длину полосы находим по формуле 126:

$$l_{п} = P + 16, \text{ м.}, \quad (120)$$

$$l_{п} = 353,4 + 16 = 369,4 \text{ м.}$$

Находим сопротивления растеканию электрического тока через соединительную полосу:

$$R_{п} = 2,1 \cdot \frac{\rho}{l_{п}}, \text{ Ом.}, \quad (121)$$

$$R_{\Pi} = 2,1 \cdot \frac{350}{369,4} = 1,99 \text{ Ом.}$$

Рассчитываем результирующее сопротивление растеканию тока для всего заземляющего устройства:

$$R_3 = \frac{R_{\text{тр}} \cdot R_{\Pi}}{\eta_{\Pi} \cdot R_{\text{тр}} + \eta_{\text{тр}} \cdot R_{\Pi} \cdot n_3}, \text{ Ом,} \quad (122)$$

$$R_3 = \frac{210 \cdot 1,99}{0,21 \cdot 210 + 0,58 \cdot 1,99 \cdot 90,52} = 2,813 \text{ Ом}$$

Сопротивление заземляющего устройства равняется 2,8 Ом, что меньше 4 Ом, а значит значение является удовлетворительным, полученные значения соответствуют норма для ЭУ на напряжение до 1 кВ и заземлители выбраны правильно. [1], [2].

Далее рассчитываем сечение заземляющей полосы:

$$S = \frac{I_{\text{кз}} \cdot \sqrt{t}}{k}, \text{ мм}^2, \quad (123)$$

$$S = \frac{11373 \cdot \sqrt{0,5}}{190} = 42,326 \text{ мм}^2.$$

где $I_{\text{кз}} = 11373 \text{ А}$ – максимальный ток короткого замыкания;

$t = 0,5 \text{ с}$ – время срабатывания защиты;

$k = 190$ – коэффициент, зависящий от материала проводника.

Для исключения электролитической коррозии, материалом заземляющих труб и полосы выбрана оцинкованная сталь. [7].

Согласно ПУЭ, расчетное значение сечения полосы должно составлять не менее 100 мм^2 . Если расчетное значение оказалось меньше установленного ПУЭ, то используем регламентируемое. [9].

Таким образом для заземляющего устройства в качестве заземлителей выбрана оцинкованная сталь трубного профиля с диаметром в 25 мм и

толщиной стенки равной 2 мм, а также полоса из оцинкованной стали сечением с 100 мм², толщиной 3 мм и шириной 25 мм.

8.2 Расчет молниезащиты

Молниезащита, или же комплекс мер и технических решений, предназначена для защиты от разрушительного воздействия молнии. [5].

В перечень её задач входит:

- предотвращение прямых ударов молний в здания и открытые площади;
- исключение риска возникновения шагового напряжения (опасного разряда в земле) после удара молнии;
- защита объектов от разрушений после попадания молнии и пожара;
- защита электрооборудования и систем связи.

Для правильного расчета молниезащиты нужно знать категорию молниезащиты объекта, его зону защиты, что позволит выбрать тип исполнения молниеприёмника и количества токоотводов. [4], [14].

Завод по производству лекарственных средств «Озон Медика» относится ко II категории молниезащиты с заной защиты А (вероятность поражения молнией составляет $\leq 0,1\%$), а значит для защиты объекта могут использоваться стержневые или тросовые молниеотводы. Выбираем к установке тросовые молниеотводы. [4], [14].

При установке для каждого стержневого или стойки тросового молниеприёмника должно быть обеспечено не менее двух токоотводов. Молниеприёмник присоединяется токоотводами к заземляющему устройству, которое соответствует условию, что сопротивление заземляющего устройства для II категории молниезащиты не должно превышать 10 Ом. [5].

Согласно результатам предыдущего пункта, сопротивление заземляющего устройства составляет 2,8 Ом, а значит его можно использовать для рассеивания молниевых зарядов. [4], [14].

Согласно габаритам объекта, находим длину троса молниеотвода:

$$L = \sqrt{a^2 + b^2}, \text{ м}, \quad (124)$$

$$L = \sqrt{115,7^2 + 61^2} = 130,8 \text{ м}.$$

Далее находим высоту зоны защиты:

$$h_3 = 0,85 \cdot h, \text{ м}, \quad (125)$$

$$h_3 = 0,85 \cdot 23 = 19,55 \text{ м}.$$

где $h = 23 \text{ м}$ – высота в самой высоко точке защищаемого объекта.

Принимаем высоту зоны защиты равной 20 метров. Зная значение высоты троса в середине пролёта, можно определить высоту опор. Так как трос имеет длину больше 120 метров, но меньше 150 метров, то значение высоты опор увеличиваем на 3 метра, для учета провеса троса. [4], [14].

Находим значение высоты опор:

$$h_{\text{оп}} = h + h_3 + 3, \text{ м}, \quad (126)$$

$$h_{\text{оп}} = 23 + 20 + 3 = 46 \text{ м}.$$

Рассчитываем радиус защиты молниеприёмника на уровне земли:

$$r = 1,5 \cdot h, \text{ м}, \quad (127)$$

$$r = 1,5 \cdot 23 = 34,5 \text{ м}.$$

Проводим проверку зоны защиты:

$$2r = 69 \text{ м} > b = 61 \text{ м}. \quad (128)$$

Таким образом, в результате расчетов, выбран тросовый молниеприёмник с опорами высотой в 46 метров и радиусом зоны защиты равным 34,5 метра. Так же следует установить минимум 2 токоотвода из

оцинкованной стали сечением минимум 50 мм². Соединения производить сваркой и биметаллическими зажимами для обеспечения защиты от коррозии. Также следует установить УЗИП класса I+II на вводе ВРУ в виде Schneider Electric iPRD 40 3P+N с номинальным током, равным 1250 А и максимальным током разряда 40 кА.

На рисунке 8 представлено примерное изображение тросовой молниезащиты объекта, похожего по форме на завод по производству лекарственных средств «Озон Медика».

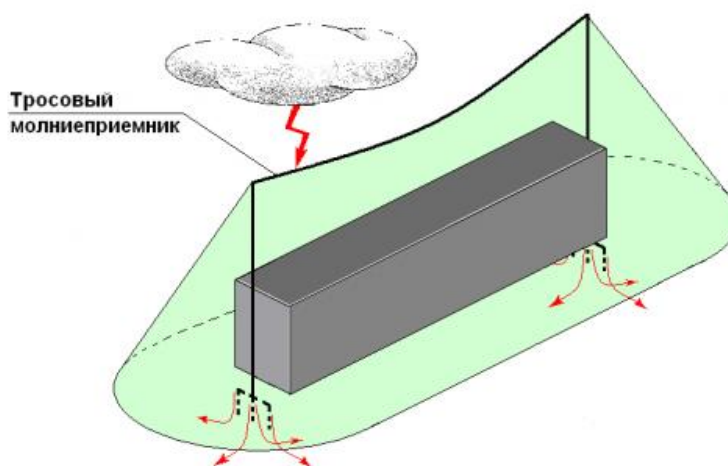


Рисунок 8 – Приближённое исполнение молниезащиты объекта

Вывод по разделу:

По результатам расчётов выбраны габариты и материал заземлителей и полосы заземления, глубина залегания, согласно характеристикам почвы, а также принята к установке тросовая молниезащита с рассчитанной высотой опор, в соответствие с нормативными документами.

9 Разработка предложений по цифровому управлению электроснабжением организации

Цифровое управление производством происходит на базе ПЛК, а также внедрении систем управления SCADA и DCS. Данные системы управления отвечают за свой уровень и взаимодействуют друг с другом на постоянной основе в реальном времени благодаря обмену данными. [22].

SCADA-система в первую очередь отвечает за централизованное управление и мониторинг технологических процессов. Её основная цель состоит в предоставлении диспетчерам и операторам всей полноты информации о текущем состоянии объекта и оборудования, что на нём расположено. Данная система выполняет такие задачи как: сбор и обработка данных с датчиков и устройств, их обработка с последующей визуализацией данных в удобном для анализа виде; мониторинг технологических процессов, что позволяет операторам следить за состоянием объекта; управление оборудованием посредством контроллеров (благодаря установленным нормам работы и пределом отклонения работы оборудования от данных норм) и исполнительных механизмов, что производят непосредственную регулировку работы оборудования; производит оповещение о нештатных ситуациях (критическое превышение параметров или отказ оборудования); хранение данных о работе оборудования, по которым будут производиться анализ и оптимизация технологического процесса. [18].

Принцип работы заключается во взаимодействии между собой полевых устройств, удалённых терминалов и управляющим центром.

Нижний уровень (уровень полевых устройств) представляет собой датчики и исполнительные механизмы. Датчики собирают информацию и передают на средний уровень, а исполнительные механизмы производят необходимые воздействия по командам контроллеров.

Средний уровень (уровень удалённых терминалов) является контроллерами, которые принимают данные от датчиков, производят их

первичную обработку и на их основе отдают управляющий сигнал на исполнительные механизмы, согласно заложенным программам, а также передают информацию на верхний уровень. Контроллеры имеют строгие границы в управляющих воздействиях на оборудование и способны влиять в пределах, заданных программой. Если оборудование начинает работать в нехарактерном для себя режиме, то контроллер подаёт команду на отключение и передаёт на верхний уровень сообщение о нештатной ситуации.

Верхний уровень (уровень оператора) представляет из себя диспетчерскую, подключённую к серверам, на которые поступает информация с контроллеров. На данном уровне производятся: сбор, обработка и хранение полученной информации; визуализация текущей информации и ввод команд со стороны оператора, если необходима корректировка работы оборудования; формирование отчётности по результатам технологического процесса.

SCADA-система связана непосредственно с DCS (Distributed Control System) и MES (Manufacturing Execution Systems). [20].

MES отвечает за планирование производственных заданий для технологического процесса и анализа данных, т.е. за оптимизацию текущей работы и контроль качества продукции. [20].

DCS отвечает за непосредственное управление процессом на рабочем месте, т.е. позволяет вводить непосредственные команды рабочему персоналу для выполнения оборудования технологического задания. Данная система позволяет производить управление только на рабочем месте, но при этом является частью АСУ ТП, а потому также передаёт информацию на сервера, через которые SCADA-система производит обработку информации, визуализирует её и включает в отчёт, что происходит определённая технологическая операция. [20].

На рисунке 9 представлена типовая блок–схема системы управления SCADA.

System Structure and Applications

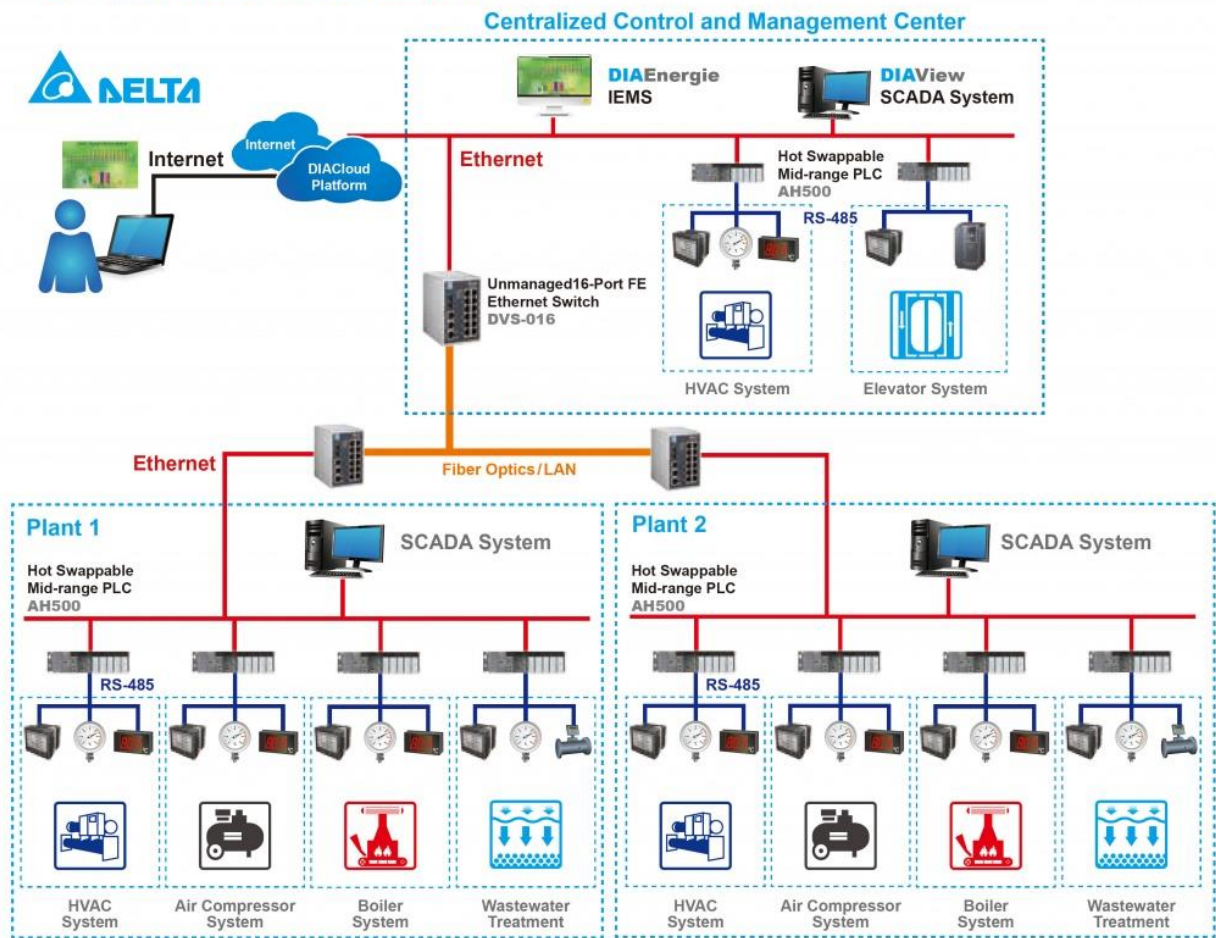


Рисунок 9 – Блок-схема управления SCADA-системы

Рассмотрим работу системы на примере такого оборудования как сушилка-гранулятор. Исполнительными механизмами данного оборудования служат электродвигатели, нагревательные элементы и сервоприводы заслонок для регулировки потока воздуха. Полевыми устройствами являются датчики температуры, влажности и потока воздуха. Всё данное оборудование подключается к контроллеру. [16].

Взаимодействие устройств между собой строится по иерархической схеме с чётким разделением уровней управления, обмена данными и обратной связью. Система работает по принципу: датчики собрали данные, передали на контроллер по интерфейсу связи, контроллер произвёл первичную обработку

данных и сравнил с заданными уставками, производит вычисление управляющих сигналов и подаёт команду на исполнительные механизмы.

Датчик температуры (РТ100) измеряет температуру в камере сушки и передаёт сигнал 4-20 мА в аналоговый вход ПЛК. Далее ПЛК (Siemens S7-1200) сравнивает значение с заданными уставками. Если температура не соответствует необходимой, то ПЛК регулирует мощность нагревателя (ТЭНа) через аналоговый выход (0-10 В) по кабелю КВВГЭ или Modbus RTU RS-485 (в случае, если ЭН управляется регулятором мощности). Цикл повторяется с частотой обновления ПИД-регулятора (каждые 10 мс). [17]

Датчик потока воздуха передаёт данные в ПЛК Modbus RTU RS-485 (витая пара). ПЛК анализирует скорость потока и корректирует частоту вращения вентилятора через частотный преобразователь (ЧП). Если воздушный поток слабый, то ПЛК отправляет команду увеличить частоту через Modbus RTU или Ethernet/IP. Далее частотный преобразователь изменяет скорость двигателя, а обратная связь передаётся обратно в ПЛК.

Количество оборудования, подключаемого к контроллеру, разнится в зависимости от оборудования и протокола связи. Modbus RTU (RS-485) допускает подключение к одной информационной линии до 250 устройств, но такое количество оборудования слишком велико для надлежащей скорости работы и надёжности, а также помех, на 1 контроллер приходится не более 10-30 устройств. [21]. Для одной сушилки-гранулятора характерно наличие 4 датчика и 3 исполнительных устройства, что в общей сложности равно 7-ми устройствам. Соответственно минимум который можно подключить равняется двум сушилкам-грануляторам и максимум 4. К одному контроллеру подключаются только одинаковые типы устройств, если же подключить датчики иного оборудования, то может произойти ошибка в работе и сигнал об аварии будет направлен на верхний уровень с последующим отключением технологического процесса.[19].

Оборудование, датчики, исполнительные механизмы, контроллеры и интерфейсы вносятся в таблицу 11.

Таблица 11 – Сводная таблица оборудования управления

Оборудование	Контроллер	Датчики	Интерфейс связи	Кабель	Исполнительный механизм	Интерфейс связи	Кабель
1	2	3	4	5	6	7	8
Сушилка-гранулятор	Siemens S7-1200	Датчик температуры PT100	Аналоговый 4-20 мА	КВВГЭ 2×0,5 мм ²	ТЭНы	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм ²
		Датчик влажности НУТ 939	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм ²	Сервопривод заслонки	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм ²
		Датчик уровня ультразвуковой	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм ²	Вентилятор	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм ²
Перемешивающая машина	Schneider M221 (RS-485)	Датчик температуры PT100	Аналоговый 4-20 мА	КВВГЭ 2×0,5 мм ²	Мотор-редуктор	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм ²
		Датчик крутящего момента	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм ²			
Смеситель-опудриватель	Delta DVP-12SE (RS-485)	Датчик влажности	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм ²	Пневмоклапаны	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм ²
		Датчик давления	Аналоговый 4-20 мА	КВВГЭ 2×0,5 мм ²			
Вибрационный просеиватель	ОВЕН ПЛК110 (RS-485)	Датчик вибраций	Аналоговый 4-20 мА	КВВГЭ 2×0,5 мм ²	Вибрационный двигатель	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм ²
Просеивающая мельница	Siemens S7-1200	Датчик загрузки	Аналоговый 4-20 мА	КВВГЭ 2×0,5 мм ²	Шаговый двигатель	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм ²
Прессовочная машина	WAGO 750-842	Датчик давления	Аналоговый 4-20 мА	КВВГЭ 2×0,5 мм ²	Гидроцилиндр	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм ²

Продолжение таблицы 11

Оборудование	Контроллер	Датчики	Интерфейс связи	Кабель	Исполнительный механизм	Интерфейс связи	Кабель
1	2	3	4	5	6	7	8
Калибратор	ОВЕН ПЛК110 (RS-485)	Лазерный датчик положения	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм ²	Шаговый двигатель	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм ²
Капсуляционная машина	Beckhoff CX9020 (Modbus RTU)	Оптический датчик	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм ²	Серводвигатель	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм ²
Стерилизатор	Siemens S7-1200	Термопара	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм ²	ТЭН	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм ²
Чиллерная установка	Carel pCO3	Датчик температуры PT100	Аналоговый 4-20 мА	КВВГЭ 2×0,5 мм ²	Компрессор	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм ²
Кондиционер	Carel pCO3	Датчик температуры PT100	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм ²	Вентилятор	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм ²
		Датчик влажности	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм ²	Клапан хладагента	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм ²
Мешалка	ОВЕН ПЛК110	Датчик уровня ультразвуковой	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм ²	Мотор-редуктор	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм ²
		Датчик температуры PT100	Аналоговый 4-20 мА	КВВГЭ 2×0,5 мм ²			

Продолжение таблицы 11

Оборудование	Контроллер	Датчики	Интерфейс связи	Кабель	Исполнительный механизм	Интерфейс связи	Кабель
1	2	3	4	5	6	7	8
Сушильный шкаф	Siemens S7-1200	Термопара	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм²	ТЭН	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм²
		Датчик влажности	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм²	Вытяжной вентилятор	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм²
Компрессор	Schneider M221	Датчик давления	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм²	Компрессор	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм²
		Датчик температуры PT100	Аналоговый 4-20 мА	КВВГЭ 2×0,5 мм²			
Вентиляционная камера	Delta DVP-12SE	Датчик потока воздуха	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм²	Вентилятор	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм²
		Датчик углекислого газа	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм²	Заслонка	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм²
Кондиционер	Carel pCO3	Датчик температуры PT100	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм²	Вентилятор	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм²
		Датчик влажности	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм²	Клапан хладагента	Modbus RTU	RS-485 2×0,75 мм²

Вывод по разделу:

Данная система управления внедряется существующую систему электроснабжения завода по производству лекарственных средств «Озон Медика» и производит необходимые операции для уменьшения электропотребления.

Система управления позволяет уменьшить электропотребления на 30 %, благодаря управлению технологическим процессом и его корректировкой непосредственно во время работы оборудования. Корректировка происходит благодаря объединённым в общую систему управления датчикам и исполнительным механизмам, а также правильному программированию логических контроллеров. Правильное программирование ПЛК позволяет оперативно реагировать на происходящие ситуации во время технологического процесса и производить оператору последующие изменения, и корректировки.

Заключение

В соответствии с темой выпускной квалификационной работы, была произведена интеграция цифрового управления в систему электроснабжения завода по производству лекарственных средств «Озон Медика».

Внедрение цифрового управления в систему электроснабжения завода «Озон Медика» позволило создать современную, энергоэффективную и надежную инфраструктуру, отвечающую строгим требованиям фармацевтического производства. В ходе внедрения была обновлена система энергоснабжения предприятия. Основные преобразования затронули ключевые узлы электрохозяйства: установлены новые вводные распределительные устройства на 2500 и 1000 А с цифровыми системами мониторинга параметров сети, проведена полная реконструкция низковольтного комплекса с внедрением интеллектуальных систем аварийного управления и современной противопожарной защиты. Особое внимание было уделено созданию автоматизированной системы управления энергопотреблением, которая стала центральным элементом цифровой трансформации предприятия.

Технические решения принимались на основании тщательных расчетов, включавших анализ электрических нагрузок, оценку потерь в различных режимах работы и моделирование токов короткого замыкания. В результате были подобраны оптимальные компоненты системы: два трансформатора ТСЛЗ-СЭЩ-1250-10/0,4-УЗ с коэффициентом загрузки 0,59, обеспечивающие надежное электроснабжение с учетом перспектив расширения производства, и автоматические установки компенсации реактивной мощности АУКРМ-0,4-250-10-УХЛ4, позволившие снизить реактивную мощность в 2,2 раза. При выборе оборудования учитывались не только технические параметры, но и особенности фармацевтического производства, включая повышенные требования к бесперебойности питания и электробезопасности.

Система безопасности была разработана с учетом всех современных требований. В ее состав вошли: эффективная система заземления с использованием современных материалов, тросовая молниезащита с оптимально рассчитанной высотой опор, многоуровневая система защиты от коротких замыканий. Особенностью проекта стало применение интеллектуальных автоматических выключателей с цифровыми модулями защиты, позволяющими точно настраивать параметры срабатывания в зависимости от режима работы оборудования.

Ключевым достижением проекта стало создание полностью интегрированной системы цифрового управления, объединившей в себе датчики, исполнительные механизмы и программируемые логические контроллеры в единый автоматизированный комплекс. Разработанная система обеспечивает не только непрерывный мониторинг всех параметров электроснабжения в реальном времени, но и позволяет оперативно корректировать технологические процессы. Внедрение современных алгоритмов управления, включая ПИД-регулирование с циклом обновления 10 мс и предиктивную аналитику, гарантирует высокую точность поддержания заданных параметров и быструю реакцию на любые отклонения от нормального режима работы. В результате происходит снижение электропотребления при одновременном повышении стабильности энергоснабжения.

Полученные результаты соответствуют стратегии цифровой трансформации предприятия и создают прочную основу для дальнейшего развития. Внедренная система предусматривает возможность легкого масштабирования при расширении производства.

Следует отметить, что данные решения не только выполняют текущие задачи энергообеспечения, но и создают фундамент для дальнейшей модернизации предприятия. Внедренные решения обеспечивают долгосрочную эффективность работы и повышают конкурентоспособность компании на фармацевтическом рынке.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Балашов О.П. Методические указания к выполнению расчетного задания по дисциплине «Электробезопасность» для студентов, обучающихся по направлению «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2021. – 13 с.
2. Безопасность жизнедеятельности / С.В, Белов, В.А. Девисилов, А.Ф. Козьяков и др.; Под общ. Ред. С.В. Белова. – М.: Высшая школа, НМЦ СПО, 2014. – 343 с.
3. Вахнина В. В., Черненко А. Н. Проектирование систем электроснабжения. Учеб.-метод. пособие. – Тольятти: ТГУ, 2016. – 78 с.
4. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций СО 153-34.21.122-2003.
5. Кабышев А. В. Молниезащита электроустановок систем электроснабжения: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 124 с.
6. Карякин Р. Н. Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергосервис, 2014. – 375 с.
7. Кудрин Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий: Учебник. – 2-е изд. – М.: Интермет Инжиниринг, 2006. – 672 с.
8. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – СПб.: Энергоатомиздат, 2013.
9. РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания. – М.: Энергия, 2022. – 69 с.
10. Фролов Ю. М. Основы электроснабжения. – М.: Лань, 2018. – 480 с.
11. Хорольский В. Я. Надежность электроснабжения. Учебное пособие. – М.: Форум, Инфра-М, 2019. – 128 с.
12. Шеховцов В. П. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению. – М.: Форум, Инфра-М, 2020. – 136 с.

13. Шеховцов В.П. Расчет и проектирование схем электроснабжения. Методическое пособие для курсового проектирования [Электронный ресурс] URL: <http://znanium.com/catalog/product/1009603> (дата обращения 11.04.2025)
14. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/> (дата обращения: 06.04.2025).
15. Юндин М. А. Курсовое и дипломное проектирование по электроснабжению. Учебное пособие. – М.: Лань, 2019. – 320 с.
16. Bequette, B.W. Process Control: Modeling, Design, and Simulation. – 2nd ed. – Prentice Hall, 2017. – 832 p.
17. Bolton, W. Instrumentation and Control Systems. – 3rd ed. – Newnes, 2021. – 426 p.
18. Boyer, S.A. SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition. – 4th ed. – ISA, 2019. – 358 p.
19. Gruhn, P., Cheddie, H. Safety Instrumented Systems: Design, Analysis, and Justification. – 2nd ed. – ISA, 2018. – 320 p.
20. Kletti, J. Manufacturing Execution Systems (MES). – 2nd ed. – Springer, 2020. – 294 p.
21. Knapp, E.D. Industrial Network Security: Securing Critical Infrastructure Networks for Smart Grid, SCADA, and Other Industrial Control Systems. – 2nd ed. – Syngress, 2014. – 458 p.
22. Stenerson, J. Industrial Automation and Process Control. – 5th ed. – Pearson, 2018. – 576 p.