

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

Институт химии и энергетики  
(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»  
(наименование)

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
(код и наименование направления подготовки/ специальности)

Электроснабжение  
(направленность (профиль) / специализация)

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Проектирование системы электроснабжения предприятия по выпуску медицинских изделий

Обучающийся

Р.А. Хамдамов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Д.Л. Спиридонов

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

Консультант

к.п.н., доцент, А. В. Егорова

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

Тольятти 2024

## Аннотация

Пояснительная записка содержит 57 страниц, 14 рисунков, 19 таблиц, список литературных источников из 27 наименований. Графическая часть представлена 6 чертежами формата А1.

Ключевые слова: производство медицинских шприцев, электроснабжение, освещение, распределительное устройство, трансформаторная подстанция, релейная защита.

Объектом исследования является система электроснабжения предприятия по производству медицинских шприцов.

Цель работы – разработка системы электроснабжения предприятия по производству медицинских шприцев в соответствии требованиями нормативно правовыми актами (НПА).

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- сбор информации об объекте электроснабжения;
- определение максимальной и сменной электрической мощности, необходимой для работы оборудования и освещения;
- выбор силовых трансформаторов подстанции;
- выбор линий электроснабжения;
- выбор оборудования системы электроснабжения;
- выбор и обоснование электрической схемы электроснабжения;
- расчёт заземления и молниезащиты производственного здания.

В результате выполнения работы проведены расчеты низковольтных и высоковольтных линий, выбраны трансформаторы, компенсирующие устройства, средства релейной защиты и автоматические выключатели, выбраны сечения кабелей.

## **Abstract**

The title of the graduation work is «Power supply system enterprises for the production of medical devices ».

The senior consists of an explanatory note on 57 pages, introduction, including 14 figures, 19 tables, the list of 27 references including 5 foreign sources and the graphic part on 6 A1 sheets.

The key issue of graduation work is to improve the reliability of the power supply system of a large consumer of the plant for the production of medical devices such as medical syringes.

The object of senior thesis is the power supply system enterprises for the production of medical syringes.

The aim of the work is to give some information about the development measures for the design power supply system for the production of medical syringes.

The work touches upon:

- collection of information about the power supply facility;
- determination of the maximum and replaceable electrical power required for the operation of equipment and lighting;
- selection of substation power transformers;
- selection of power supply lines;
- selection of power supply system equipment;
- selection and justification of the electrical power supply circuit;
- calculation of grounding and lightning protection of an industrial building.

In conclusion we'd like to stress, during the work we made calculations of low-voltage and high-voltage lines, transformers, compensating devices, relay protection devices and circuit breakers are selected, cable sections are selected.

## Содержание

Введение.....	4
1 Объект электроснабжения – предприятие по выпуску медицинских шприцов.....	5
1.1 Краткая характеристика технологического цикла.....	5
1.2 Требования к производственным помещениям.....	6
2 Расчёт ожидаемых электрических нагрузок.....	8
2.1 Электрическая мощность, потребляемая заводским оборудованием .....	8
2.2 Потребление электроэнергии для освещения производственных помещений .....	11
2.3 Построение картограммы электрических нагрузок.....	16
2.4 Расчет нагрузок, подключённых к шинам распределительных устройств .....	20
3 Расчёт числа и установленной мощности трансформаторов на подстанции .....	25
3.1 Выбор трансформаторов .....	25
3.2 Расчет и выбор компенсирующего устройства.....	26
4 Электрическая схема электроснабжения .....	32
4.1 Выбор и обоснование схемы.....	32
4.2 Выбор проводников .....	34
4.3 Выбор автоматических выключателей .....	36
5 Расчёт значений токов коротких замыканий.....	38
5.1 Расчет сопротивлений элементов сети .....	38
5.2 Токи короткого замыкания в точке К1 .....	39
5.3 Токи короткого замыкания в точке К2 .....	40
5.4 Токи короткого замыкания в точке К3 .....	41
5.5 Проверка коммутационного оборудования по результатам расчетов токов короткого замыкания.....	41

6 Релейная защита трансформаторов ТМ-400/10/0,4 .....	43
7 Расчет заземления зданий и сооружений объекта .....	45
8 Молниезащита производственного здания.....	47
Заключение .....	51
Список используемых источников.....	53

## Введение

Темой данной работы является электроснабжение предприятия по производству медицинских шприцев.

Актуальность темы определяется важнейшей ролью электроснабжения в выпуске качественной продукции, так как электроэнергетика коренным образом отличается от других отраслей промышленности [25]. Стабильное, достаточное по мощности электроснабжение необходимо для функционирования оборудования. Правильный выбор трансформаторов и кабелей необходим для минимизации потерь, коммутирующие устройства должны обеспечить защиту от коротких замыканий [7].

Объектом исследования в данной работе является система электроснабжения небольшого промышленного предприятия, в которой осуществляется преобразование напряжения 10 кВ в промышленное напряжение и распределение его между потребителями.

Предметом разработки является комплекс электротехнических устройств и агрегатов: трансформаторная подстанция, сеть электротехнических кабелей и распределительных устройств, коммутирующих устройств. Важной задачей проектирования является определение центра электрических нагрузок и оптимальное расположение электрической подстанции и распределительных шкафов. В комплекс расчётов входит величина необходимого потребления электроэнергии для освещения помещений в предприятии в соответствии с санитарными нормами, а также величина максимальных значений токов короткого замыкания. Предмет проектирования включает также средства защиты людей и оборудования от поражения электрическим током, в том числе в нештатных ситуациях (молниезащита).

В работе выполняются расчёты электротехнического оборудования для конкретного завода, с учётом его производственной мощности, занимаемой площади, а также с учётом вероятных потерь электроэнергии.

# **1 Объект электроснабжения – предприятие по выпуску медицинских шприцов**

## **1.1 Краткая характеристика технологического цикла**

Предприятие представляет собой завод полного цикла по выпуску медицинских шприцев, с максимальной производительностью 20 миллионов шприцев в год. В качестве объекта электроснабжения завод медицинских шприцев относится ко второй категории надёжности электроснабжения.

На предприятии имеются две автоматические линии: для изготовления корпусов и плунжеров шприцев и для производства игл [27].

Технологические переходы при изготовлении одноразовых шприцев:

- а) – литьё под давлением;
- б) – печать градуировки;
- в) – сборка;
- г) – блистерная упаковка;
- д) – стерилизация.

Технологические переходы при изготовлении игл:

- а) – усадка по диаметру;
- б) – резка трубок;
- в) – удаление заусенцев;
- г) – промывка;
- д) – заточка трубок;
- е) – разделение;
- ж) – подготовка заготовок игл к обмотке лентой;
- и) – оклеивания заготовок игл липкой лентой;
- к) – заточка заготовок игл;
- л) – шлифование;
- м) – электролиз трубок игл;
- н) – ультразвуковая чистка;

п) – контроль качества;

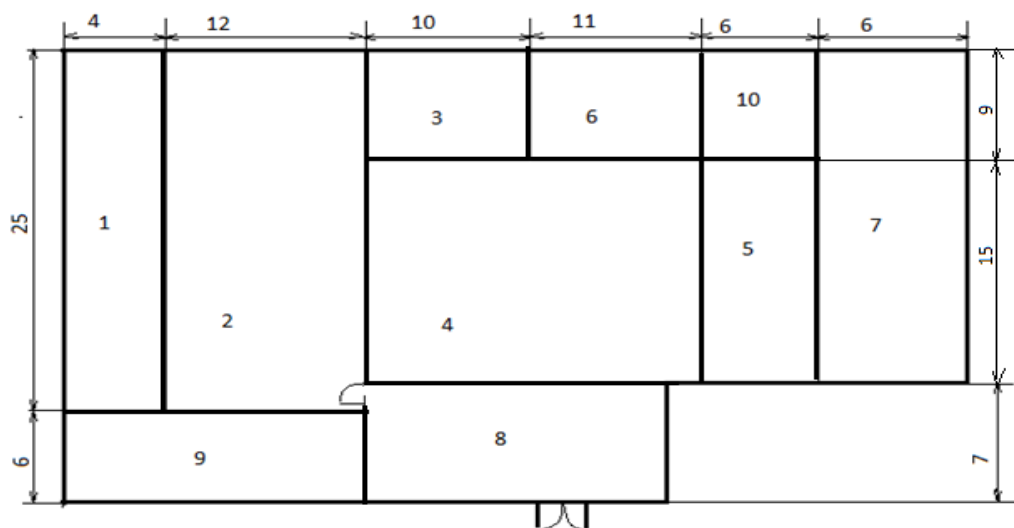
р) – сборка игл.

Производственные процессы автоматизированы. Станки являются приёмниками электроэнергии.

## 1.2 Требования к производственным помещениям

Заводу необходимо производственное помещение общей площадью 780 м<sup>2</sup>. Высота потолков 5 м. Площади производственных помещений:

- помещение для термопластавтоматов – 120 м<sup>2</sup>;
- сборочный цех – 300 м<sup>2</sup>;
- упаковочный цех – 100 м<sup>2</sup>;
- помещение для стерилизации – 100 м<sup>2</sup>;
- цех по изготовлению игл – 160 м<sup>2</sup>.



Наименование помещений: 1 – склад хранения сырья; 2 – помещение для термопластавтоматов; 3 – склад хранения готовых частей шприца; 4 – помещение для сборочной линии; 5 – помещение для упаковки; 6 – помещение для стерилизации; 7 – склад хранения готовой продукции; 8 – бытовые помещения; 9 – помещение для производства медицинских игл; 10 – компрессорная

Рисунок 1 – План производственных помещений



Все производственные помещения должны иметь электрическое освещение, соответствующее требованиям санитарных норм. для защиты персонала от поражения электрическим током все электроприемники должны быть заземлены, здание должно быть обеспечено молниезащитой.

Вывод по разделу 1.

Приведена краткая характеристика предприятия по производству медицинских шприцев, сведения о специфике производства, максимальной производительности, площади занимаемых предприятием помещений с указанием высоты потолков. Приведён состав цехов предприятия, указана категория по надежности электроснабжения, приведена информация по площади цехов и технологических переходах при изготовлении шприцев и при изготовлении игл.

## 2 Расчёт ожидаемых электрических нагрузок

### 2.1 Электрическая мощность, потребляемая заводским оборудованием

При расчёте энергопотребления примем потребляемую станками мощность равной номинальной паспортной мощности.

Полная мощность, потребляемая из сети, определяется с учётом реактивной мощности [7].

Для единичного электроприёмника

$$P_p = P_n, \quad (1)$$

$$Q_p = P_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_n, \quad (2)$$

$$S_p = \frac{P_p + Q_p}{\cos \varphi_n} = \frac{P_n}{\cos \varphi_n}, \quad (3)$$

где  $P_n$  – номинальная активная мощность;

$\cos \varphi_n$  – номинальный коэффициент мощности единичного приёмника;

$P_p$ ,  $Q_p$ ,  $S_p$  – соответственно активная реактивная и номинальная расчётные мощности единичного приёмника.

Мощность, потребляемая от сети, вычисляется с учётом потерь. Потери происходят в двигателе и определяются КПД двигателя:

$$P_d = \frac{P_p}{\eta}, \quad (4)$$

где  $\eta$  – КПД двигателя.

Кроме того, потери происходят в кабелях питания и зависят от активного сопротивления кабелей [10]:

$$P_k = \rho \cdot l, \quad (5)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление кабеля;

$l$  – длина кабеля.

При точном расчёте энергопотребления учитывается коэффициент использования оборудования. Для оценочного расчёта, выполняемого для организации электроснабжения, примем коэффициент использования 1, считая, что всё оборудование работает в номинальном режиме [12].

Примем также следующие допущения: средний коэффициент мощности  $\cos\varphi_n = 0.8$ ; Средний КПД электроприёмников  $\eta = 0,96$ ; средняя длина кабеля питания 10м,  $\rho = 0,022 \text{ Ом/м}$ .

Номинальная (паспортная) активная мощность, потребляемая станками и автоматами на предприятии, указана в таблице 1. Обозначения:  $P$  – активная мощность агрегата;  $n$  – количество агрегатов;  $P_{\Sigma}$  – суммарная активная мощность;  $P_{номр}$  – потребляемая из сети активная мощность.

Таблица 1 – Максимальное потреблением энергии оборудованием на линии по производству медицинских шприцев

Наименование оборудования	$P_i$ , кВт	$N$	$P_{i\Sigma}$ , кВт	КПД	$P_{i номр}$
Термопластавтомат	32	3	96	0,85	112,9
Погрузчик	2,3	3	6,9	0,8	8,6
Охладитель	45	1	45	0,8	56,3
Робот манипулятор	0,1	1	0,1	0,75	0,1
Система водяного охлаждения	16	1	16	0,8	20
Кондиционер в помещении для термопластавтоматов	3	1	3	0,9	3,3
Печатающая машина для нанесения градуировочной шкалы	3	2	6	0,7	8,6
Сборочная машина	5	2	10	0,7	14,3
Блистерная упаковочная машина	9,5	2	19	0,7	27,1
Сборочная машина для игл	20	1	20	0,7	28,6
Линия по производству трубки иглы	40	1	40	0,85	47,1
Воздушный компрессор	35	1	35	0,75	46,7
Стерилизатор	35	1	35	0,9	38,9
Бытовые помещения	2	1	2	0,85	2,35

Вычислим реактивную и полную мощности электроприёмников [21].

Реактивную мощность вычислим по формуле (6), полную по (7).

$$Q_i = P_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_i = P_i \cdot \frac{\sqrt{1 - (\cos \varphi_i)^2}}{\cos \varphi_i}, \quad (6)$$

$$S_i = \frac{P_i}{\cos \varphi_i}. \quad (7)$$

Коэффициент мощности зависит от коэффициента использования  $K_u$ , этот параметр включён в таблицу 2. В соответствии с ним вычисляется средняя мощность за смену

Таблица 2 – Реактивная, полная, сменная мощность электроприёмников

Наименование оборудования	$P_{i \text{ ном}}$ кВт	$K_u$	$\cos \varphi_i$	$Q_i$ кВАр	$S_i$ кВА	$P_{i \text{ см}}$	$Q_{i \text{ см}}$
Термопластавтомат	112,9	0,95	0,8	84,7	141,1	107,3	80,5
Загрузчик	8,6	0,5	0,75	7,6	11,5	4,3	3,8
Охладитель	56,3	0,95	0,95	18,5	59,3	53,5	17,6
Робот-манипулятор	0,1	0,5	0,72	0,1	0,1	0,1	0,1
Система водяного охлаждения	20	0,95	0,9	9,7	22,2	19	9,2
Кондиционер помещения для термопластавтоматов	3,3	0,95	0,9	1,6	3,7	3,1	1,5
Печатающая машина для нанесения градуировочной шкалы	8,6	0,7	0,8	6,5	10,8	6	4,6
Сборочная машина	14,3	0,8	0,8	10,7	17,9	11,4	8,6
Блистерная упаковочная машина	27,1	0,8	0,8	20,3	33,9	21,7	16,2
Сборочная машина для игл	28,6	0,8	0,8	21,5	35,8	22,9	17,2
Линия по производству трубки иглы	47,1	0,85	0,85	29,2	55,4	40	24,8
Воздушный компрессор	46,7	0,85	0,85	28,9	54,9	39,7	24,6
Стерилизатор	38,9	0,95	0,9	18,8	43,2	37	17,9
Бытовые помещения	2	0,85	0,9	0,96	2,2	2	0,96
Итого	412,5	-	-	259,06	492	368	227,6

Потери в кабелях не должны превышать 5%, максимальная активная потребляемая мощность вычисляется по формуле (8)

$$S_d = \frac{S}{0,95} = \frac{492}{0,95} = 517,8 \text{ кВт.} \quad (8)$$

## 2.2 Потребление электроэнергии для освещения производственных помещений

Важной составляющей энергозатрат предприятия является электрическое освещение производственных и бытовых помещений. Нормативная освещённость каждого помещения зависит от его назначения и должна соответствовать санитарным нормам. Затраты электрической энергии зависят от площади помещения, нормативной освещённости и типа светильников. Нормы освещённости для помещений выбраны в соответствии с СНиП 23-05-95 [19]. Расчёт необходимого количества светильников выполнялся с использованием программного обеспечения DIALux 4.13 Light [4].

Для освещения сборочного цеха, термопласт автоматов, упаковочного цеха и других помещений, где выполняются ответственные операции, выбран светильник ДВО 2001 PRO светодиодный 45 Вт 6500К (Рисунок 2).



Рисунок 2 – Светильник ДВО 2001 PRO светодиодный 45Вт 6500К Gr. оп.

Основные характеристики светильника ДВО 2001 PRO:

- артикул светильника: LTP-DVO1-2001-45-65-K01;

- источник света: светодиоды;
- мощность: 45 Вт;
- габаритные размеры (Д×Ш×В), мм: 1000x588x588;
- световой поток: 5400 лм.

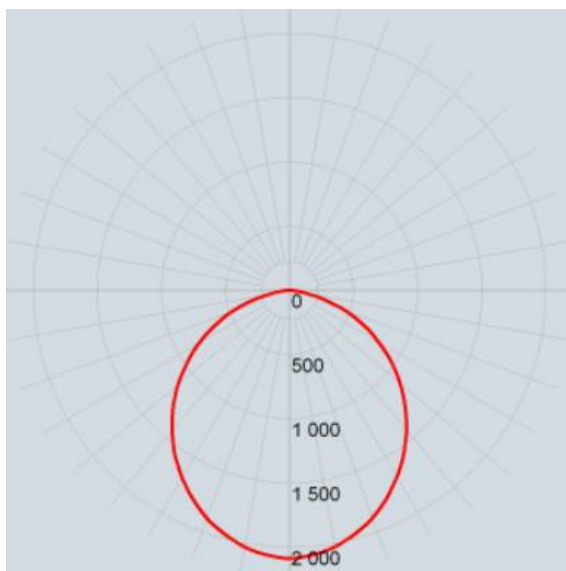


Рисунок 3 – Световая характеристика светильника ДБО 2001 PRO

Для освещения складских и бытовых помещений выбран светильник ДБО 5004 (Рисунок 4).

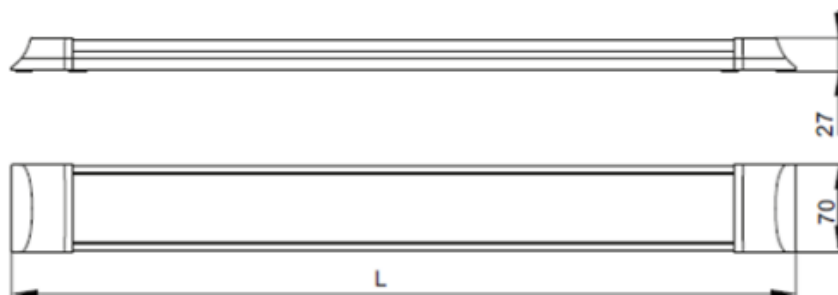


Рисунок 4 – ДБО 5004 светодиодный 36Вт

Основные характеристики светильника ДБО 5004:

- артикул: LDBO0-5004-36-4000-K03;

- источник света: светодиоды,
- мощность: 36 Вт,
- габаритные размеры (Д×Ш×В), мм: 1200x70x27;
- световой поток, лм: 2400.

Светильники светодиодные линейные серии ДБО товарного знака ИЕК предназначены для работы в однофазных сетях переменного тока напряжением 230 В частоты 50 Гц и соответствуют ГОСТ ИЕС 60598-2-1

Область применения светильников - для внутреннего освещения жилых, общественных и производственных помещений.

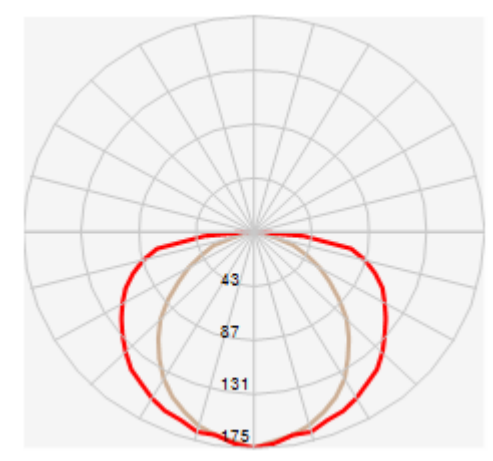


Рисунок 5 – Световая характеристика светильника ДБО 5004

Количество светильников, которые необходимо установить внутри производственного помещения, выполним по методу коэффициента использования [20].

Вычислим площадь каждого помещения:

$$S = a \cdot b, \quad (9)$$

где  $a$  – длина помещения, м;

$b$  – ширина помещения, м.

Коэффициенты отражения света от потолка, стен и пола примем соответственно равными 80%, 50%, 30%.

Число светильников определяем по формуле (10):

$$K = \frac{E \cdot S \cdot K_3}{\eta \cdot \Phi_{л}}, \quad (10)$$

где  $E$  – требуемая освещённость;

$S$  – площадь;

$K_3$  – коэффициент запаса;

$\eta$  – коэффициент использования;

$\Phi_{л}$  – световой поток.

Активная мощность, потребляемая системой освещения:

$$P_{осв} = \sum K_i \cdot P_i. \quad (11)$$

Реактивная мощность осветительной системы:

$$Q_{осв} = P_{осв} \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (12)$$

Реактивная мощность осветительной системы:

$$S_{осв} = \frac{P_{осв}}{\cos \varphi}. \quad (13)$$

Выбрав светильники, внесём информацию о них в программу DIALux 4.13; внесём также информацию о площади помещения, высоте потолка, требуемой освещённости [13]. В результате получим необходимое количество светильников для каждого помещения и потребляемую активную мощность. Результаты расчётов приведены в таблице 3.



Таблица 3 – Энергозатраты на освещение

Название	S, м2	Освещённость	Лампа	Мощность, Вт	Колич.	Общая мощность, Вт
Склад хранения сырья	100	75	ДБО 50004	36	13	468
Помещение для термопластавтоматов	300	300	ДВО 2001 PRO	45	30	1350
Склад хранения готовых частей шприца	90	150	ДВО 50004	36	10	360
Помещение для сборочной линии	315	500	ДВО 2001 PRO	45	51	2295
Помещение для упаковки	90	300	ДВО 2001 PRO	45	10	450
Помещение для стерилизации	60	200	ДВО 2001 PRO	45	5	225
Склад хранения готовой продукции	90	150	ДБО 50004	36	10	360
Бытовые помещения	140	200	ДВО 2001 PRO	45	12	540
Помещение для производства медицинских игл	90	300	ДВО 2001 PRO	45	10	450
Компрессорная	100	75	ДБО 50004	36	13	468
Итого						6966

В результате расчётов получена активная мощность. Полную мощность, с учётом реактивной, вычислим, приняв  $\cos\varphi=0.85$ :

$$S_{\text{осв}} = \frac{P_{\text{осв}}}{\cos\varphi} = \frac{6966}{0,95} = 7332 \text{ ВА.} \quad (14)$$

Затраты на освещение составляют 1,3% от общих затрат.

В блоке бытовых помещений, кроме осветительных приборов, нужно учитывать бытовые приборы, например чайник, электроплитка, бытовой

кондиционер. Для электропитания блока бытовых помещений предусмотрен расход электрической мощности 2 кВт.

Общее потребление от электросети, включающее электропитание станков и освещение, составляет:

$$S_{\text{общ}} = 517,8 + 7,3 = 525,2 \text{ кВА.} \quad (15)$$

### 2.3 Построение картограммы электрических нагрузок

Определим расположение центра нагрузок, для этого построим картограмму электрических нагрузок [18].

В таблице 4 приводятся активная электрическая мощность, потребляемая оборудованием и осветительными приборами в каждом помещении.

Таблица 4 – Активная электрическая мощность, потребляемая в помещениях предприятия

Название	Мощность, потр. оборудованием, кВт	Мощность, потребляемая освещением, кВт	Общая потребляемая мощность, кВт
Склад хранения сырья	2,3	0,47	2,77
Помещение для термопластавтоматов	160	1,35	161,35
Склад хранения готовых частей шприца	2,3	0,36	2,66
Помещение для сборочной линии	10,1	2,3	12,4
Помещение для упаковки	25	0,45	25,45
Помещение для стерилизации	35	0,23	35,23
Склад хранения готовой продукции	2,3	0,36	2,66
Бытовые помещения	2	0,54	2,54
Помещение для производства медицинских игл	60	0,45	60,45
Компрессорная	35	0,47	35,47

Построим картограмму активных нагрузок и вычислим центр нагрузок [16].

При построении картограммы вычисляем квадратный корень из мощностей и рисуем круги, диаметр которых пропорционален  $\sqrt{P_i}$ .

Определим центр электрических нагрузок предприятия [20]. Для этого вычислим координаты центров каждого помещения и совместим с центром конкретного помещения условный центр электрических нагрузок, потребляемых в данном помещении. Далее вычислим координаты центра нагрузок предприятия. Расчёт производится по формулам:

$$x_c = \frac{\sum_i P_i x_i}{\sum_i P_i}, \quad (16)$$

$$y_c = \frac{\sum_i P_i y_i}{\sum_i P_i}, \quad (17)$$

где  $\sum_i P_i$  – суммарная мощность;

$x_i$  и  $y_i$  – координаты  $i$ -го потребителя.

о

Таблица 5 – Координаты условного центра электрических нагрузок

Название	Потребляемая мощность, кВт	$x_i$	$y_i$	$P_i x_i$	$P_i y_i$
Склад хранения сырья	2,77	2	18,5	5,5	51,2
Помещение для термопластавтоматов	161,35	8	18,5	1290,8	2984,9
Склад хранения готовых частей шприца	2,66	21	26,5	55,86	70,4
Помещение для сборочной линии	12,4	26,5	14,5	328,6	179,8
Помещение для упаковки	25,45	30	14,5	763,5	369
Помещение для стерилизации	35,23	31,5	26,5	1109,7	933,5
Склад хранения готовой продукции	2,66	46	19	122,3	50,5
Бытовые помещения	2,54	20	3,5	50,8	8,8
Помещение для производства игл	60,45	4,5	3	272	181,3
Компрессорная	35,47	30	26,5	1064,1	939,9
Центр нагрузок	340,98	14,85	16,9	5063,3	5769,8

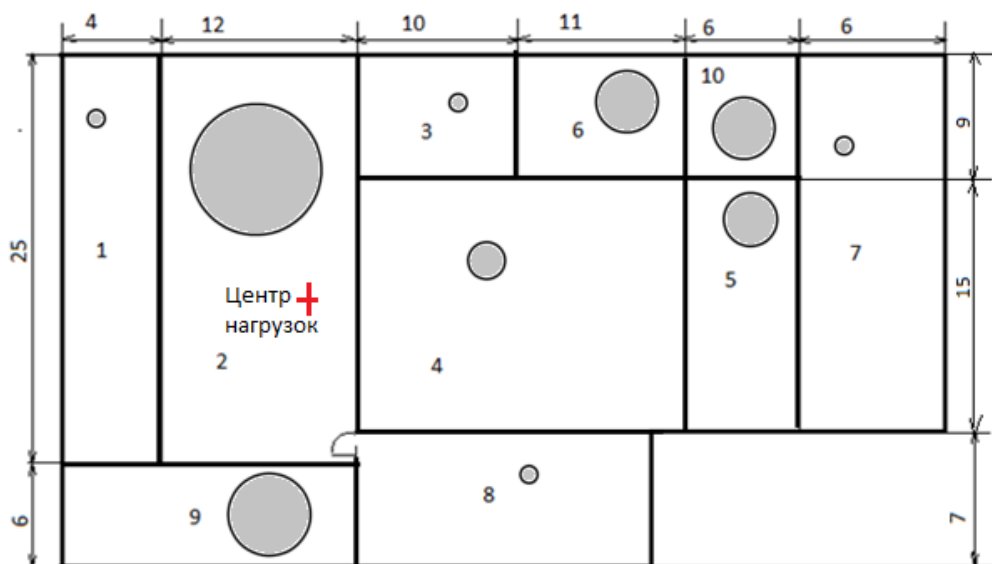


Рисунок 6 – Картограмма нагрузок

Выбираем место для подстанции с учётом рассчитанного центра нагрузок и с учётом расположения основных электроприёмников. Подстанция представляет собой отдельно стоящее сооружение в непосредственной близости к зданию предприятия. (Рисунок 7).

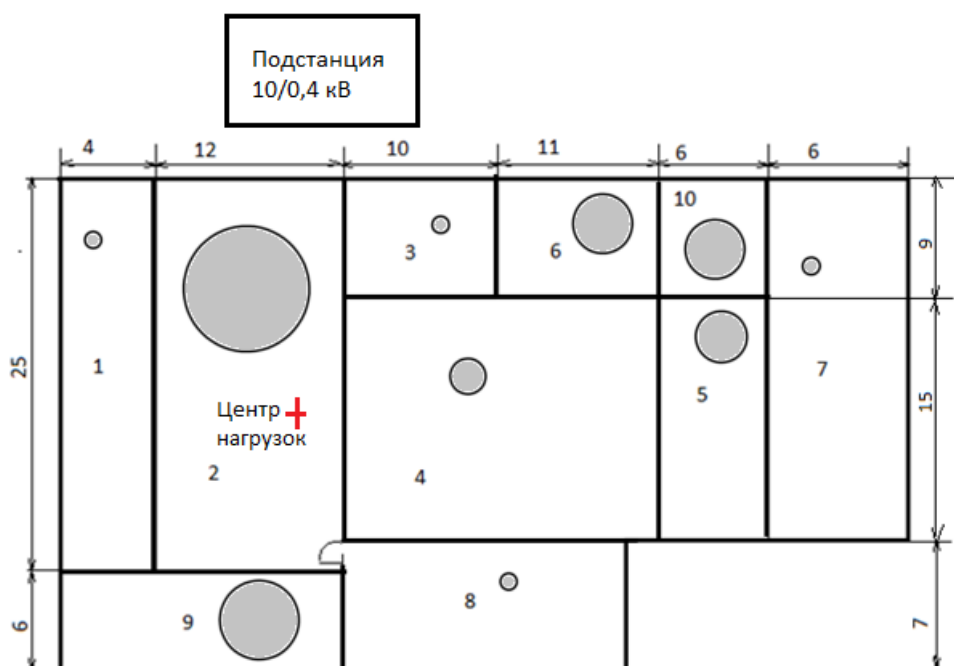


Рисунок 7 – План производственного здания с отдельно стоящей электрической подстанцией

Схема подключения электроприёмников показана на рисунке 8.

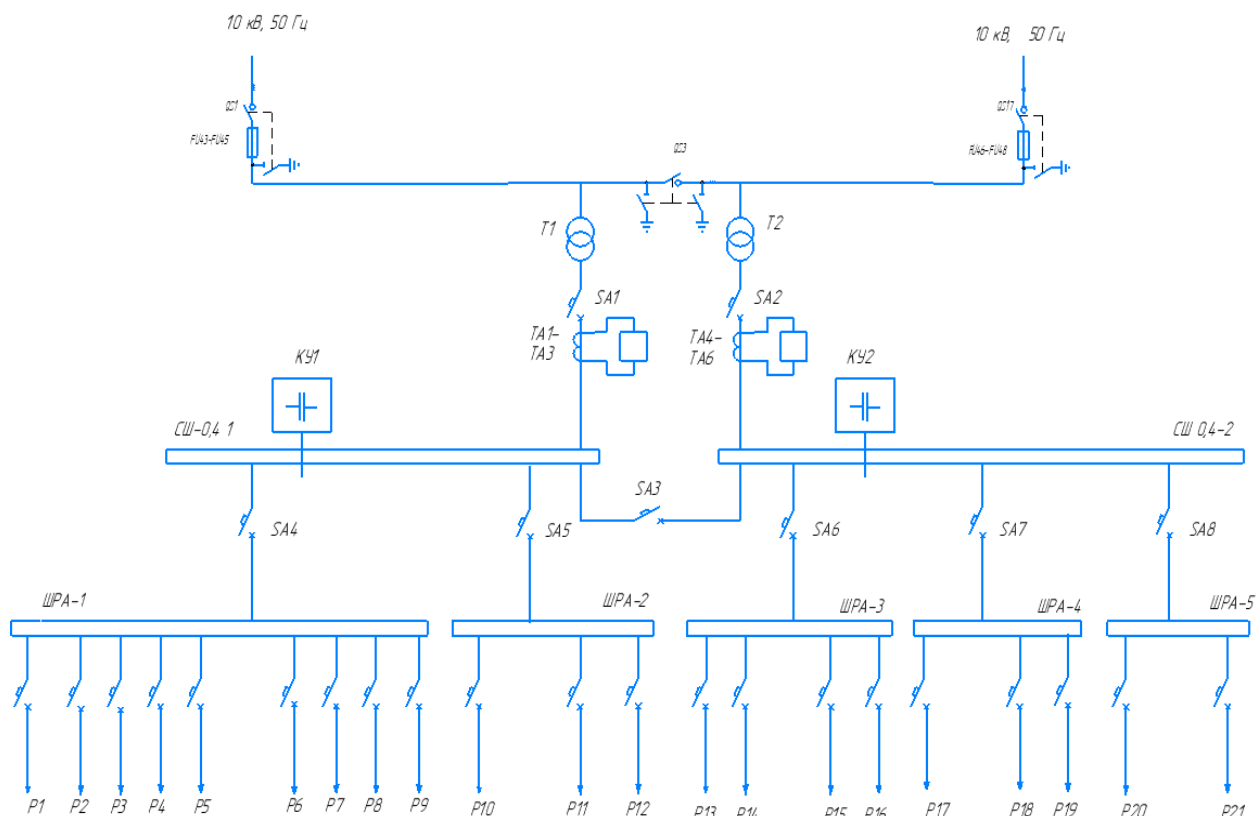


Рисунок 8 - Схема электроснабжения предприятия

Таблица 6 – Распределение электроприёмников по секциям

Секция шин 1		Секция шин 2	
Электроприёмники секции 1	Нагрузка кВА	Электроприёмники секции 2	Нагрузка кВА
Термопластавтоматы	141,1	Сборочные машины	17,9
Погрузчик	11,5	Блистерные упаковочные машины	33,9
Охладитель	59,3	Сборочная машина для игл	35,8
Система водяного охлаждения	22,2	Линия по производству трубки иглы	55,4
Кондиционер помещения для термопластавтоматов	3,7	Воздушный компрессор	54,9
Печатающая машина для градуировочной шкалы	10,8	Стерилизатор	43,2
Робот манипулятор	0,2	-	-
Итого	248	Итого	241

Таблица 7 – Распределение осветительных приборов по секциям

Энергозатраты на освещение 1 секции	Нагрузка, кВА	Энергозатраты на освещение 2 секции	Нагрузка, кВА
Помещение для термопластавтоматов	1,35	Помещение для сборочной линии	2,295
Склад хранения сырья	0,47	Помещение для упаковки	0,45
Склад хранения готовых частей шприцов	0,36	Помещение для стерилизации	0,225
Склад хранения готовой продукции	0,36	Бытовое помещение	0,54
-	-	Помещение для производства медицинских игл	0,45
-	-	Компрессорная	0,468
Итого	2,54		4,43

Общая нагрузка на секцию 1:

$$S_1=248+2,54=250,54 \text{ кВА.}$$

Общая нагрузка на секцию 2:

$$S_1=241+4,43=245,43 \text{ кВА.}$$

## 2.4 Расчет нагрузок, подключённых к шинам распределительных устройств

Для правильного выбора распределительных шин выполним расчёт электроэнергии, распределяемой каждым ШРА [22].

Таблица 8 - Распределение электроприёмников по ШРА:

Обозначение распределительного устройства	Наименование электроприемника
ШРА1	Термопластавтомат 1
	Термопластавтомат 2
	Термопластавтомат 3
	Погрузчик 1
	Печатающая машина 1
	Печатающая машина 2

Продолжение таблицы 8

Обозначение распределительного устройства	Наименование электроприемника
ШРА1	Охладитель
	Кондиционер
	Система водяного охлаждения
ШРА2	Погрузчик 2
	Погрузчик 3
	Робот-манипулятор
ШРА3	Сборочная машина 1
	Сборочная машина 2
	Линия по производству трубки игл
	Машина для сборки игл
ШРА4	Блистерная упаковочная машина 1
	Блистерная упаковочная машина 2
	Электрооборудование бытовых помещений
ШРА5	Стерилизатор
	Компрессор

При расчёте учитываем максимальную мощность и сменную мощность. Максимальная мощность складывается из нормативных мощностей всех электроприёмников, если бы они были включены одновременно [17]. Сменная мощность рассчитывается с учётом реальной загрузки оборудования. Вычисления выполняем по формулам ШРА1 по формулам (18), (19), (20):

$$P_{см(ШРА1)} = \sum P_{зр} = 203,97 \text{ кВт} \quad (18)$$

$$P_{см(ШРА1)} = \sum P_{см} = 190,33 \text{ кВт} \quad (19)$$

$$Q_{см(ШРА1)} = \sum Q_{см(ШРА1)} = 114,67 \text{ квар} \quad (20)$$

$$S_{см(ШРА1)} = \sqrt{P_{см(ШРА1)}^2 + Q_{см(ШРА1)}^2} = 222,2 \text{ кВА.} \quad (21)$$

Коэффициент использования для ШРА1 вычислим по формуле:

$$K_{и ср} = \frac{P_{см(ШРА1)}}{P_{н(ШРА1)}} = \frac{190,33}{203,97} = 0,933, \quad (22)$$

$$m = \frac{P_{н. нб}}{P_{н. нм}} = \frac{45}{3} = 15. \quad (23)$$

Определим эффективное число электроприемников.

Поскольку  $m > 3$ , эффективное число электроприемников находим по формуле:

$$n_{\text{э}} = 2 \cdot \frac{\Sigma P_{\text{н}}}{P_{\text{н нб}}} = 2 \cdot \frac{222,2}{45} = 9. \quad (24)$$

Коэффициент максимума активной нагрузки вычислим по формуле (25):

$$K_{\text{м}} = 1 + \frac{1,5}{9} \cdot \sqrt{\frac{1 - K_{\text{у ср}}}{K_{\text{у ср}}}} = 1 + \frac{1,5}{9} \cdot \sqrt{\frac{1 - 0,933}{0,933}} = 1,04 \quad (25)$$

Рассчитаем коэффициент максимума реактивной нагрузки, используя эмпирическое правило: если  $n_{\text{э}} \leq 10$ , то  $K'_{\text{м}} = 1.1$ , а если  $n_{\text{э}} > 10$ , то  $K'_{\text{м}} = 1$ . Поскольку  $n_{\text{э}} = 9$ ,  $K'_{\text{м}} = 1.1$ .

Максимальная активная нагрузка на ШРА1 составит:

$$P_{\text{Мсм(ШРА1)}} = K_{\text{м}} \cdot P_{\text{см(ШРА1)}} = 1,044 \cdot 190 = 198,36 \text{ кВт.} \quad (26)$$

Рассчитаем максимальную реактивную нагрузку на ШРА1:

$$Q_{\text{Мсм(ШРА1)}} = K'_{\text{м}} \cdot Q_{\text{см(ШРА1)}} = 1,1 \cdot 114,67 = 126,14 \text{ квар.} \quad (27)$$

Максимальная полная нагрузка на ШРА1:

$$S_{\text{Мсм(ШРА1)}} = \sqrt{P_{\text{Мсм(ШРА1)}}^2 + Q_{\text{Мсм(ШРА1)}}^2} = 227,4 \text{ кВА,} \quad (28)$$

$$\cos \varphi = \frac{P_{\text{см(ШРА1)}}}{S_{\text{см(ШРА1)}}} = \frac{182,9}{212,8} = 0,86, \quad (29)$$



$$tg\varphi = \frac{Q_{см(ШРА1)}}{P_{см(ШРА1)}} = \frac{108.8}{182.9} = 0,594. \quad (30)$$

Аналогичным образом выполняем расчёты для других ШРА.

Максимальные значения токов вычислим по формуле (29):

$$I_{M(ШРА)} = \frac{S_{M(ШРА)}}{\sqrt{3} \cdot U}, \quad (31)$$

$$I_{M(ШРА1)} = \frac{227,4}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 328 \text{ A},$$

$$I_{M(ШРА2)} = \frac{7,68}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 11.07 \text{ A},$$

$$I_{M(ШРА3)} = \frac{25.63}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 37 \text{ A},$$

$$I_{M(ШРА4)} = \frac{96.03}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 138.6 \text{ A},$$

$$I_{M(ШРА5)} = \frac{107,04}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 154.5 \text{ A}.$$

Результаты расчётов представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Результаты расчета нагрузок на ШРА

Параметр	ШРА1	ШРА2	ШРА3	ШРА4	ШРА5
$P_n$ , кВт	203	5,83	90	85,6	29,1
$P_{см}$ , кВт	190,33	2,96	74,3	76,7	23,7
$Q_{см}$ , кВАр	114,7	2,63	50,6	42,5	17,16
$S_{см}$ , кВА	222,2	3,97	89,9	87,7	29,3
$m$	15	1	3	1	1.5
$n$	9	3	4	3	2
$K_{u\text{ ср}}$	0,933	0,507	0,825	0,896	0,814
$K_m$	1,04	1,49	1,17	1,17	1,36
$K'_m$	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
$\cos\varphi$	0,84	0,84	0,84	0,89	0,86
$tg\varphi$	0,63	0,65	0,64	0,52	0,59
$P_M$	198,83	4,42	87,11	89,76	32,18

Продолжение таблицы 9

Параметр	ШРА1	ШРА2	ШРА3	ШРА4	ШРА5
$Q_M$	126,17	2,89	55,66	46,75	18,88
$S_M$	235,48	5,28	103,37	101,21	37,31
$I_{M(ШРА)}$	339,89	7,62	149,20	146,08	53,85

Таблица 10 – Мощность на ШНН

$P_{см}, \text{кВт}$	$Q_{см}, \text{кВАр}$	$S_{см}, \text{кВА}$	$P_M, \text{кВт}$	$Q_M, \text{кВАр}$	$S_M, \text{кВА}$
368	227	433	412.3	231,25	482

Вывод по разделу 2.

Выполнены расчёты мощности, потребляемой оборудованием предприятия и осветительными приборами. Выбраны светильники, определено их количество для создания освещенности, соответствующей нормативам [23]. Вычислена активная и реактивная потребляемая электрическая мощность, а также потери мощности, общая потребляемая от сети мощность. Составлена картограмма нагрузок и определены координаты центра нагрузок, выбрано место для подстанции. Составлена структура схемы электропитания, нагрузки распределены по секциям и ШРА. Вычислены нагрузки и максимальные токи, проходящие через распределительные устройства.

### 3 Расчёт числа и установленной мощности трансформаторов на подстанции

#### 3.1 Выбор трансформаторов

Промышленное предприятие относится ко II группе надёжности, поскольку длительный перерыв в электроснабжении может привести к большому количеству брака. Для электроснабжения промышленного предприятия, относящегося ко второй группе надёжности, выбираем двухтрансформаторную подстанцию [8].

Предприятие располагается в городе и электроэнергию по кабелям с распределительной станции. Напряжение, поступающее на подстанцию, составляет 10кВ; оно преобразуется в 400В.

Каждый из двух трансформатора на подстанции получает питание от отдельной секции главной понизительной подстанции, это сводит к минимуму вероятность одновременного прекращения электропитания по двум ветвям [12]. Мощность трансформаторов рассчитываем по формуле (32):

$$S_{Н.Т} = \frac{S_{общ}}{N \cdot K_3} = \frac{463,8}{2 \cdot 0,72} = 322 \text{ кВА.} \quad (32)$$

В случае аварии или планового техобслуживания одного из трансформаторов – его электроприёмники подключаются к другому. При этом оставшийся трансформатор работает в режиме допустимой перегрузки.

Потери в трансформаторе вычислим по формулам (33), (34), (35):

$$\Delta P_T = 0,02 \cdot S_M = 0,2 \cdot 463,78 = 9,28 \text{ кВт,} \quad (33)$$

$$\Delta Q_T = 0,01 \cdot S_M = 0,01 \cdot 463,78 = 4,64 \text{ кВАр,} \quad (34)$$

$$\Delta S_T = \sqrt{\Delta P_T^2 + \Delta Q_T^2} = 10,37 \text{ кВА.} \quad (35)$$

Расчетную мощность с учетом потерь вычисляется по формуле (36):

$$S_T = 0,7(S_{M(\text{ШНН})} + \Delta S_T) = 0,7 \cdot (463,78 + 10,37) = 331,9 \text{ кВА} \quad (36)$$

где 0,7 – это коэффициент загрузки двух трансформаторной подстанции.

Выбираем трансформатор ТМГ 400 кВА 6(10) 0,4 кВ со значением мощности ближайшим более высоким.

Таблица 11 – Технические характеристики трансформатора ТМГ 400 кВА 6(10) 0,4 кВ

Параметр	Значение
Номинальная мощность	400
Номинальное напряжение ВН/НН, кВ	6(10) / 0,4
Схема и группа соединения обмоток	Y/Y <sub>n</sub> -0 Д/Y <sub>n</sub> -11
Потери холостого хода, Вт	750
Потери короткого замыкания, Вт	5600
Ток холостого хода, %	1
Напряжение короткого замыкания, %	4,5

### 3.2 Расчет и выбор компенсирующего устройства

Для уменьшения реактивных потерь выбираем компенсирующее устройство. Для выбора оптимального компенсирующего устройства выполним расчёт активных и реактивных нагрузок, подключённых к каждому шинопроводу [2].

Распределение активных и реактивных мощностей приведено в таблице 12.

Таблица 12 – Распределение электрической мощности по шинопроводам

№ ШРА	$P$ , кВт	$Q$ , кВАр	$S$ , кВА	$I$ , А
Первая секция сборных шин				
ШРА-1	203	118	238	340

Продолжение таблицы 12

№ ШРА	$P$ , кВт	$Q$ , кВАр	$S$ , кВА	$I$ , А
ШРА-2	6	5	8	7.6
Итого по 1 секции	209	123	242	347.6
Вторая секция сборных шин				
ШРА-3	90	62	108	149
ШРА-4	86	48	98	146
ШРА-5	29	21	36	53
Итого по 2 секции	205	131	242	348

Для определения потерь электроэнергии в каждом трансформаторе применим формулы (37), (38) [12]:

$$\Delta P_T = P_{xx} + K_3^2 \cdot P_{кз}, \quad (37)$$

$$\Delta P_T = 0,75 + 0,8^2 \cdot 5,6 = 4,3 \text{ кВт.}$$

$$\Delta Q_T = (i_0 + K_3^2 \cdot U_{кз}) \cdot \frac{S_H}{100}, \quad (38)$$

$$\Delta Q_T = (0,7 + 0,8^2 \cdot 6) \cdot \frac{400}{100} = 18,6 \text{ кВАр.}$$

На стороне высокого напряжения трансформатор Т1 потребляет мощность от головной подстанции:

$$P_{P1} = P_{P\Sigma} + P_{T\Sigma}, \quad (39)$$

$$P_{P1} = 209 + 4,3 = 213,3 \text{ кВт.}$$

$$Q_{P1} = Q_{P\Sigma} + Q_{T\Sigma}, \quad (40)$$

$$Q_{P1} = 119 + 18,6 = 142 \text{ кВАр.}$$

Трансформатор Т2 потребляет от подстанции мощность:

$$P_{P2} = 205 + 4,3 = 209,3 \text{ кВт,}$$

$$Q_{P2} = 131 + 18,6 = 149,6 \text{ кВАр.}$$

На первом трансформаторе желательно скомпенсировать реактивную мощность:

$$Q_{KVmp1} = Q_{P1} - Q_1, \quad (41)$$

$$Q_{KVmp1} = 142 - 110 = 32 \text{ кВАр.}$$

$$Q_1 = \sqrt{(K_3 \cdot S)^2 - P_{P1}^2} = \sqrt{(0,56 \cdot 400)^2 - 204^2} = 110 \text{ кВАр.} \quad (42)$$

Реактивная мощность, которую необходимо скомпенсировать на втором трансформаторе:

$$Q_{KVmp2} = Q_{P2} - Q_2, \quad (43)$$

$$Q_{KVmp1} = 123,8 - 97 = 26,8 \text{ квар.}$$

$$Q_1 = \sqrt{(K_3 * S)^2 - P_{P1}^2} = \sqrt{(0,57 \cdot 400)^2 - 205,9^2} = 97 \text{ кВАр.} \quad (44)$$

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_{(ШНН1)}}{S_{(ШНН1)}} = \frac{199,75}{235,1} = 0,845 \quad (45)$$

$$\operatorname{tg}\varphi_1 = \frac{Q_{(ШНН)}}{P_{(ШНН)}} = \frac{123,78}{235,1} = 0,526 \quad (46)$$

$$\cos\varphi_2 = \frac{P_{(ШНН2)}}{S_{(ШНН2)}} = \frac{201,59}{228,7} = 0,881 \quad (47)$$

$$\operatorname{tg}\varphi_2 = \frac{Q_{(ШНН2)}}{P_{(ШНН2)}} = \frac{107,47}{228,7} = 0,47 \quad (48)$$

Рассчитаем мощность компенсирующего устройства для первой секции:

$$Q_{кр} = a \cdot P_M(\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi_k) = 0,95 \cdot 235 \cdot (0,526 - 0,33) = 43,75 \text{ кВАр} \quad (49)$$

Рассчитаем мощность компенсирующего устройства для второй секции:

$$Q_{кр} = a \cdot P_M(\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi_k) = 0,95 \cdot 228 \cdot (0,47 - 0,33) = 30 \text{ кВАр} \quad (50)$$

где  $\alpha$  принимается равным 0,95;

$$\operatorname{tg} \varphi_k = 0,33 \text{ (после компенсации).}$$

Выбираем конденсаторную установку ВАРНЕТ-АС.

«Автоматические конденсаторные установки ВАРНЕТ-АС предназначены для групп электроприемников с переменным потреблением реактивной мощности (групповая компенсация). Данные установки с помощью микропроцессорного регулятора с релейными выходами в автоматическом режиме отслеживает изменение потребления реактивной мощности и подает команды на подключение/отключение конденсаторов для поддержания необходимого косинуса  $\varphi$ . Коммутация конденсаторов осуществляется электромеханическими контакторами специального исполнения с предварительно включаемыми токоограничивающими резисторами, благодаря которым существенно уменьшается пусковой ток» [5].

Технические характеристики ВАРНЕТ-АС-100/25-0,4 УЗ приведены в таблице 13, на рисунке 9 показан внешний вид установки.

Таблица 13 – Технические характеристики ВАРНЕТ-АС-100/25-0,4 УЗ

Параметр	Значение
Номинальная мощность, кВАр	100
Шаг регулирования, кВАр	25
Конфигурация ступеней	4·25
Габариты, мм	1000·650·300

Подключение к сети конденсаторной установки показано на рисунке 10.

Коэффициент реактивной мощности первой секции при условии компенсации установкой 50 кВАр:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = 0,526 - \frac{50}{0,95 \cdot 232} = 0,30$$

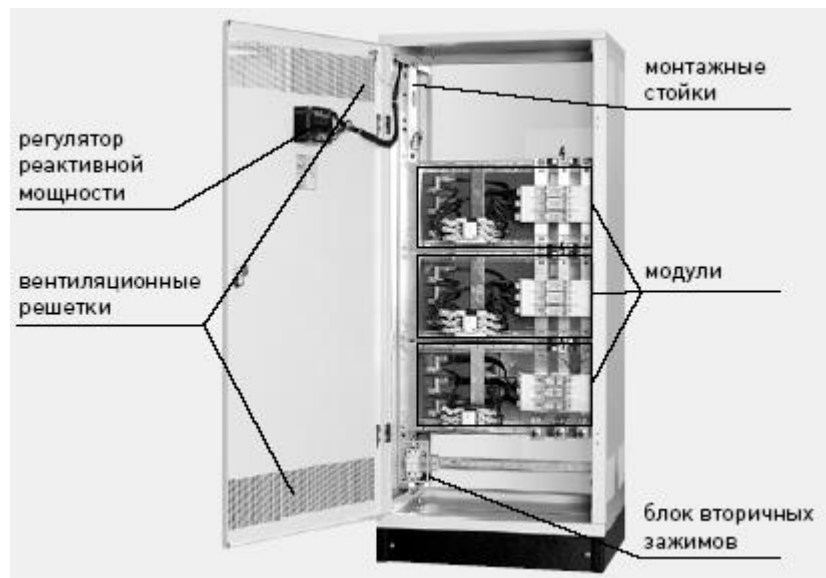


Рисунок 9 – Внешний вид установки VARHET-AC

Коэффициент реактивной мощности второй секции после компенсации установкой 25 кВАр:

$$tg\varphi_1 = 0,47 - \frac{25}{0,95 \cdot 228} = 0,333$$

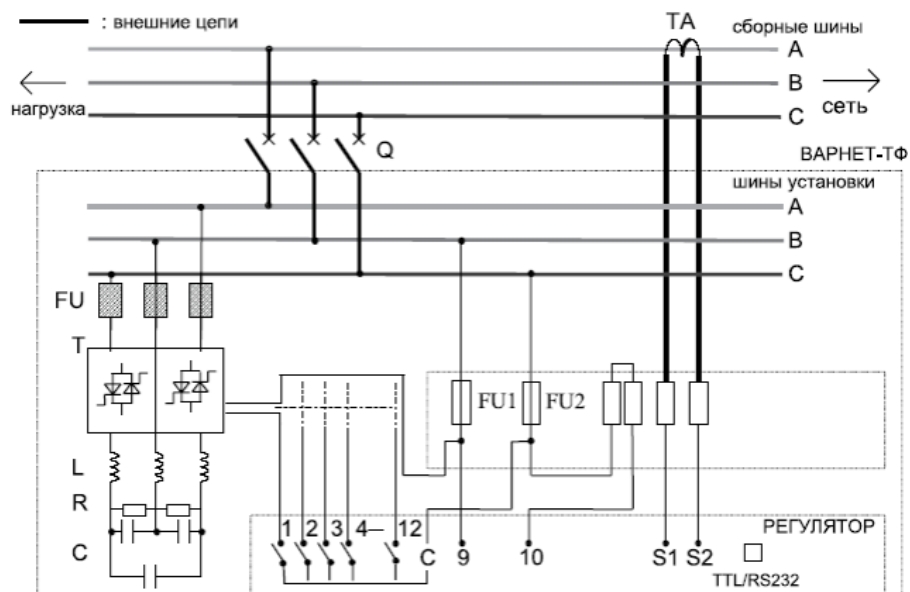


Рисунок 10 – Подключение конденсаторной установки к сети



Вывод по разделу 3.

В данном разделе выбрана двухтрансформаторная подстанция для электропитания предприятия. Выбрана мощность силовых трансформаторов – 400 кВА. Выполнено распределение нагрузок по секциям, с условием равномерной загрузки трансформаторов. На стороне низкого напряжения каждого трансформатора предусмотрены конденсаторные установки ВАРНЕТ-АС мощностью 50 и 25 кВАр, с возможностью регулирования её мощности. Приведены технические характеристики конденсаторной установки ВАРНЕТ-АС-100/25-0,4УЗ, а также схема подключения к электрической сети. Конденсаторная установка включается при включении тока через нагрузки. Подключение конденсаторных установок позволяет уменьшить потери электроэнергии.

## 4 Электрическая схема электроснабжения

### 4.1 Выбор и обоснование схемы

В соответствии с расчётами, выбираем двухтрансформаторную подстанцию 2КТПБ-400/10/0,4-03-У1 (рисунок 11).

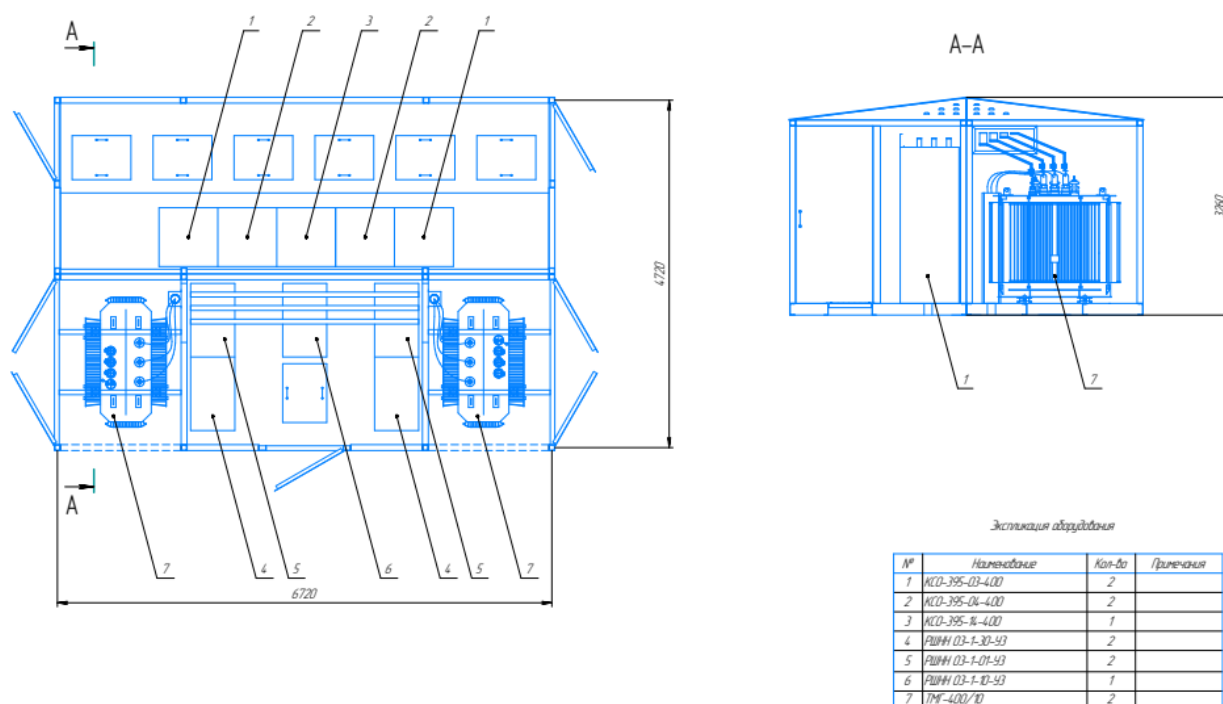


Рисунок 11 – План и внешний вид подстанции 2КТПБ

«Требования к надежности соответствуют ГОСТ 20.39.312. Вероятность безотказной работы за наработку 8760 часов — не ниже 0,98. Срок службы до списания — 30 лет, при условии проведения технического обслуживания и (или) замены аппаратуры и ее комплектующих изделий в соответствии с указаниями инструкции по эксплуатации на КТПБ. Гарантийный срок хранения — не более 6 месяцев при условии соблюдения требований ГОСТ 23216 в части консервации» [9].

Электрическая схема подстанции, с присоединенными конденсаторными сборками, приведена на рисунке 12.

На подстанцию подаётся напряжение по двухцепной линии, для того чтобы можно было подавать на трансформаторы напряжение с любой из ветвей ЛЭП. Таким образом обеспечивается нормальное электроснабжение при отключении одной из ветвей ЛЭП.

Выключатель SA3 выполняет аналогичную функцию на стороне напряжения 0,4 кВ: в случае отключения одного трансформатора питание будет подаваться с другого.

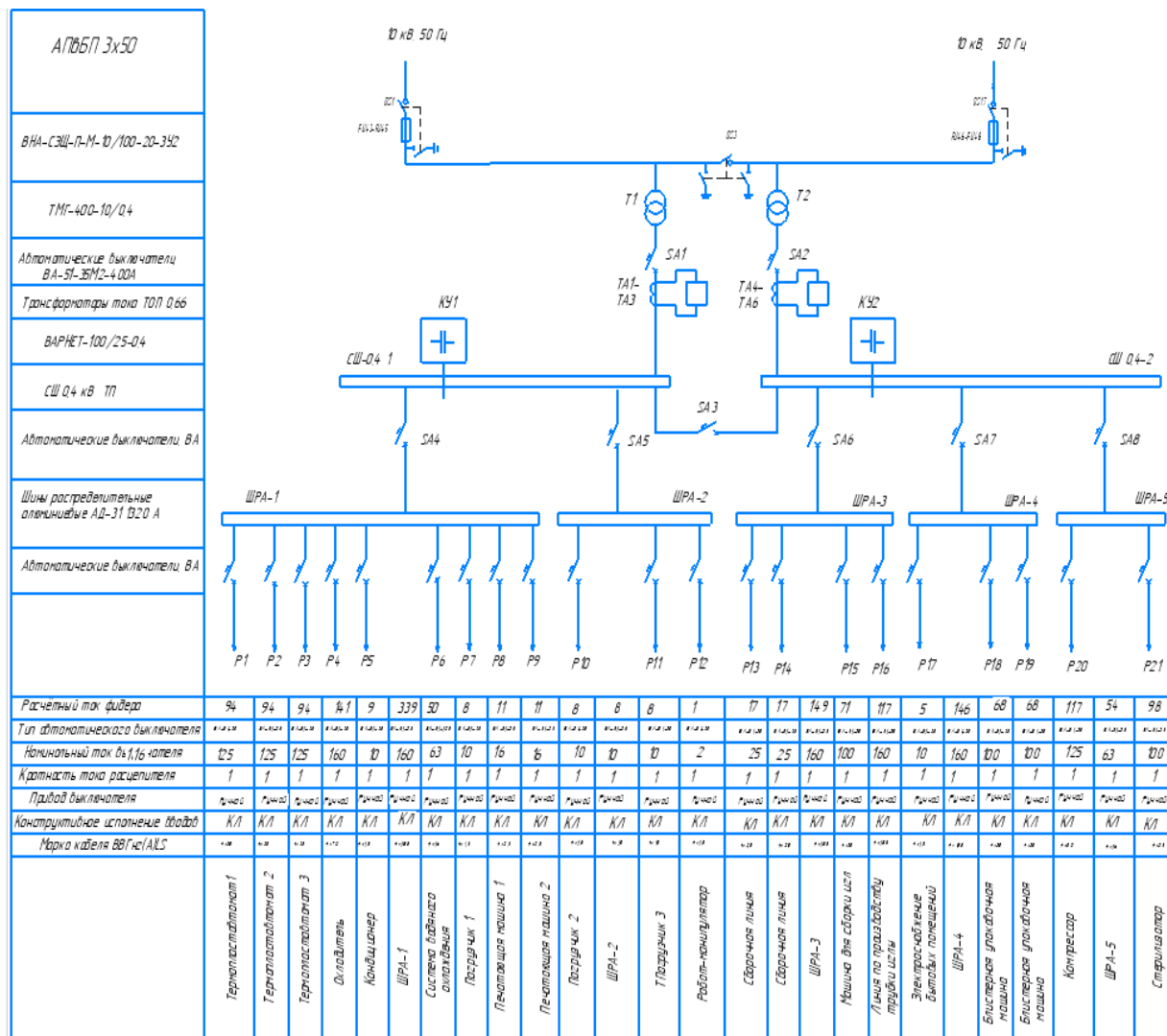


Рисунок 12 – Схема электрическая принципиальная

Трансформаторный отсек отделен от других помещений КТПБ защитной перегородкой, для защиты персонала от поражения током и от возможных последствий короткого замыкания [14]. Предусмотрена возможность осмотра трансформаторных камер при наличии напряжения, для этого на токоведущих частях силовых трансформаторов имеются съемные изолированные барьеры, устанавливаемые на высоте 1,2 м.

На стороне высокого напряжения установлены трансформаторы тока. Они нужны для учёта потребляемой электроэнергии, а также для подачи информации схемам защиты от короткого замыкания.

В схеме предусмотрены блокировки:

- блокировка, не допускающая включения или отключения разъединителей при включенном выключателе первичной цепи;
- блокировка между выключателем нагрузки или разъединителем и заземляющим разъединителем, не позволяющая включать выключатель нагрузки или разъединитель при включенном заземляющем разъединителе и включать заземляющий разъединитель при включенном выключателе нагрузки или разъединителе;
- блокировка, не позволяющая замены предохранителей ВН без включения заземляющих ножей;
- блокировка между выключателями нагрузки и разъединителями, присоединенными к одной системе шин, и заземляющим разъединителем этих шин, не позволяющая включать выключатели нагрузки и разъединители при включенном заземляющем разъединителе шин и включать заземляющий разъединитель шин при включенном хотя бы одном выключателе нагрузки или разъединителе [5].

## **4.2 Выбор проводников**

Для подачи напряжения 0,4 кВ к распределительным пунктам и к шинопроводам, а также к станкам выбираем кабель марки ВВГнг(А)LS.

Вычисляем значение номинального тока для каждого электроприемника:

$$I_p = \frac{\sqrt{P_H^2 + (P_H \cdot \operatorname{tg}\varphi)^2}}{\sqrt{3}U_H} \quad (51)$$

Условие выбора сечения проводника:

$$I_p \leq I_{\text{доп}}, \quad (52)$$

где  $I_{\text{доп}}$  – длительно допустимый ток для трехжильного кабеля, А.

Результаты расчёта и выбор кабелей приводятся в таблице 14.

Таблица 14 – Параметры электрических кабелей для питания нагрузок

Распредустройство	$I_p$	$I_{\text{доп}}$	Жилы кабеля ВВГнг(А) LS мм <sup>2</sup>
Шинопровод Т1-СШ-1	348	377	4×185
Шинопровод Т2-СШ-2	348	377	4×185
Шинопровод распределительный ШРА-1	339	377	4×185
Шинопровод распределительный ШРА-2	8	26	4×1,5
Шинопровод распределительный ШРА-3	149	164	4×70
Шинопровод распределительный ШРА-4	146	164	4×70
Шинопровод распределительный ШРА-5	54	61	4×16

Таблица 15 – Кабели к электроприёмникам

Наименование оборудования	$S_{i \text{ номр}},$ кВА	$I_p$	$I_{\text{доп}}$	Жилы кабеля ВВГнг(А) LS мм <sup>2</sup>
Термопластавтомат	37,6	94	112	4×35
Погрузчик	2,86	7,15	24	4×1,5
Охладитель	56,3	140,75	157	4×70
Робот манипулятор	0,1	0,25	24	4×1,5
Система водяного охлаждения	20	50	50	4×16
Помещение для термопластавтоматов	3,3	8,25	24	4×2,5
Печатающая машина для нанесения градуировочной шкалы	4,3	10,75	24	4×2,5
Сборочная машина	7,15	17,875	24	4×2,5
Блистерная упаковочная машина	27,1	67,75	87	4×35

Продолжение таблицы 15

Наименование оборудования	$S_{i\text{ ном}}$ , кВА	$I_p$	$I_{доп}$	Жилы кабеля ВВГнг(А) LS мм <sup>2</sup>
Сборочная машина для игл	28,6	71,5	87	4×35
Линия по производству трубки иглы	47,1	117,75	135	4×70
Блок бытовых помещений	3	4,3	24	4×1,5
Воздушный компрессор	46,7	116,75	135	4×50
Стерилизатор	38,9	97,25	112	4×35

### 4.3 Выбор автоматических выключателей

Автоматические выключатели и расцепители выбираем на одну ступень больше максимального тока [4].

Выбранные автоматы приведены в таблице 16.

Таблица 16 - Автоматические выключатели для коммутации тока в нагрузках

Распредустройство	$I_p$	Автоматический выключатель
Шинопровод Т1-СШ-1	348	ВА-51-35М2-400А
Шинопровод Т2-СШ-2	348	ВА-51-35М2-400А
Шинопровод СШ1-СШ-2	348	ВА-51-35М2-400А
Шинопровод ШРА-1	339	ВА-51-35М2-400А
Шинопровод ШРА-2	8	ВА-51-35М2-16А
Шинопровод ШРА-3	149	ВА-51-35М2-160А
Шинопровод ШРА-4	146	ВА-51-35М2-160А
Шинопровод ШРА-5	54	ВА-51-35М2-63А
Термопластавтомат	94	ВА-51-35М2-125
Загрузчик	7,15	ВА-51-35М2-16А
Охладитель	140,75	ВА-51-35М2-160А
Система водяного охлаждения	50	ВА-51-35М2-63А
Кондиционер помещения для термопластавтоматов	8,25	ВА-51-35М2-10А
Печатающая машина для нанесения градуировочной шкалы	10,75	ВА-51-35М2-16А
Сборочная машина	17,875	ВА-51-35М2-25А
Блистерная упаковочная машина	67,75	ВА-51-35М2-100А
Сборочная машина для игл	71,5	ВА-51-35М2-100А
Линия по производству трубки иглы	117,75	ВА-51-35М2-125А
Воздушный компрессор	116,75	ВА-51-35М2-125А
Стерилизатор	97,25	ВА-51-35М2-100А

Вывод по разделу 4.

Для электроснабжения предприятия высокое напряжение 10 кВ преобразуется в 0,4 кВ на подстанции 2КТПБ-400/10/0,4-03-У1. Напряжение 0,4 кВ подаётся на шинопроводы секций и распределительных шкафов. На каждой ступени передачи тока установлен автоматический выключатель для ручной коммутации тока и для автоматического отключения питания при возникновении повышенного тока, например при коротком замыкании [3].

В данной главе определены номинальные токи от трансформаторов к шинопроводам, распределительным щитам и электроприёмникам. На основании расчётной величины токов выбраны кабели питания и автоматические выключатели для защиты от токов короткого замыкания [26]. Выбранные проводники проверены на не превышение длительно допустимых токов.

## 5 Расчёт значений токов коротких замыканий

### 5.1 Расчет сопротивлений элементов сети

Для проверки автоматических выключателей выполняется расчёт токов короткого замыкания в разных точках схемы [1]. Выберем путь от энергосистемы до электроприёмника – термопластавтомата (Рисунок 13).

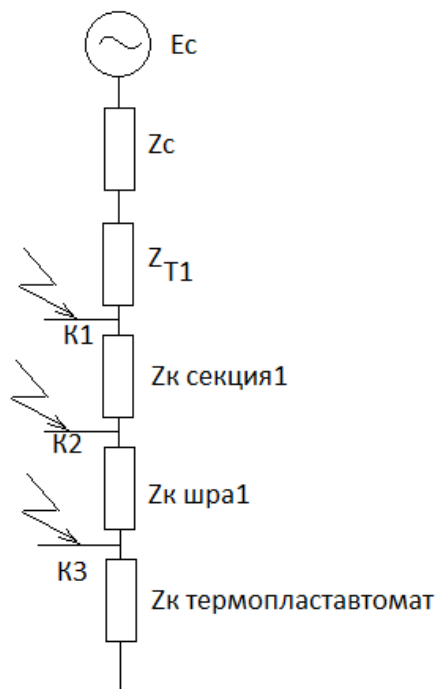


Рисунок 13 - Схема замещения сети

Определим параметры схемы замещения. Сделаем допущения: базовое напряжение примем равным 0,4 кВ, мощность энергосистемы 1000 кВА.

Сопротивление энергосистемы:

$$Z_c = \frac{U_0^2}{S_c} = \frac{0,16}{10^6} = 0,16 \text{ мОм.} \quad (53)$$



Сопротивление трансформатора берём из справочника:

$$RT_1 = 9,4 \text{ мОм}$$

$$XT_1 = 27,2 \text{ мОм}$$

$$ZT_1 = 28,7 \text{ мОм}$$

Кабельная линия от трансформатора к шинопроводу секции 1 – примем длину 10м:

$$R_{KL1} = R_0 \cdot l = 0,74 \cdot 10 = 7,4 \text{ мОм} \quad (54)$$

$$X_{KL1} = X_0 \cdot l = 0,0662 \cdot 10 = 0,662 \text{ мОм} \quad (55)$$

$$Z_{KL1} = \sqrt{R_{KL1}^2 + X_{KL1}^2} = 7,43 \text{ мОм} \quad (56)$$

Кабельная линия от шинопровода секции 1 к ШРА1 – примем длину 10м:

$$R_{KL1} = R_0 \cdot l = 0,74 \cdot 10 = 7,4 \text{ мОм}$$

$$X_{KL1} = X_0 \cdot l = 0,0662 \cdot 10 = 0,662 \text{ мОм}$$

$$Z_{KL1} = \sqrt{R_{KL1}^2 + X_{KL1}^2} = 7,43 \text{ мОм.}$$

Кабельная линия от к ШРА1 к термопластавтомату – примем длину 10м:

$$R_{KL1} = R_0 \cdot l = 0,74 \cdot 10 = 7,4 \text{ мОм}$$

$$X_{KL1} = X_0 \cdot l = 0,0662 \cdot 10 = 0,662 \text{ мОм}$$

$$Z_{KL1} = \sqrt{R_{KL1}^2 + X_{KL1}^2} = 7,43 \text{ мОм.}$$

## 5.2 Токи короткого замыкания в точке К1

Определим ток короткого замыкания в точке К1.

Ток трехфазного металлического короткого замыкания в точке К1:

$$I_{K1} = \frac{U}{\sqrt{3}(Z_c + Z_m)} = \frac{400}{\sqrt{3}(0,16 + 28,7)} = 8 \text{ кА.} \quad (57)$$

Найдем ток трехфазного дугового КЗ

$$I_{K31(D)} = I_{K1} \cdot I_{C1} = 8 \cdot 0,65 = 5,2 \text{ кА (t < 0,05с)} \quad (58)$$

$$I_{K31(D)} = I_{K1} \cdot I_{C2} = 8 \cdot 0,65 = 5,2 \text{ кА (t < 0,05с)} \quad (59)$$

Определим значение трёхфазного ударного тока. Для этого найдём соотношение  $X/R = 27,2/9,4 = 2,89$ . Ударный коэффициент равен 1,32.

$$I_Y = \sqrt{2} \cdot 1,32 \cdot 8 = 14,93 \text{ кА.} \quad (60)$$

### 5.3 Токи короткого замыкания в точке К2

Определим ток короткого замыкания в точке К2.

Ток трехфазного металлического короткого замыкания в точке К2:

$$I_{K2} = \frac{U}{\sqrt{3}(Z_c + Z_m + Z_{к \text{ секция1}})}, \quad (61)$$

$$I_{K2} = \frac{400}{\sqrt{3}(0,16 + 28,7 + 7,43)} = 6,363 \text{ кА.}$$

Найдем ток трехфазного дугового КЗ:

$$I_{K32(D)} = I_{K2} \cdot K_{C1} = 6,363 \cdot 0,65 = 4,136 \text{ кА (t < 0,05с)} \quad (62)$$

$$I_{K32(D)} = I_{K2} \cdot K_{C2} = 6,363 \cdot 0,74 = 4,709 \text{ кА (t < 0,05с)} \quad (63)$$

Определим значение трёхфазного ударного тока. Для этого найдём соотношение  $X/R = 27,8/16,8 = 1,65$ . Ударный коэффициент равен 1,12.

$$I_Y = \sqrt{2} \cdot 1,12 \cdot 6,63 = 10,1 \text{ кА.} \quad (64)$$

#### 5.4 Токи короткого замыкания в точке КЗ

Определим ток короткого замыкания в точке КЗ.

Ток трехфазного металлического короткого замыкания в точке КЗ:

$$I_{KЗ} = \frac{U}{\sqrt{3}(Z_c + Z_m + Z_{к \text{ секция1}} + Z_{к \text{ шра1}})}, \quad (65)$$

$$I_{KЗ} = \frac{400}{\sqrt{3}(0,16 + 28,7 + 7,43 + 7,43)} = 5,282 \text{ кА.}$$

Найдем ток трехфазного дугового КЗ

$$I_{KЗЗ(D)} = I_{KЗ} \cdot K_{C1} = 5,282 \cdot 0,65 = 3,433 \text{ кА (} t < 0,05\text{с)} \quad (66)$$

$$I_{KЗЗ(D)} = I_{KЗ} \cdot K_{C2} = 5,282 \cdot 0,74 = 3,908 \text{ кА (} t < 0,05\text{с)} \quad (67)$$

Определим значение трёхфазного ударного тока. Для этого найдём соотношение  $X/R=28.4/25=1,136$ . Ударный коэффициент равен 1,08.

$$I_Y = \sqrt{2} \cdot 1,08 \cdot 5,282 = 8,1 \text{ кА.} \quad (68)$$

#### 5.5 Проверка коммутационного оборудования по результатам расчетов токов короткого замыкания

Проверим отключающую способность выключателей при возникновении коротких замыканий [15].

Автоматический выключатель секции ВА-51-35М2-400А, уставка электромагнитного расцепителя 2,5 кА. При коротком замыкании (точка К1) ударный ток 14,95 кА. ВА-51-35М2-400А обеспечит защиту от КЗ.

Автоматический выключатель ВА-51-35М2-400А коммутирует питание шинопровода ШРА1. Уставка электромагнитного расцепителя 2,5 кА. При коротком замыкании (точка К2) ударный ток 10,1 кА. ВА-51-35М2-400А обеспечит защиту от КЗ.

Автоматический выключатель ВА-51-35М2-125 коммутирует питание термопласт автомата. Уставка расцепителей токов короткого замыкания: 1500А. При коротком замыкании (точка К3) ударный ток 8,1 кА. Выключатель обеспечивает отключение при КЗ.

Вывод по разделу 5.

В данном разделе выполнен расчет токов короткого замыкания на стороне 0,4 кВ. Рассчитаны токи на разных расстояниях от питающего трансформатора: на шинопровode секции, на распределительном устройстве в цеху, в конечной нагрузке. Вычислялись токи дугового КЗ и ударные токи короткого замыкания. На основании расчётов проверены автоматические выключатели на отключающую способность. Выбранные автоматические выключатели срабатывают при значительно меньших токах, чем те, которые могут возникнуть при коротких замыканиях, они соответствуют требованиям.

## 6 Релейная защита трансформаторов ТМ-400/10/0,4

Для защиты ТМ-400/10/0,4 в РУ-10 кВ выбираем блок релейной защиты SEPAM 1000+ T40.

Токовая отсечка рассчитывается по формуле:

$$I_{сз1} = k_{отс} \cdot I_{K1}, \quad (69)$$

$$I_{сз1} = 1,12 \cdot 3162 = 3539 \text{ А},$$

где  $k_{отс}$  - коэффициент отстройки, для SEPAM равен 1,1–1,15.

$$I_{сз2} = k_{отс} \cdot I_{ном} \cdot k_{бр}, \quad (70)$$

$$I_{сз2} = 1,12 \cdot 40 \cdot 5 = 224 \text{ А},$$

где  $k_{бр} = 5$ , значение броска тока намагничивания.

Выбираем уставки защиты:

$$I_{ср} = 250 \text{ А}.$$

Чувствительность защиты вычислим по формуле:

$$K_{\eta} = \frac{6250}{250} = 25.$$

Чувствительность защиты обеспечивается.

Максимальная токовая защита рассчитывается по формуле

$$I_{сз} = \frac{k_n \cdot k_{сзн} \cdot I_{макс}}{k_{\epsilon}}, \quad (71)$$

$$I_{сз} = \frac{1,1 \cdot 1,2 \cdot 40}{0,935} = 56,5 \text{ А},$$

$$I_{cp} = 100 \text{ A},$$

где  $k_n$  – коэффициент надёжности, для SEPAM равен 1,1;

$k_6$  – коэффициент возврата, для SEPAM равен 0,935;

$k_{c3n}$  – коэффициент запуска, принимается 1,2...1,3.

Выдержка времени 500 мс.

Вывод по разделу 6.

Для обеспечения защиты трансформаторов ТМ-400/10/0,4 в РУ-10 кВ выбран блок релейной защиты типа Seram 1000+T40. Его параметры соответствуют требованиям по чувствительности и быстродействию.

Также микропроцессорный терминал Seram 1000+T40 обеспечивают селективную работу релейной защиты предприятия по выпуску медицинских шприцев.

## 7 Расчет заземления зданий и сооружений объекта

Для заземления производственного здания применяются стальные трубы, металлические штыри из отрезков арматуры [10]. Контур заземления монтируется на определенном расстоянии от здания. Размещенные в земле металлические конструкции соединяются проводом с контуром заземления электрического оборудования.

Сопротивление одного элемента-заземлителя рассчитываем по формуле:

$$R_0 = \frac{\rho_{\text{экв}}}{2\pi L} \left( \ln \left( \frac{2L}{d} \right) + 0,5 \ln \left( \frac{4T + L}{4T - L} \right) \right), \quad (72)$$

где  $\rho_{\text{экв}}$  - эквивалентное удельное сопротивление почвы, Ом·м;

$L$  - длина стержня, м;

$d$  - диаметр стержня, м;

$T$  - расстояние от поверхности грунта до середины заземлителя (геометрическая середина стержня), м.

Выбираем длину стержня  $L=5$  м; диаметр  $d = 0,012$  м;  $T = 3$  м.

Удельное сопротивление для суглинка составляет около 100 Ом/м.

Вычислим сопротивление одного заземлителя:

$$R_0 = \frac{100}{6,28 \cdot 5} \left( \ln \left( \frac{10}{0,012} \right) + 0,5 \ln \left( \frac{6 + 5}{12 - 5} \right) \right) \approx 22 \text{ Ом.}$$

На предприятии используется напряжение 380В, на подстанции присутствует высокое напряжение 10 кВ [24]. Сопротивление заземляющего устройства должно быть не более 4 Ом, в соответствии с ГОСТ 464-79. Зададимся величиной сопротивления заземления 1 Ом. Число вертикальных заземлителей считаем по формуле:

$$N_c = \frac{R_0}{n_c \cdot R_3} = \frac{22}{0,78 \cdot 1} = 28, \quad (73)$$

где  $n_c = 0,78$  – коэффициент использования заземлителя.

Вывод по разделу 6.

Система заземления является важной частью системы электроснабжения промышленного предприятия.

Для предприятия по производству медицинских шприцев посчитаны параметры заземляющего устройства, предназначенного для работы и для предотвращения поражения персонала электрическим током. При сопротивлении заземления 1 Ом, что соответствует ГОСТ 464-79, необходимо установить в землю по периметру здания 28 стальных штырей из отрезков арматуры длиной 5 м и диаметром 1,2 см, соединить их с заземляющим контуром оборудования.



## 8 Молниезащита производственного здания

Необходимо рассчитать высоту молниеотводов  $h$  двойного стержневого молниеотвода и построить зону защиты на высоте  $h_x$  защищаемого объекта. Молниеотводы одинаковой высоты устанавливаются на крыше защищаемого объекта [9].

Таблица 17 – Параметры здания

Ширина объекта $a$ , м	Длина объекта $b$ , м	Высота объекта $h_x$ , м	Надежность защиты $P_z$
31	49	11	0,95

Защищаемый объект имеет длину 49 м, ширину 31 м и высоту 11 м. Молниеотводы расположены на крыше, то есть самая узкая часть защищенной области на высоте крыши (16м) должна быть более 31 м.

Зоны защиты двухстержневого молниеотвода представлены на рисунке 14.

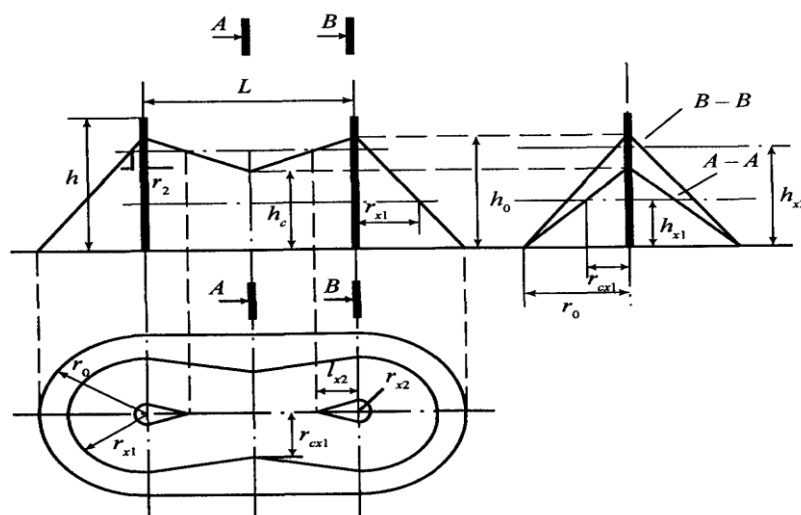


Рисунок 14 – Зона защиты двухстержневого молниеотвода

Размеры горизонтальных сечений зоны вычисляются по следующим формулам, общим для всех уровней надежности защиты:

– максимальная полуширина зоны  $r_x$  в горизонтальном сечении на высоте  $h_x$ :

$$r_x = \frac{r_0(h_0 - h_x)}{h_0}. \quad (74)$$

– ширина горизонтального сечения в центре между молниеотводами  $2r_{cx}$  на высоте  $h_x \leq h_c$ :

$$r_{cx} = \frac{r_0(h_c - h_x)}{h_c}. \quad (75)$$

При расположении молниеотводов на крыше можно будем рассматривать зону защиты, достаточную для размеров крыши, и примем  $h_x = 0$ . Тогда  $r_x = r_0$ ,  $r_{cx} = r_0$ .

Поскольку ширина строения 31 м, примем  $r_{cx} = 31$  м;  $r_0 = 31$  м

В соответствии с СО 153-34.21.122 – 2003 стандартной зоной защиты одиночного стержневого молниеотвода высотой  $h$  является круговой конус высотой  $h_0 < h$ , вершина которого совпадает с вертикальной осью молниеотвода. Габариты зоны определяются двумя параметрами: высотой конуса  $h_0$  и радиусом конуса  $r_0$ .

Таблица 18 – Расчет зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода

Надежность защиты $P_3$	Высота молниеотвода $h$ , м	Высота конуса $h_0$ , м	Радиус конуса $r_0$ , м
0,95	От 0 до 100	$0,85h$	$1,2h$
	От 100 до 150	$0,85h$	$[1,2 \cdot 10^{-3}(h-100)]h$

$$h = \frac{r_0}{1,2} = \frac{31}{1,2} = 26 \text{ м.}$$

Построение внешних областей зон двойного молниеотвода (полуконусов с габаритами  $h_0, r_0$ ) производится по формулам для одиночных стержневых молниеотводов [11]. Размеры внутренних областей определяются параметрами  $h_0$  и  $h_c$ , первый из которых задает максимальную высоту зоны непосредственно у молниеотводов, а второй - минимальную высоту зоны посередине между молниеотводами. При расстоянии между молниеотводами  $L \leq L_c$  граница зоны не имеет провеса ( $h_c = h_0$ ). Для расстояний  $L_c \leq L \leq L_{max}$  высота  $h_c$  определяется по выражению

$$h_c = \frac{L_{max} - L}{L_{max} - L_c} \cdot h_0 \quad (76)$$

Входящие в него предельные расстояния  $L_{max}$  и  $L_c$  вычисляются по эмпирическим формулам из таблицы 19.

Таблица 19 – Расчет параметров зоны защиты двойного стержневого молниеотвода

Надежность защиты $P_z$	Высота молниеотвода $h$ , м	$L_{max}$ , м	$L_c$ , м
0,95	От 0 до 30	$5,75h$	$2,5h$
	От 30 до 100	$[5,75 - 3,57 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$	$2,5h$
	От 100 до 150	$5,5h$	$2,5h$

Максимальное расстояние между двумя молниеотводами, при котором не будет провеса защиты между стержнями составит  $2,5 \cdot 26 = 62$  м. Длина крыши всего 50 метров, поэтому расстояние уменьшим.

Выбираем параметры двойного молниеотвода  $L = 40$  м,  $h = 26$  м.

Вывод по разделу 8.

«Защита от прямых ударов молнии осуществляется с помощью молниеотводов. Молниеотвод представляет собой возвышающееся над защищаемым объектом устройство, через которое ток молнии, минуя защищаемый объект, отводится в землю» [9].

В этом разделе рассчитаны параметры молниеотвода, устанавливаемого на крыше производственного здания. Для защиты здания выбран двойной молниеотвод, длина каждой мачты, установленной на крыше, составляет 26 м, расстояние между мачтами 40 м. Молниеотводы соединены с защитным заземлением здания, что соответствует основным действующим нормативным документам по защите зданий и сооружений и инженерных коммуникаций от прямых ударов молнии. Таким образом, выбор двойного молниеотвода с установкой мачт длиной 26 м и расстоянием между ними в 40 м обеспечивает надежную защиту здания от прямых ударов молнии и минимизирует риск повреждения конструкции и электрического оборудования. Расчеты параметров молниеотвода проведены с учетом основных нормативных документов и рекомендаций по обеспечению эффективной молниезащиты объектов. Правильно спроектированный и установленный молниеотвод играет важную роль в обеспечении безопасности здания случае удара молнии. Он предотвращает повреждения, пожары и другие негативные последствия, которые могут возникнуть в результате поражения молнией. Поэтому важно соблюдать все требования к установке и эксплуатации молниеотводов для обеспечения надежной защиты здания.

## Заключение

При выполнении выпускной квалификационной работы ставилась задача разработки системы электроснабжения предприятия по выпуску медицинских изделий.

В качестве объекта электроснабжения выбрано предприятие, выпускающее медицинские шприцы. Исходными данными для расчётов является план помещений предприятия, расположение оборудования, номенклатура оборудования, мощность, потребляемая оборудованием.

В процессе работы выполнены расчёты электрических нагрузок, распределение нагрузок по территории предприятия. Определён центр нагрузок, в соответствии с этим выбрано место для установки понижающей подстанции. Трансформаторная подстанция для электроснабжения предприятия преобразует напряжение 10 кВ в 0,4 кВ.

Электроэнергия расходуется на электропитание оборудования, а также на освещение помещений. Нормы освещённости определены на основании санитарно-гигиенических норм. В соответствии с этими нормативами выбраны типы светильников и их количество для каждого помещения, выполнен расчёт потребления электроэнергии для освещения. На основании расчёта общей потребляемой мощности выбран тип трансформаторов. Поскольку предприятие по выпуску медицинского оборудования относится ко II группе потребителей электроэнергии, для электроснабжения выбрана двухтрансформаторная подстанция 2КТПБ-400/10/0,4-03-У1. Расположение подстанции выбрано с учётом распределения нагрузок, вблизи расчётного центра электрических нагрузок. Нагрузка равномерно распределена между секциями шин. Для снижения потерь на реактивное сопротивление выбраны компенсирующие конденсаторные установки ВАРНЕТ-АС.

Разработана электрическая принципиальная схема электроснабжения, схема расположения распределительных устройств по территории предприятия, выбраны кабели питания и автоматы для защиты оборудования

от коротких замыканий. Выполнена проверка соответствия автоматов своему назначению, для этого проведены расчёты токов коротких замыканий. Автоматические выключатели срабатывают при токах, значительно меньших, чем токи короткого замыкания, что говорит об эффективности их применения.

Рассчитано количество заземляющих стальных штырей, их длина и диаметр . Выполнен расчёт молниезащиты предприятия, выбраны размеры и расположение молниеотводов.

Для защиты трансформаторов используется реле Seram 1000+ T40. Расчёт релейной защиты показывает, что применение данного типа реле эффективно для выбранных трансформаторов.

Техническое задание, поставленное для выполнения выпускной квалификационной работы, выполнено.

## Список используемых источников

1. Абрамова Е.Я., Алешина С.К., Чиндяскин В.И. Электроснабжение промышленных предприятий: учебное пособие по курсу ЭПП. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2015. 103 с.
2. Алиев И.И. Электротехника и электрооборудование: учебное пособие для вузов. Саратов: Вузовское образование, 2014. 1199 с.
3. Вакуумные Выключатели 6-20 кВ [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL <https://www.tavrida.com/ter/support/documents/1/> (дата обращения: 12.03.2024)
4. Вахнина В.В., Черненко А.Н. Проектирование систем электроснабжения [Электронный ресурс]: электронное учеб.-метод. пособие. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2016. 78 с. URL: [https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/2976/1/Vahnina%20Chernenko\\_EUMI\\_Z.pdf](https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/2976/1/Vahnina%20Chernenko_EUMI_Z.pdf) (дата обращения: 27.01.2024).
5. Вахнина В.В., Черненко А.Н. Системы электроснабжения [Электронный ресурс]: электронное учеб.-метод. пособие. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2015. 46 с. URL: [https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/2943/1/Vahnina%20Chernenko\\_EUMI\\_Z.pdf](https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/2943/1/Vahnina%20Chernenko_EUMI_Z.pdf) (дата обращения: 02.02.2024).
6. ГОСТ Р 59232-2020 «Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита и автоматика. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Устройства автоматической частотной разгрузки. Нормы и требования», утвержденный приказом Росстандарта от 30.11.2020 № 1219-ст.
7. ГОСТ Р 59233-2020 «Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита и автоматика. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Устройства автоматики разгрузки при коротких замыканиях. Устройства фиксации тяжести короткого замыкания. Нормы и требования», утвержденный приказом Росстандарта от 30.11.2020.

8. ГОСТ Р 56303-2014 «Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Нормальные схемы электрических соединений объектов электроэнергетики. Общие требования к графическому исполнению», утвержденный и введенный в действие приказом Росстандарта от 12.12.2014 № 1984-ст.

9. Дьяков А.Ф. Электромагнитная совместимость и молниезащита в электроэнергетике: учебник для вузов. Москва: Издательский дом МЭИ, 2016. 543 с.

10. Кудрин Б.И. Электроснабжение: учебник. М.: Феникс, 2018. 382 с.

11. Мельников М.А. Электроснабжение промышленных предприятий: Учеб. пособие. Томск: Изд. ТПУ, 2001. 140 с.

12. Михайлов В.Е. Современная электросеть. СПб.: Наука и Техника, 2013. 256 с.

13. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть станций и подстанций. Справочные материалы. М., Энергия, 2012. 450 с.

14. Установки компенсации реактивной мощности серии "ВАРНЕТ". URL: [https://websor.ru/oborudovanie-i-materialy/objie\\_ukrm/](https://websor.ru/oborudovanie-i-materialy/objie_ukrm/)

15. Производство трансформаторов, подстанций, электрооборудования 0,4-35 кВ. URL: <http://trf-ural.ru/files/catalog/upload.pdf>.

16. Правила устройства электроустановок ПУЭ-6 и ПУЭ-7. М.: Норматика, 2018. 462 с.

17. Савоськин В. С. Электроснабжение. Электроснабжение промышленных предприятий: учеб. пособие. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2018. 256 с.

18. Сибикин Ю.Д. Электроснабжение промышленных и гражданских зданий [Электронный ресурс]: учебник. 5-е изд., перераб. и доп. М.: ИНФРА М, 2019. 405 с. URL: <http://znanium.com/catalog/product/1003810>.

19. СНиП 23-05-95. СТРОИТЕЛЬНЫЕ НОРМЫ И ПРАВИЛА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. ЕСТЕСТВЕННОЕ И ИСКУССТВЕННОЕ ОСВЕЩЕНИЕ. Дата введения 1996-01-01.



20. Хорольский В.Я., Таранов М.А. Надежность электроснабжения: учеб. пособие. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2017. 127 с
21. Щербаков Е. Ф., Александров Д. С. Электрические аппараты: учебник. - М.: Форум, НИЦ ИНФРА-М, 2015. 304 с
22. Щербаков Е.Ф., Александров Д.С., Дубов А.Л. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях: учебное пособие. М.: Форум, 2019. 496 с.
23. Bobby Rauf S. Electrical Engineering for Non-electrical Engineers. Lulu Press. Inc, 2015. 235 p
24. IEEE Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems. IEEE Std 551. NY: IEEE, 2013. 300 p.
25. Khan S., Khan S., Ahmed G. Industrial power systems. Boca Raton: CRC Press, 2016. 488 p.
26. Usman M., Coppo M., Bignucolo F., Turri R., Cerretti, A. A novel methodology for the management of distribution network based on neutral losses allocation factors // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2019. №1. pp. 613-622.
27. Zhang Q., Tang W., Zaccour G., Zhang J. Should a manufacturer give up pricing power in a vertical information-sharing channel // European Journal of Operational Research. 2019. №276, pp. 910-928.