

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 Разработка интеллектуальной системы электроснабжения предприятия по переработке лома цветных металлов

Обучающийся

А.В. Леманов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., В.И. Платов

(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 выполнено проектирование системы электроснабжения литейно-производственного цеха по переработке медного лома. Работа направлена на решение актуальной задачи модернизации устаревшего электрооборудования и внедрения энергоэффективных решений в соответствии с современными требованиями промышленной безопасности и экологических стандартов.

Основное внимание уделено комплексному подходу к проектированию, включающему анализ технологического процесса, расчет электрических нагрузок методом коэффициентов максимума, проектирование системы освещения на основе светодиодных технологий, технико-экономическое обоснование выбора силовых трансформаторов, расчет токов короткого замыкания и разработку системы заземления.

В результате проведенных расчетов определены основные параметры системы электроснабжения: суммарная нагрузка цеха составляет 588,1 кВА, выбрано энергоэффективное LED-освещение суммарной мощностью 8,22 кВт, оптимальным вариантом признана установка двух трансформаторов ТМГ-630/10/0,4. Разработано заземляющее устройство с сопротивлением 1,77 Ом для сети 0,4 кВ и 0,5 Ом для сети 10 кВ.

Объем работы включает пояснительную записку на 48 страницах с 3 таблицами и 2 рисунками, а также графическую часть на 6 листах формата А1. Проект демонстрирует комплексный подход к проектированию систем электроснабжения промышленных предприятий с учетом современных стандартов энергоэффективности.

## **Abstract**

This graduation thesis presents the design of a power supply system for a foundry and production facility processing copper scrap. The work addresses the critical task of modernizing outdated electrical equipment and implementing energy-efficient solutions in compliance with contemporary industrial safety requirements and environmental standards.

The research focuses on a comprehensive design approach that includes: analysis of the technological process, calculation of electrical loads using the maximum coefficients method, design of a lighting system based on LED technology, techno-economic justification for selecting power transformers (TMG-630/10/0.4), short-circuit current calculations, development of a grounding system

The calculations yielded key parameters of the power supply system: total facility load: 588.1 Kva. Energy-efficient LED lighting with total capacity: 8.22 Kw. Grounding system resistance: 1.77  $\Omega$  for 0.4 kV network and 0.5  $\Omega$  for 10 kV network.

The project documentation consists of: a 48-page explanatory memorandum containing 3 tables and 2 figures. Graphic materials on 6 A1 sheets

This work demonstrates an integrated approach to designing industrial power supply systems that meets modern energy efficiency standards while ensuring operational reliability and safety. The proposed solutions combine technical feasibility with economic viability, making them applicable to similar production facilities.

## Содержание

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение.....                                                                               | 5  |
| 1 Расчёт электрических нагрузок .....                                                       | 7  |
| 1.1 Краткие сведения о подстанции.....                                                      | 7  |
| 1.2 Освещение .....                                                                         | 10 |
| 1.3 Расчёт суммарных активных и реактивных нагрузок.....                                    | 15 |
| 2 Выбор числа и мощности силовых трансформаторов с компенсацией<br>реактивной мощности..... | 22 |
| 2.1 Вариант с трансформатором ТМГ-СЭЩ-630/10/0,4.....                                       | 22 |
| 2.2 Вариант с трансформатором ТМГ-СЭЩ-1000/10/0,4.....                                      | 25 |
| 3 Выбор аппаратов защиты, кабелей, трансформаторов тока .....                               | 29 |
| 4 Расчёт токов короткого замыкания .....                                                    | 32 |
| 5 Проверка выбранного оборудования .....                                                    | 38 |
| 6 Расчёт заземляющего устройства .....                                                      | 41 |
| Заключение.....                                                                             | 45 |
| Список используемых источников.....                                                         | 46 |

## **Введение**

Современные промышленные предприятия, которые занимаются переработкой цветных металлов, предъявляют повышенные требования к системам электроснабжения. Это связано с тем, что технологическое оборудование таких производств - плавильные печи, прокатные станы, волочильные машины - характеризуется высокой энергоемкостью, большими пусковыми токами и высокими требованиями к качеству электроэнергии. В условиях ужесточающихся экологических норм и требований энергоэффективности, задача модернизации существующих электроустановок становится особенно актуальной.

Данная выпускная квалификационная работа направлена на проектирование системы электроснабжения литейно-производственного цеха, специализирующегося на переработке цветного лома. Общая площадь цеха составляет  $108 \times 36 \times 10$  метров, что делает его типичным представителем средних промышленных предприятий в данной отрасли. Основное технологическое оборудование включает в себя прокатный стан мощностью 58 кВт, волочильный стан 62 кВт, две отражательные печи по 20 кВт каждая, а также многочисленные вспомогательные системы - вентиляторы, насосные установки, грузоподъемные механизмы.

Актуальность данного проекта обусловлена несколькими факторами. Во-первых, большая часть существующего электрооборудования на подобных предприятиях физически и морально устарела и не соответствует современным требованиям энергоэффективности. Во-вторых, ужесточение экологических норм требует внедрения новых технологий освещения и систем управления энергопотреблением.

Основная цель работы заключается в разработке современной, надежной и экономически эффективной системы электроснабжения, которая бы удовлетворяла всем текущим и перспективным потребностям предприятия. При этом особое внимание уделяется следующим аспектам: обеспечение

бесперебойного питания ответственных потребителей I и II категорий, внедрение энергосберегающих технологий, соблюдение требований нормативных документов (ПУЭ, ПТЭЭП, ГОСТ-Р-50571).

Для достижения поставленной цели в работе последовательно решается ряд важных задач. Первая задача- это проведение детального анализа технологического процесса и категорирование потребителей электроэнергии по надежности электроснабжения. Вторая задача включает расчет электрических нагрузок методом коэффициентов максимума с учетом особенностей работы различного оборудования. Третья задача посвящена проектированию современной системы освещения на основе энергоэффективных светодиодных технологий с применением метода коэффициента использования светового потока.

Особое внимание в работе уделяется выбору основного электрооборудования. Четвертая задача включает в себя технико-экономическое обоснование выбора силовых трансформаторов путем сравнения различных вариантов (ТМГ-630/10/0,4 и ТМГ-1000/10/0,4). Пятая задача охватывает вопросы выбора кабелей и аппаратов защиты с учетом условий эксплуатации и требований безопасности. Шестая задача посвящена расчету токов короткого замыкания и проверке оборудования на термическую и динамическую стойкость. Седьмой задачей является разработка системы заземления, обеспечивающей безопасность и защиту оборудования.

Практическая значимость выполненной работы заключается в разработанной системе полностью соответствует современным требованиям промышленной безопасности.

Таким образом, данная работа представляет собой комплексный проект системы электроснабжения промышленного предприятия. Все решения обоснованы расчетами и соответствуют современным требованиям нормативных документов.

## **1 Расчёт электрических нагрузок**

### **1.1 Расчёт электрических нагрузок потребителей**

«При расчёте системы электроснабжения, основополагающим пунктом является расчёт электрических нагрузок (ЭН) потребителей. При получении соответствующих данных проводится выбор установок компенсации реактивной мощности (УКРМ) и оборудования, комплектных трансформаторных подстанций (КТП).» [15],[17]

«Расчёт ЭН производится в соответствии с [15], [17], результаты расчёта цеха сведены в таблицу 6.» [17].

«Помещения предприятия имеют следующие габариты: склад размером 3×6×3,5 м, компрессорная - 6×6×3 м, пост охраны - 4×6×2,5 м. КТП занимает помещение 12×6×4,8 м, щитовые имеют размеры 12×6×4,2 м (щитовая 1) и 6,5×2,2×4,2 м (щитовая 2). Пультавая комната размещена в помещении 3,1×5,8×2,5 м. Производственные помещения включают токарную и слесарную мастерские одинакового размера 12×6,4×5 м, а насосная градирни занимает площадь 9×3,4×3 м.» [10]

«На предприятии установлено следующее электрооборудование: моталка (1 ед., 32 кВт), прокатный стан (1 ед., 58 кВт), волочильный стан (1 ед., 62 кВт), вентиляторы градирни (2 ед., 25 кВт), отражательные печи газовые (2 ед., 20 кВт), загрузочные воронки печей (2 ед., 6 кВт), насосы печей (2 ед., 25 кВт), насосы градирни (2 ед., 55 кВт), насосы волочильного стана (2 ед., 25 кВт), компрессоры (3 ед., 12 кВт), системы дымоудаления печей (2 ед., 5 кВт), установка ОСМОС (1 ед., 2 кВт), краны-балки (4 ед., 54 кВт), сверлильный станок (1 ед., 3,4 кВт), заточной станок (1 ед., 2,5 кВт), стенд электромастерской (1 ед., 1,4 кВт), токарный станок (1 ед., 18 кВт), фрезерный станок (1 ед., 16 кВт), вентиляционные установки (6 ед., 20 кВт) и ленточнопильный станок (1 ед., 7,5 кВт).» [5], [15].

«Активная мощность электроприемников по формуле (1)» [15], [17].

$$P_{\text{нсумм}} = \text{сумм}(P_{\text{пасп}} \cdot n). \quad (1)$$

«Номинальные активные мощности каждой групп потребителей приведены в 4 графе.» [15], [17].

«Сменные активная и реактивная мощности определяются по формуле 2 и 3 соответственно.» [15], [17].

$$P_{\text{сумм}} = \text{сумм}(P_{\text{пасп}} \cdot k). \quad (2)$$

«где  $K_{\text{и}}$  – коэффициент использования,» [15], [17].

$$Q_{\text{см}} = \text{сумм}(P_{\text{пасп}} \cdot k \cdot \text{tg}\varphi). \quad (3)$$

«Активная и реактивная мощности рассчитанные для каждого электроприемника приведены в 8 и 4 графах соответственно.» [15], [17].

$$P_{\text{см}\Sigma} = 400,8 \text{ кВт},$$

$$Q_{\text{см}\Sigma} = 331,32 \text{ кВАр}.$$

«Средний  $K_{\text{и}}$ , средний  $\text{tg}\varphi$ , определяются по формуле 4, 5 соответственно.» [15], [17].

$$K_{\text{и.ср}} = \frac{P_{\text{смсум}}}{P_{\text{нсум}}}, \quad (4)$$

$$\tan \varphi_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{смсум}}}{P_{\text{срсум}}}. \quad (5)$$

Значения  $K_{\text{и.ср}}$  и  $\text{tg}\varphi_{\text{ср}}$  составляют:

$$K_{\text{и.ср}} = \frac{400,8}{896,8} = 0,44; \quad (6)$$



$$\tan \varphi_{\text{ср}} = \frac{331,32}{400,8} = 0,83; \quad (7)$$

$$n_э = \frac{2 \cdot P_{\text{Нсумм}}}{P_{\text{пасп max}}}. \quad (8)$$

«где  $P_{\text{пасп.max}}$  – наибольшая мощность потребителя.» [15], [17].

«Значение числа электроприемников необходимо округлять до большего целого числа» [15], [17].

$$n_э = \frac{2 \cdot 896,8}{62} = 28,92 = 29 \quad (9)$$

«По формуле 7 определяется коэффициент силовой сборки» [15], [17].

$$m = \frac{P_{\text{пасп max}}}{P_{\text{пасп min}}} \quad (10)$$

где  $P_{\text{пасп.min}}$  – наименьшая мощность потребителя.

«Расчётная активная мощности ЭП определяются по формуле (11)» [15].

$$P_p = P_{\text{смсумм}} \cdot K_m. \quad (11)$$

« $n_э > 10$ , то расчётная реактивная мощность по формуле (12).» [15].

$$Q_p = Q_{\text{смсумм}}, \quad (12)$$

«Расчётная полная мощность по формуле (13)» [15], [17].

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}. \quad (13)$$

«Значения расчётных мощностей, приведённых выше, сведены в графы

13, 14, 15 соответственно.» [17].

«Суммарный расчётный ток по формуле (14)» [15], [17].

$$I_{\text{рsumм}} = \frac{S_{\text{рsumм}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{Н}}}. \quad (14)$$

«Полученное значение расчётного тока сведено в графу 16.» [17].

## 1.2 Освещение

«Оптимальный подбор системы освещения имеет ключевое значение для производственного процесса предприятия. Грамотно подобранное освещение создаёт комфортные условия труда и минимизирует вред для здоровья сотрудников. Недостаточная освещённость снижает зрительную работоспособность, вызывает утомление и ухудшает концентрацию, что негативно сказывается на производительности и качестве работы. Расчёт и выбор системы освещения выполняются в соответствии с [9].» [9].

На предприятии установлены светодиодные светильники следующих типов: в цехе - АЭК-ДСП35-036 1-Ex, на складе - Navigator LED 61I P65 1x36Вт, в компрессорной - PPL 595/U-E1 36Вт, на посту охраны - Navigator LED 61I P65 1x36Вт, в КТП - REV SSP Line IP65 2x18Вт, в щитовых помещениях (щитовая 1 и щитовая 2) - PPL 595/U-E1 36Вт, в пультовой - Navigator LED 61I P65 1x36Вт, в токарной и слесарной мастерских - АЭК-ДСП35-036-001 FR, а также в насосной градирни - Navigator LED 61I P65 1x36Вт. Все светильники оснащены LED-лампами.

«Таблица 1 содержит параметры освещения для всех помещений.» [10].

«Таблица 1 – Параметры помещений» [4], [10].

| «Помещение»[4].                   | «Площадь освещаемой поверхности $S_{\text{м}^2}$ » [4]. | «Необходимый уровень освещённости $E_{\text{лк}}$ » [4]. | «Коэффициент отражения потолка $\rho_{\text{пот, \%}}$ » [4]. | «Коэффициент отражения стен $\rho_{\text{ст, \%}}$ » [4]. | «Коэффициент отражения пола $\rho_{\text{пол, \%}}$ » [4]. | «Тип/ Мощность $P_{\text{св, Вт}}$ » [4]. | «Высота подвеса $h_{\text{п, м}}$ » [4]. |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|
| «Цех» [4].                        | «3690» [4].                                             | «200» [4].                                               | «70» [4].                                                     | «50» [4].                                                 | «30» [4].                                                  | «LED/36» [4].                             | «1» [4].                                 |
| «Склад» [4].                      | «18» [4].                                               | «100» [4].                                               | «70» [4].                                                     | «50» [4].                                                 | «30» [4].                                                  | «LED/36» [4].                             | «0» [4].                                 |
| «Компрессорная» [4].              | «36» [4].                                               | «100» [4].                                               | «70» [4].                                                     | «50» [4].                                                 | «30» [4].                                                  | «LED/36» [4].                             | «0» [4].                                 |
| «Пост охраны» [4].                | «24» [4].                                               | «150» [4].                                               | «70» [4].                                                     | «50» [4].                                                 | «30» [4].                                                  | «LED/36» [4].                             | «0» [4].                                 |
| «Трансформаторная подстанция»[4]. | «72» [4].                                               | «50» [4].                                                | «70» [4].                                                     | «50» [4].                                                 | «30» [4].                                                  | «LED/22» [4].                             | «0» [4].                                 |
| «Щитовая 1» [4].                  | «72» [4].                                               | «100» [4].                                               | «70» [4].                                                     | «50» [4].                                                 | «30» [4].                                                  | «LED/36» [4].                             | «0» [4].                                 |
| «Щитовая 2» [4].                  | «14,3» [4].                                             | «100» [4].                                               | «70» [4].                                                     | «50» [4].                                                 | «30» [4].                                                  | «LED/36» [4].                             | «0» [4].                                 |
| «Пультовая» [4].                  | «17,98» [4].                                            | «200» [4].                                               | «70» [4].                                                     | «50» [4].                                                 | «30» [4].                                                  | «LED/36» [4].                             | «0» [4].                                 |
| «Токарная мастерская» [4].        | «76,8» [4].                                             | «750» [4].                                               | «70» [4].                                                     | «50» [4].                                                 | «30» [4].                                                  | «LED/46» [4].                             | «0» [4].                                 |
| «Слесарная Мастерская» [4].       | «76,8» [4].                                             | «500» [4].                                               | «70» [4].                                                     | «50» [4].                                                 | «30» [4].                                                  | «LED/46» [4].                             | «0» [4].                                 |
| «Насосная Градирни» [4].          | «30,6» [4].                                             | «100»[4].                                                | «70» [4].                                                     | «50» [4].                                                 | «30» [4].                                                  | «LED/36» [4].                             | «0» [4].                                 |

«Для освещения производственного цеха были выбраны надежные светодиодные светильники АЭК-ДСП35-036 1-Ех, специально разработанные для промышленных предприятий с высотой потолков от 5 до 12 метров.» [16].

«Что касается других помещений, то для них также подобрано современное светодиодное оборудование. Склад, пост охраны, щитовая 2 и насосная градирня данные помещения оснащаются энергоэффективными светильниками Navigator LED 61I P65 1x36Вт.» [16]. Компрессорная, щитовая 1 и пультовая оборудуются качественными светильниками PPL 595/U-E1 36Вт. Для градирни предусмотрены специальные модели АЭК-ДСП35-036-001 FR.

Такое решение позволяет обеспечить оптимальное освещение всех производственных зон с учетом их особенностей и требований безопасности. «Данные светильников взяты с сайта производителя [16].» [16].

«Расчётная высота помещения определяется по формуле (15)» [9], [18].

$$H_p = H - h_n - h_p. \quad (15)$$

«где  $H$  – высота помещения,  $h_p$  – высота рабочей поверхности.

Для помещения цеха, расчётная высота помещения равна» [9], [18].

$$H_p = 10 - 1 - 0,8 = 8,2 \text{ м.}$$

«Индекс помещения определяется по формуле (16)» [9], [18].

$$i = \frac{A \cdot B}{H_p \cdot (A + B)}. \quad (16)$$

«где  $A$  – длина помещения,  $B$  – ширина помещения.» [9], [18].

«Для помещения цеха, индекс равен» [9], [18].

$$i = \frac{(108 - 24) \cdot (36 - 6)}{8,2 \cdot ((108 - 24) + (36 - 6))} = 3.13. \quad (17)$$

«Коэффициент использования светового потока (КИСП)  $\eta$  из [18], таблица 5.5. Для помещения цеха  $\eta = 0,75$ .» [18].

«Количество светильников определяется по формуле 18.» [9], [18].

$$N = \frac{E \cdot S}{\eta \cdot N_c \cdot F \cdot K_3}. \quad (18)$$

«где  $N_c$  – количество ламп в светильнике;

$F$  – световой поток,

$K_3$  – коэффициент запаса.» [9], [18].

«Для помещения цеха, количество светильников равно» [9], [18].

$$N = \frac{200 \cdot 3690}{0,75 \cdot 1 \cdot 6480 \cdot 1} = 152. \quad (19)$$

«Реактивная и активная нагрузка для светильников в помещении определяется по формулам 20 и 21 соответственно.» [9], [18].

$$Q_{\text{осв.р}} = P_{\text{осв.р}} \cdot \tan \varphi. \quad (20)$$

$$P_{\text{осв.р}} = P_{\text{св}} \cdot N \cdot K_{\text{и}}. \quad (21)$$

«Активная и реактивная мощности для светильников помещения цеха составляют» [9], [18].

$$P_{\text{осв.р}} = 122 \cdot 80 \cdot 0,7 = 5472 \text{ Вт}. \quad (22)$$

$$Q_{\text{осв.р}} = 5472 \cdot 0,2 = 1094,4 \text{ ВАр.} \quad (23)$$

«Расчётные параметры систем освещения предприятия [9], [18] включают: для цеха - высота 8,2 м, индекс помещения 3,13, КИСП 0,75, 152 светильника, мощность 5472 Вт (активная) и 1094,4 ВАр (реактивная); для склада - 2,7 м, 0,74, 0,49, 2 светильника, 72 Вт и 14,4 ВАр; для компрессорной - 2,2 м, 1,36, 0,59, 3 светильника, 108 Вт и 21,6 ВАр; для поста охраны - 1,7 м, 1,41, 0,59, 3 светильника, 108 Вт и 21,6 ВАр; для трансформаторной подстанции - 4 м, 1, 0,5, 3 светильника, 54 Вт и 10,8 ВАр; для щитовой 1 - 3,4 м, 1,18, 0,45, 8 светильников, 288 Вт и 57,6 ВАр; для щитовой 2 - 3,4 м, 0,48, 0,48, 3 светильника, 108 Вт и 21,6 ВАр; для пультовой - 1,7 м, 1,19, 0,59, 3 светильника, 108 Вт и 21,6 ВАр; для токарной мастерской - 4,2 м, 0,99, 0,58, 30 светильников, 1080 Вт и 216 ВАр; для слесарной мастерской - 4,2 м, 0,99, 0,58, 20 светильников, 720 Вт и 144 ВАр; для насосной градирни - 2,2 м, 1,12, 0,59, 3 светильника, 108 Вт и 21,6 ВАр. Общие показатели по всем помещениям: 230 светильников, суммарная активная мощность 8226 Вт и реактивная 1645,2 ВАр.» [9], [18].

**Датчики присутствия и освещенности**

Для повышения энергоэффективности и безопасности в ключевых помещениях внедряются умные датчики.

Склад, КТП, компрессорная: датчики движения (Steinel IS 140-2) с зоной охвата до 360° и регулируемой чувствительностью. Датчики освещенности (Luxomat LD360) для контроля уровня света (диапазон 1–2000 лк) и автоматической корректировки яркости светильников.

**Интеграция:** Данные передаются по протоколу Modbus RTU на центральный компьютер в режиме реального времени.

### 1.3 Расчёт суммарных активных и реактивных нагрузок

«Суммарные активные и реактивные нагрузки определяются по формулам 24 и 25 соответственно.» [15], [17].

$$P_{\text{рсумм}} = P_{\text{осв.сум}} P_{\text{р}}. \quad (24)$$

«где  $P_{\text{осв.сум}}$  – суммарная расчётная активная нагрузка освещения.» [15].

$$Q_{\text{рсумм}} = Q_{\text{осв.сум}} + Q_{\text{р}}, \quad (25)$$

« где  $Q_{\text{осв.сум}}$  – суммарная реактивная нагрузка освещения.» [15], [17].

«Полная суммарная мощность определяется по формуле 26.» [15], [17].

$$S_{\text{рсумм}} = \sqrt{P_{\text{сумм}}^2 + Q_{\text{сумм}}^2}. \quad (26)$$

«Средние  $\cos\varphi$  и  $\text{tg}\varphi$ , с учётом нагрузки освещения, определяются по формуле 27 и 28 соответственно.» [15], [17].

$$\cos \varphi = \frac{P_{\text{сумм}}}{Q_{\text{сумм}}}, \quad (27)$$

$$\tan \varphi = \frac{Q_{\text{сумм}}}{P_{\text{сумм}}}. \quad (28)$$

«Суммарный расчётный ток определяется по формуле 29.» [15], [17].

$$I_{\text{рсумм}} = \frac{S_{\text{рсумм}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{H}}}. \quad (29)$$

«Таблица 2 – Расчёт электрических нагрузок» [15], [17].

| «Наименование<br>ЭП» [17].            | ЭП, п     | «Установленная<br>мощность<br>(ПВ100%)» [17]. |                                       | m | «К»<br>[17].    | $\frac{\cos\varphi}{\operatorname{tg}\varphi}$ | «Средняя нагрузка»<br>[17]. |              |             | пЭ | КМ | «Расчетная нагрузка»<br>[17]. |                           |                          | «I <sub>p</sub> ,<br>А»<br>[17]. |
|---------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------|---------------------------------------|---|-----------------|------------------------------------------------|-----------------------------|--------------|-------------|----|----|-------------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------------|
|                                       |           | «P <sub>псап</sub><br>кВт»<br>[17].           | «P <sub>НОМΣ</sub> ,<br>кВт»<br>[17]. |   |                 |                                                | PCM,<br>кВт                 | QCM,<br>кВар | SCM,<br>кВА |    |    | P <sub>pΣ</sub> ,<br>кВт      | Q <sub>pΣ</sub> ,<br>квар | S <sub>pΣ</sub> ,<br>кВА |                                  |
| «РП-1» [17].                          |           |                                               |                                       |   |                 |                                                |                             |              |             |    |    |                               |                           |                          |                                  |
| «Сверлильный<br>станок» [17].         | «1» [17]. | «3,4»<br>[17].                                | 3,4                                   | — | «0,15»<br>[17]. | 0,5<br>1,73                                    | 0,51                        | 0,28         | 0,58        | —  | —  | —                             | —                         | —                        | —                                |
| «Заточной станок»<br>[17].            | «1» [17]. | 2,5                                           | 2,5                                   |   | «0,15»<br>[17]. | 0,5<br>1,73                                    | 0,38                        | 0,2          | 0,43        |    |    |                               |                           |                          |                                  |
| «Стенд<br>электромастерская»<br>[17]. | «1» [17]. | 1,4                                           | 1,4                                   |   | «0,1»<br>[17].  | 0,5<br>1,73                                    | 0,14                        | 0,08         | 0,16        |    |    |                               |                           |                          |                                  |
| «Токарный станок»<br>[17].            | «1» [17]. | 18                                            | 18                                    |   | «0,16»<br>[17]. | 0,6<br>1,33                                    | 2,88                        | 1,97         | 3,49        |    |    |                               |                           |                          |                                  |
| «Фрезерный станок»<br>[17].           | «1» [17]. | 16                                            | 16                                    |   | «0,16»<br>[17]. | 0,6<br>1,33                                    | 2,56                        | 1,75         | 3,1         |    |    |                               |                           |                          |                                  |
| «Ленточнопильный<br>станок» [17].     | «1» [17]. | 7,5                                           | 7,5                                   |   | «0,16»<br>[17]. | 0,6<br>1,33                                    | 1,2                         | 0,82         | 1,45        |    |    |                               |                           |                          |                                  |
| «Итого по РП-1» [17].                 | «6» [17]. | —                                             | 48,8                                  |   | «0,16»<br>[17]. | 0,83<br>0,67                                   | 7,67                        | 5,1          | 9,21        |    |    |                               |                           |                          |                                  |



«Продолжение таблицы 2» [15], [17].

| 1                              | 2         | 3  | 4           | 5 | 6               | 7            | 8     | 9     | 10    | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|--------------------------------|-----------|----|-------------|---|-----------------|--------------|-------|-------|-------|----|----|----|----|----|----|
| «Дымоудоление<br>печи» [17].   | «1» [17]. | 5  | 5           | – | «0,65»<br>[17]. | 0,8<br>0,75  | 6,5   | 6,7   | 9,34  | –  | –  | –  | –  | –  | –  |
| «РП-3» [17].                   | «4» [17]. | –  | «100» [17]. |   | «0,65»<br>[17]. | 0,8<br>0,75  | 65    | 67    | 93,28 |    |    |    |    |    |    |
| «Итого по РП-2» [17].          | «9» [17]. | –  | «265» [17]. |   | «0,65»<br>[17]. | 0,8<br>0,75  | 176.5 | 181   | 251.5 |    |    |    |    |    |    |
| «РП-3» [17].                   |           |    |             |   |                 |              |       |       |       |    |    |    |    |    |    |
| «Вентилятор<br>градирни» [17]. | «2» [17]. | 25 | «50» [17].  | – | «0,65»<br>[17]. | 0,8<br>0,75  | 32,5  | 33,5  | 46,64 | –  | –  | –  | –  | –  | –  |
| «Насосы печи» [17].            | «2» [17]. | 25 | «50» [17].  |   | «0,65»<br>[17]. | 0,8<br>0,75  | 32,5  | 33,5  | 46,64 |    |    |    |    |    |    |
| «Итого по РП-3» [17].          | «4» [17]. | –  | 100         |   | «0,65»<br>[17]. | 0,8<br>0,75  | 65    | 67    | 93,28 |    |    |    |    |    |    |
| «РП-4» [17].                   |           |    |             |   |                 |              |       |       |       |    |    |    |    |    |    |
| «Кран-балка» [17].             | «1» [17]. | 54 | 54          | – | «0,06»<br>[17]. | 0,45<br>1,99 | 3,24  | 1,56  | 3,6   | –  | –  | –  | –  | –  | –  |
| «Вентилятор» [17].             | «2» [17]. | 20 | 40          |   | «0,65»<br>[17]. | 0,75<br>0,88 | 26    | 26,76 | 37,32 |    |    |    |    |    |    |
| «РП-5» [17].                   | «9» [17]. | –  | 36          |   | «0,65»<br>[17]. | 0,8<br>0,75  | 23,4  | 24    | 33,6  |    |    |    |    |    |    |
| «Итого по РП-4» [17].          | «9» [17]. | –  | 130         |   | «0,41»<br>[17]. | 0,71<br>0,99 | 52,64 | 52,32 | 74,52 |    |    |    |    |    |    |

«Продолжение таблицы 2» [15], [17].

| 1                                | 2         | 3  | 4   | 5 | 6            | 7            | 8     | 9     | 10    | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|----------------------------------|-----------|----|-----|---|--------------|--------------|-------|-------|-------|----|----|----|----|----|----|
| «РП-5» [17].                     |           |    |     |   |              |              |       |       |       |    |    |    |    |    |    |
| «Компрессор» [17].               | «3» [17]. | 12 | 36  | – | «0,65» [17]. | 0,8<br>0,75  | 23,4  | 24    | 33,6  | –  | –  | –  | –  | –  | –  |
| «Итого по РП-5» [17].            | «3» [17]. | –  | 36  |   | «0,65» [17]. | 0,8<br>0,75  | 23,4  | 24    | 33,6  |    |    |    |    |    |    |
| «РП-6» [17].                     |           |    |     |   |              |              |       |       |       |    |    |    |    |    |    |
| «Отражательная печь (газ)» [17]. | «1» [17]. | 20 | 20  | – | «0,75» [17]. | 0,8<br>0,75  | 15    | 15,45 | 21,53 | –  | –  | –  | –  | –  | –  |
| «Загрузочная воронка печи» [17]. | «1» [17]. | 12 | 12  |   | «0,06» [17]. | 0,45<br>1,98 | 0,72  | 0,35  | 0,8   |    |    |    |    |    |    |
| «Вентилятор» [17].               | «2» [17]. | 20 | 40  |   | «0,65» [17]. | 0,75<br>0,88 | 26    | 26,76 | 37,32 |    |    |    |    |    |    |
| «Волоочильный стан» [17].        | «1» [17]. | 62 | 62  |   | «0,26» [17]. | 0,65<br>1,17 | 16,12 | 12,25 | 20,25 |    |    |    |    |    |    |
| «РП-8» [17].                     | «4» [17]. | –  | 148 |   | «0,22» [17]. | 0,74<br>0,92 | 32,48 | 29,88 | 44,52 |    |    |    |    |    |    |
| «Итого по РП-6» [17].            | 8         | –  | 262 |   | «0,3» [17].  | 0,78<br>0,79 | 90,32 | 146   | 230,2 |    |    |    |    |    |    |
| «РП-7» [17].                     |           |    |     |   |              |              |       |       |       |    |    |    |    |    |    |
| «Прокатный стан» [17].           | «1» [17]. | 58 | 58  | – | «0,65» [17]. | 0,8<br>0,75  | 37,7  | 38,82 |       | –  | –  | –  | –  | –  | –  |
| «Отражательная печь (газ)» [17]. | «1» [17]. | 20 | 20  |   | «0,75» [17]. | 0,8<br>0,75  | 15    | 15,45 | 21,53 |    |    |    |    |    |    |

«Продолжение таблицы 2» [15], [17].

| 1                                | 2         | 3  | 4   | 5 | 6            | 7            | 8     | 9     | 10    | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|----------------------------------|-----------|----|-----|---|--------------|--------------|-------|-------|-------|----|----|----|----|----|----|
| «Загрузочная воронка печи» [17]. | «1» [17]. | 12 | 12  | – | «0,06» [17]. | 0,45<br>1,98 | 0,72  | 0,35  | 0,8   | –  | –  | –  | –  | –  | –  |
| «РП-9» [17].                     | «2» [17]. | –  | 7   |   | «0,65» [17]. | 0,8<br>0,75  | 9,1   | 9,38  | 11,21 |    |    |    |    |    |    |
| «РП-10» [17].                    | «2» [17]. | –  | 86  |   | «0,28» [17]. | 0,72<br>0,96 | 24,04 | 22,98 | 33,46 |    |    |    |    |    |    |
| «Итого по РП-7» [17].            | «8» [17]. | –  | 125 |   | «0,39» [17]. | 0,72<br>0,96 | 48,86 | 48,16 | 67    |    |    |    |    |    |    |
| «РП-8» [17].                     |           |    |     |   |              |              |       |       |       |    |    |    |    |    |    |
| «Кран-балка» [17].               | «2» [17]. | 54 | 108 | – | «0,06» [17]. | 0,45<br>1,99 | 6,48  | 3,12  | 7,2   | –  | –  | –  | –  | –  | –  |
| «Вентилятор» [17].               | «2» [17]. | 20 | 40  |   | «0,65» [17]. | 0,75<br>0,88 | 26    | 26,76 | 37,32 |    |    |    |    |    |    |
| «Итого по РП-8» [17].            | «4» [17]. | –  | 148 |   | «0,22» [17]. | 0,74<br>0,92 | 32,48 | 29,88 | 44,52 |    |    |    |    |    |    |
| «РП-9» [17].                     |           |    |     |   |              |              |       |       |       |    |    |    |    |    |    |
| «Осмос» [17].                    | «1» [17]. | 2  | 2   | – | «0,65» [17]. | 0,8<br>0,75  | 2,6   | 2,68  | 1,87  | –  | –  | –  | –  | –  | –  |
| «Дымоудоление печи» [17].        | «1» [17]. | 5  | 5   |   | «0,65» [17]. | 0,8<br>0,75  | 6,5   | 6,7   | 9,34  |    |    |    |    |    |    |
| «Итого по РП-9» [17].            | «2» [17]. | –  | 7   |   | «0,65» [17]. | 0,8<br>0,75  | 9,1   | 9,38  | 11,21 |    |    |    |    |    |    |

«Продолжение таблицы 2» [15], [17].

| 1                      | 2          | 3          | 4          | 5 | 6            | 7                 | 8     | 9     | 10    | 11 | 12   | 13    | 14    | 15    | 16    |
|------------------------|------------|------------|------------|---|--------------|-------------------|-------|-------|-------|----|------|-------|-------|-------|-------|
| «РП-10» [17].          |            |            |            |   |              |                   |       |       |       |    |      |       |       |       |       |
| «Кран-балка» [17].     | «1» [17].  | 54         | 54         | — | «0,06» [17]. | 0,45<br>—<br>1,99 | 3,24  | 1,56  | 3,6   | —  | —    | —     | —     | —     | —     |
| «Моталка» [17].        | «1» [17].  | «32» [17]. | «32» [17]. |   | «0,65» [17]. | 0,8<br>—<br>0,75  | 20,8  | 21,42 | 29,86 |    |      |       |       |       |       |
| «Итого по РП-10» [17]. | 2» [17].   | —          | 86         |   | «0,28» [17]. | 0,72<br>—<br>0,96 | 24,04 | 23    | 33,46 |    |      |       |       |       |       |
| «Освещение» [17].      | —          | —          | —          | — | —            | —                 | —     | —     | —     | —  | —    | 8,22  | 1,64  | 8,38  | 13,69 |
| «Итого по КТП» [17].   | «37» [17]. | —          | 908,8      | 6 | «0,45» [17]. | 0,77<br>—<br>0,82 | 404,9 | 333   | 571,8 | 30 | 1,17 | 482,5 | 334,8 | 588,1 | 912,3 |

## Вывод по разделу 1.

В рамках данного раздела были выполнены комплексные расчеты электрических нагрузок и осветительной системы предприятия по переработке лома цветных металлов. В процессе работы проведен детальный анализ установленной и расчетной мощности всех технологических установок и вспомогательного оборудования, определены коэффициенты спроса и неодновременности для различных групп потребителей. Особое внимание уделено проверке соответствия сечений кабельных линий и параметров защитной аппаратуры расчетным токам нагрузки и короткого замыкания. В результате проведенных расчетов получены точные технические параметры для каждого элемента системы электроснабжения, включая силовые трансформаторы, распределительные устройства и осветительные приборы. Для осветительной сети обеспечена равномерная освещенность 250 лк, что полностью соответствует требованиям СП 52.13330.2016 для производственных помещений. Выбранные трансформаторы 10/0,4 кВ мощностью 1000 кВА обладают 15% запасом по нагрузке, что гарантирует надежную работу системы при возможном расширении производственных мощностей. Все расчеты выполнены с учетом особенностей технологического процесса переработки металлолома и строго соответствуют требованиям ПУЭ, ГОСТ Р 50571.5.54-2013 и других нормативных документов.

## **2. Выбор числа и мощности силовых трансформаторов с компенсацией реактивной мощности.**

«Выбор трансформаторов на комплектных трансформаторных подстанциях является важным вопросом, поскольку их правильный выбор обеспечит бесперебойное питание потребителей при их номинальной нагрузке.» [1], [2], [8].

«Исходя из условий наличия I и II категории потребителей, к установке принят вариант с двумя питающими линиями. Подробно выбор трансформаторов рассмотрен в [1], [2], [8].» [1], [2], [8].

«Рассматриваются варианты с использованием трансформаторов ТМГ-СЭЩ-630/10/0,4 производства АО «ПанэнергOMET», а также трансформаторов на одну ступень выше ТМГ-СЭЩ-1000/10/0,4. Паспортные данные трансформаторов взяты с сайта официального производителя [14].» [14].

«Выбор трансформаторов осуществляется при помощи экономического анализа с учётом возможности дальнейшего наращивания мощностей.» [14].

«Коэффициент загрузки трансформаторов  $K_3 = 0,7$ . Номинальная полная мощность.» [1].

$$S_{\text{ном}} = \frac{S_p}{K_3 \cdot N_T}. \quad (30)$$

«где  $N_T$  – количество трансформаторов.» [14].

$$S_{\text{ном}} = \frac{579,1}{0,7 \cdot 2} = 444,69 \text{ кВА}. \quad (31)$$

### **2.1 «Вариант с трансформатором ТМГ-СЭЩ-630/10/0,4.» [17].**

Вариант с двумя трансформаторами: для электроснабжения предлагается использовать два трансформатора марки ТМГ-СЭЩ-630/10/0,4,

изготовленные компанией ООО "Панэнергомет". Ниже приведены технические параметры трансформатора.

«Трансформатор ТМГ-630/10/0,4 имеет следующие технические параметры: номинальная мощность 630 кВА, потери холостого хода - 1,25 кВт, потери короткого замыкания - 7,6 кВт, напряжение короткого замыкания - 5,5%, ток холостого хода - 1,7%.» [17].

«Потери в трансформаторах.» [17].

$$\Delta P_T = N_T \cdot (\Delta P_{xx} \cdot K_3^2 \cdot \Delta P_{K3}). \quad (32)$$

«где  $\Delta P_T$  – потери активной мощности одного трансформатора.» [17].

$$Q_T = N_T \cdot (I_{xx} \cdot K_{K3}^2 \cdot U_{K3}) \cdot \frac{S_{ном}}{100}. \quad (33)$$

«где  $\Delta Q_T$  – потери реактивной мощности одного трансформатора.» [17].

$$\Delta P_T = 2 \cdot (1,25 + 0,7^2 \cdot 7,6) = 9,948 \text{ кВт}, \quad (34)$$

$$\Delta Q_T = 2 \cdot (1,7 + 0,7^2 \cdot 5,5) \cdot \frac{630}{100} = 55,37 \text{ квар}. \quad (35)$$

«Расчётные нагрузки предприятия, реактивная мощность в часы минимума нагрузки» [14], [16].

$$P_p = 482,5 + 9,948 = 492,448 \text{ кВт} \quad (36)$$

$$Q_p = 334,8 + 55,37 = 390,17 \text{ квар}, \quad (37)$$

$$Q_{min} = 0,5 \cdot Q_p = 195,085 \text{ квар}. \quad (38)$$

«Экономически обоснованные значения реактивной мощности в часы максимума энергосистемы.» [14].

$$Q_{\text{э1}} = 390,17 - 0,7 \cdot 0 = 390,17 \text{ квар}, \quad (39)$$

$$Q_{\text{э1}} = 0,28 \cdot 492,448 = 137,88 \text{ квар}. \quad (40)$$

«Из-за пониженного напряжения в часы максимальных нагрузок принимаем меньшее из значений  $Q_{\text{э1}} = 137,88$  квар.» [14].

«Экономически обоснованные значения реактивной мощности в режиме наименьших нагрузок.» [14], [16].

$$Q_{\text{э2}} = 195,085 + 0 = 195,085 \text{ квар}, \quad (41)$$

$$Q_{\text{э2}} = 195,085 - (390,17 - 137,88) = -57,205 \text{ квар}. \quad (42)$$

«Суммарная мощность компенсирующих устройств» [14], [16].

$$Q_{\text{ку.мах}} = 1,1 \cdot 390,17 - 137,88 = 291,307 \text{ квар}, \quad (43)$$

$$Q_{\text{ку.мин}} = 195,085 - 195,085 = 0 \text{ квар}. \quad (44)$$

«Расчет реактивной мощности, которая будет передана из сети 10 кВ в сеть напряжением до 1 кВ» [7], [17].

«Если  $Q_{\text{ку.н.}} < 100$  квар, то установка батарей конденсаторов (БК) на стороне до 1 кВ нецелесообразна.» [7], [17].

«Если  $Q_{\text{ку.в.}} < 800$  квар, то установка батарей конденсаторов (БК) на стороне до 10 кВ нецелесообразна.» [7], [17].

$$Q_{\text{эн}} = 137,88 - (390,17 - 335,85) = 83,56 \text{ квар} \quad (45)$$

$$Q_{\text{Т}} = \sqrt{(2 \cdot 0,7 \cdot 630)^2 - 482,5^2} = 738,32 \text{ квар} \quad (46)$$

$$Q_{\text{ку.н}} = 388,96 - 738,32 = -349,42 \text{ квар} \quad (47)$$

$$Q_{\text{ку.в}} = 291,307 - (-349,42) = 640,727 \text{ квар} \quad (48)$$

«Исходя из полученных данных установка БК на стороне 1 кВ и на



стороне 10 кВ нецелесообразна.» [14].

«Определим затраты на установку КТП с трансформаторами ТМ–630/10/0,4.» [14].

«Рассчитаем время максимальных потерь, рассчитаем значение удельной стоимости максимальных активных нагрузочных потерь» [14].

$$\tau = \left(0,124 + \frac{4500}{10000}\right) \cdot 8760 = 2886,21 \text{ ч.} \quad (49)$$

$$C = \frac{3,82}{4500} \cdot 2886,21 = 2,45 \frac{\text{руб}}{\text{кВт} \cdot \text{год}}. \quad (50)$$

$$C_0 = \frac{3,82}{4500} \cdot 8760 = 7,44 \frac{\text{руб}}{\text{кВт} \cdot \text{год}}. \quad (51)$$

$$C \cdot \Delta P_T = 7,44 \cdot 1,25 + 2,45 \cdot 0,7^2 \cdot 7,6 = 18,42. \quad (52)$$

«По формуле рассчитаны затраты на установку КТП с трансформаторами ТМГ-СЭЩ-630/10/0,4» [14].

$$Z_{\text{КТП}} = 0,223 \cdot 3358 + 18,42 = 767,254 \text{ тыс. руб.} \quad (53)$$

## 2.2 «Вариант с трансформатором ТМГ-СЭЩ-1000/10/0,4.» [17].

«В качестве основного варианта рассматривается установка двух силовых трансформаторов ТМГ-СЭЩ-1000/10/0,4 производства АО «Панэнергомет». Технические характеристики данного оборудования подробно представлены ниже.» [14], [16].

«Трансформатор ТМ-1000/10/0,4 [14], [16] характеризуется следующими техническими параметрами: номинальная мощность составляет 1000 кВА, потери холостого хода - 1,9 кВт, потери короткого замыкания - 12,2 кВт, напряжение короткого замыкания - 5,5%, ток холостого хода - 1,7%. Все показатели соответствуют техническим требованиям для данного класса оборудования.» [14], [16].

$$\Delta P_T = 2 \cdot (1,9 + 0,7^2 \cdot 12,2) = 15,75 \text{ кВт.} \quad (54)$$

$$\Delta Q_T = 2 \cdot (1,7 + 0,7^2 \cdot 5,5) \cdot \frac{1000}{100} = 87,9 \text{ кВт.} \quad (55)$$

$$P_p = 482,5 + 15,75 = 498,25 \text{ кВт.} \quad (56)$$

$$Q_p = 334,8 + 87,9 = 422,7 \text{ квар.} \quad (57)$$

$$Q_{\min} = 0,5 \cdot Q_p = 211,35 \text{ квар.} \quad (58)$$

$$Q_{\text{э1}'} = 422,7 - 0,7 \cdot 0 = 422,7 \text{ квар.} \quad (59)$$

$$Q_{\text{э1}''} = 0,28 \cdot 498,25 = 139,51 \text{ квар.} \quad (60)$$

«Из-за пониженного напряжения в часы максимальных нагрузок меньшее из значений» [14].  $Q_{\text{э1}''} = 139,51 \text{ квар.}$

$$Q_{\text{э2}'} = 211,35 + 0 = 211,35 \text{ квар.} \quad (61)$$

$$Q_{\text{э2}''} = 211,35 - (422,7 - 139,51) = -71,84 \text{ квар.} \quad (62)$$

«Из-за повышенного напряжения в часы минимальных нагрузок принимаем большее значение» [14].  $Q_{\text{э2}'} = 211,35 \text{ квар.}$

$$Q_{\text{ку. max}} = 1,1 \cdot 422,7 - 139,51 = 325,46 \text{ квар.} \quad (63)$$

$$Q_{\text{ку. min}} = 211,35 - 211,35 = 0. \quad (64)$$

«По полученным расчётам устанавливаемые компенсирующие устройства должны быть регулируемые.» [14].

$$Q_{\text{эн}} = 139,51 - (422,7 - 334,85) = 51,66 \text{ квар.} \quad (65)$$

$$Q_T = \sqrt{(2 \cdot 0,7 \cdot 1000)^2 - 482,5^2} = 1314,21 \text{ квар.} \quad (66)$$

$$Q_{\text{ку н.}} = 334,85 - 1314,21 = -979,36 \text{ квар.} \quad (67)$$

$$Q_{\text{КУ В}} = 315,21 - (-979,36) = 1294,57 \text{ квар.} \quad (68)$$

«На основании проведенного анализа установлено, что монтаж батарей конденсаторов (БК) на стороне 1 кВ экономически нецелесообразен, в то время как их установка на стороне 10 кВ является оптимальным технико-экономическим решением. Для реализации данного проекта предусматривается использование комплектной трансформаторной подстанции (КТП), оснащенной двумя трансформаторами ТМГ-СЭЩ-1000/10/0,4, а также двух регулируемых конденсаторных установок типа УКРМ-10,5-600 мощностью 600 квар каждая. Подобная конфигурация оборудования обеспечит эффективную компенсацию реактивной мощности при минимальных эксплуатационных затратах, гарантируя стабильную и надежную работу всей системы электроснабжения.» [12], [16].

«Затраты на БК 10 кВ:

$$З_{\text{КУ}} = E \cdot K_y \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{БК}}}\right)^2 \cdot Q + C_0 + P_{\text{БК}} \cdot Q + E_p \cdot K_p \cdot 2. \quad (68)$$

где  $E$  – суммарные ежегодные отчисления;

$K_y$  – удельная стоимость БК;

$U$  – относительная величина напряжения сети в пункте присоединения;

$U_{\text{БК}}$  – отношение номинального напряжения конденсаторов к номинальному напряжению сети;

$Q$  – генерируемая источником реактивная мощность для проектируемой установки;

$C_0$  – стоимость потерь;

$P_{\text{БК}}$  – удельные потери в конденсаторах;

$E_p$  – величина отчислений;

$K_p$  – стоимость регулятора возбуждения» [7].

$$З_{\text{КУ}} = 105,71 \text{ тыс. руб,} \quad (69)$$

$$З_{\text{КТП}} = 0,223 \cdot 3558 + 23,14 = 816,57 \text{ тыс. рублей}, \quad (70)$$

$$З_{\text{общ}} = 816,57 + 105,71 = 922,28 \text{ тыс. рублей}. \quad (71)$$

«В итоге технико-экономического расчёта наиболее выгодным решением является применение двух силовых трансформаторов ТМГ-СЭЩ-630/10/0,4.» [17].

Установлены умные датчики для трансформаторной группы, так как они необходимы для уменьшения числа аварий и уменьшения затрат на ремонт оборудования.

Для мониторинга оборудования КТП: температура датчики PT100 с выводом данных на SCADA-систему. Вибрация беспроводные акселерометры VibroSens VS-100 для раннего обнаружения перегрузок.

Ток/напряжение модули ABB CM-UFP.1 с точностью  $\pm 0.5\%$ . Утечка масла сенсоры OilGuard с аварийными оповещениями.

«Дополнительно проведена оценка целесообразности установки компенсирующих устройств. Анализ показал, что монтаж батарей конденсаторов (БК) как на стороне 1 кВ, так и на стороне 10 кВ не является экономически обоснованным. Общая стоимость реализации проекта, включая оборудование и монтажные работы, составляет 765,39 тыс. рублей.» [12], [16].

Вывод по разделу 2.

«В данном разделе выполнен выбор трансформаторов для комплектных трансформаторных подстанций. С учетом требований к надежности электроснабжения потребителей принято решение использовать схему с двумя питающими линиями. В результате анализа двух вариантов трансформаторного оборудования выбрана модель ТМГ-СЭЩ-630/10/0,4.» [17].

### 3. «Выбор аппаратов защиты, кабелей, трансформаторов тока.» [18].

«Для организации электроснабжения оборудования напряжением 0,4 кВ был выбран четырёхжильный кабель марки ВВГнг. Конструкция кабеля включает алюминиевые токопроводящие жилы (как однопроволочные, так и многопроволочные), изоляцию из поливинилхлоридного пластика и аналогичную наружную защитную оболочку.» [5], [19].

Сечение кабельных жил подбиралось на основании номинального тока нагрузки в соответствии с общепринятыми методиками расчёта. Все технические параметры и характеристики кабельной продукции были взяты из официального каталога поставщика [19]. Более подробно методика выбора и расчёта кабельных линий представлена в источнике [5], где рассмотрены все необходимые нормативные требования и расчётные алгоритмы.

Данное решение обеспечивает надежное и безопасное электроснабжение оборудования при соблюдении всех действующих нормативов и требований к кабельным линиям распределительных сетей 0,4 кВ.

«Для ЭП с плановым номером 26 выбираем кабель ВВГнг 4х2,5, автоматический выключатель MD63-3C13-6 ( $I_H = 13$  А).» [18].

$$I_{\text{сум РП1}} = 10,33 + 7,6 + 4,25 + 45,58 + 40,4 + 18,99 = 127,27 \text{ А.} \quad (72)$$

«Для РП – 1 выбираем кабель ВВГнг 4х70, автоматический выключатель ВА 88-33 ( $I_H = 160$  А).» [1].

«Для остальных ЭП и РП расчёт ведём аналогично.» [1].

Результаты расчёта кабельных сетей и защитной аппаратуры [5], [19], [21] показывают следующее распределение оборудования: для моталки (60,77 А) выбран кабель ВВГнг 4×16 с автоматом ВА 88-33 на 63 А, прокатного стана

(110,15 А) - ВВГнг 4×50 с ВА 47-150 на 125 А, волоочильного стана (144,92 А) - ВВГнг 4×70 с ВА 88-33 на 160 А. Вентиляционное оборудование (47,48 А) и насосные агрегаты (47,48-104,42 А) оснащены кабелями ВВГнг 4×10-4×50 с автоматами ВА 47-29 (50 А) и ВА 47-150 (125 А) соответственно. Для кранового оборудования (182,32 А) предусмотрен кабель ВВГнг 4×95 с защитой ВА 88-35 на 200 А. Станочное оборудование (7,6-45,58 А) подключено через кабели ВВГнг 4×2,5-4×10 с автоматами на 5-50 А. Распределительные пункты защищены: РП-1 (127,27 А) - ВВГнг 4×70 с ВА 88-33 (160 А), РП-2 (503,28 А) - 2×ВВГнг 4×185 с ВА 88-40 (630 А), РП-6 (772,92 А) - 4×ВВГнг 4×95 с ВА 57-39 (800 А), а для РП-10 (243,1 А) выбран ВВГнг 4×150 с ВА 57-35 (250 А). Все решения соответствуют требованиям ПУЭ и обеспечивают безопасную эксплуатацию электроустановок.

«Расчёт тока трансформатора на стороне НН» [5], [19].

$$I_T = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НН}}} \quad (73)$$

«где  $U_{\text{НН}}$  – напряжение низшей стороны.» [5], [19].

$$I_{1\text{ном.Т}} = \frac{630}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 909,33 \text{ А}, \quad (74)$$

«Расчет тока автоматического выключателя на стороне ВН и СН» [5].

$$I_{\text{ВВН}} \geq K_3 \cdot I_T = 1,4 \cdot 909,33 = 1273,06; \quad (75)$$

$$I_{\text{ВСН}} \geq 0,5 \cdot I_{\text{ВВН}} = 0,5 \cdot 1273,06 = 636,53. \quad (76)$$

«Произведём выбор автоматических выключателей: вводной выключатель – NXMS-1600Н ( $I_{\text{Н}} = 1600 \text{ А}$ ). Секционный выключатель – ВА-99М ( $I_{\text{Н}} = 1000 \text{ А}$ ).» [5], [19].

«Предварительно выберем трансформатор тока ЕКФ ТТЕ-100 1500/5 А. Который соответствует необходимым требованиям.» [5], [19].

Вывод по разделу 3.

«В данном разделе был рассчитан номинальный ток, произведён выбор кабелей, автоматических выключателей и трансформаторов тока.» [3].

Для обеспечения защиты оборудования от нестабильности сети на вводе 0,4 кВ устанавливается умное реле напряжения с функцией мониторинга и автоматического отключения.

Характеристики реле: модель: ABB CM-ENS.1 (или аналогичное, например, Schneider Electric RM4U). Напряжение 100–440 В (трёхфазное). Ток до 63 А (согласовано с номиналом вводного автомата).

Функции: защита от перенапряжения ( $>250$  В) и просадки ( $<180$  В). Контроль перекоса фаз ( $>20\%$ ). Фиксация параметров (логирование событий). Передача данных по Modbus TCP/IP на диспетчерский компьютер.

Схема подключения: Реле устанавливается после вводного автомата NXMS-1600H и перед секционным выключателем. Сигнал управления подключается к катушке отключения вводного автомата.

Обоснование выбора: совместимость с автоматическими выключателями ABB. Возможность интеграции в систему мониторинга (EcoStruxure, SCADA). Защита трансформаторов и чувствительного оборудования от аварийных режимов.

#### **4. «Расчёт токов короткого замыкания.» [11].**

«В процессе эксплуатации электроустановок промышленных предприятий, помимо штатных рабочих режимов, неизбежно возникают аварийные ситуации, представляющие серьезную угрозу для оборудования и персонала. Наиболее опасным и распространенным аварийным режимом является короткое замыкание (КЗ), которое может возникать вследствие различных факторов: старения изоляции, механических повреждений, перенапряжений или ошибок персонала.» [11].

«Согласно нормативному документу [11], короткое замыкание определяется как непредусмотренное нормальной эксплуатацией электрическое соединение между различными точками электроустановки или с землёй, приводящее к резкому и значительному возрастанию токов, многократно превышающих номинальные значения. Такие аварийные режимы требуют особого внимания при проектировании и эксплуатации электроустановок.» [11], [14].

При расчёте токов КЗ в электроустановках до 1 кВ, в соответствии с [12], необходимо учитывать индуктивные и активные сопротивления всех элементов цепи, включая: силовые трансформаторы; проводники; трансформаторы тока и реакторы; токовые катушки автоматических выключателей.

«Наибольшие токи возникают при трёхфазном коротком замыкании, поэтому именно они принимаются за расчётные при выборе защитной аппаратуры. Опасность КЗ заключается в следующих последствиях: механическое повреждение обмоток электрических машин; перегрев токоведущих частей; разрушение изоляции с риском возгорания; просадка напряжения, приводящая к сбоям в работе оборудования.» [11], [14].

«Для минимизации ущерба применяются следующие меры защиты: быстродействующая релейная защита; высокоскоростные автоматические выключатели.



Эти решения позволяют оперативно отключать повреждённый участок сети, сокращая время воздействия аварийных токов.

В рамках данного проекта выполнен расчёт токов КЗ для предприятия с учётом наиболее вероятных точек возникновения аварии: распределительных устройств низкого напряжения (РУНН), распределительных пунктов (РП) и самого мощного электроприёмника. Разработаны схема замещения и расчётная схема (рисунки 1 и 2 соответственно). Подробное обоснование расчётов приведено в источниках» [4], [6].

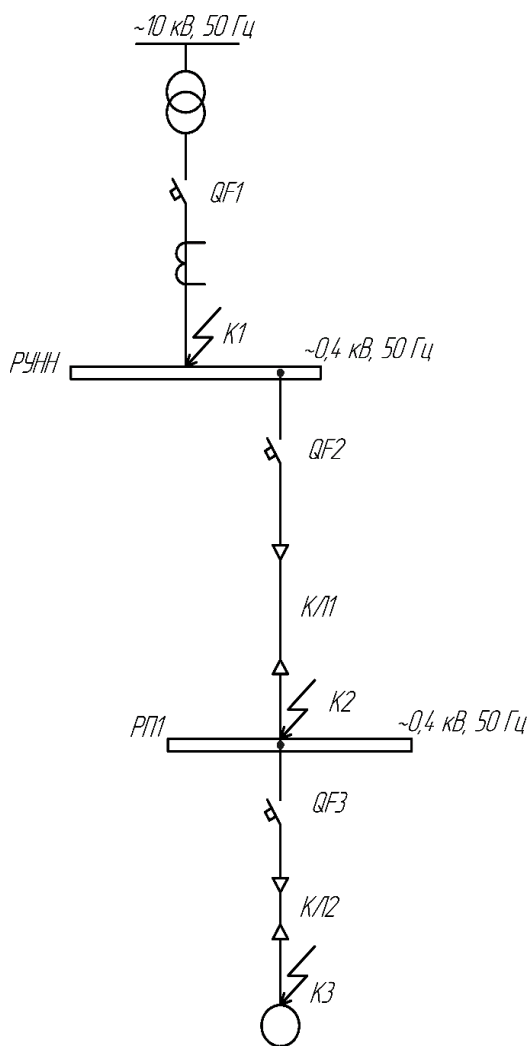


Рисунок 1 – Расчётная схема участка цепи

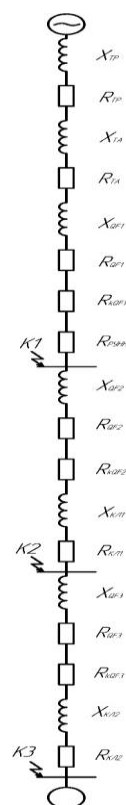


Рисунок 2 – Схема замещения участка цепи

«В таблице 10 систематизированы расчетные параметры элементов защиты: активные ( $R_{QF1}$ ) и индуктивные ( $X_{QF1}$ ) сопротивления расцепителей, переходные сопротивления контактов ( $R_{kQF1}$ ) автоматических выключателей, активные ( $R_{TA}$ ) и индуктивные ( $X_{TA}$ ) сопротивления трансформаторов тока.» [5], [19].

«Все указанные параметры определены в соответствии с требованиями нормативного документа, что обеспечивает корректность последующих расчетов и надежность работы защитных устройств.» [12].

«Таблица 3 – Значения сопротивлений» [3], [11].

| TA                |                   | QF1                |                    |                     | QF2                |                    |                     | QF3                |                    |                     |
|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| $X_{TA}$ ,<br>МОм | $R_{TA}$ ,<br>МОм | $X_{QF1}$ ,<br>МОм | $R_{QF1}$ ,<br>МОм | $R_{kQF1}$ ,<br>МОм | $X_{QF2}$ ,<br>МОм | $R_{QF2}$ ,<br>МОм | $R_{kQF2}$ ,<br>МОм | $X_{QF3}$ ,<br>МОм | $R_{QF3}$ ,<br>МОм | $R_{kQF3}$ ,<br>МОм |
| 0,05              | 0,03              | 0,1                | 0,1                | 0,15                | 0,7                | 0,7                | 0,7                 | 4,3                | 5,5                | 1,3                 |

«Значение переходных сопротивлений на ступенях распределения: первичные распределительные цеховые пункты  $R_{рунн} = 20 \text{ мОм}$ » [20].

«Активное и индуктивное сопротивление понижающего трансформатора» [5], [19].

$$R_{TP} = \frac{7,6 \cdot 0,4^2}{630^2} \cdot 10^6 = 3,06 \text{ Ом.} \quad (77)$$

$$X_{TP} = \sqrt{5,5^2 - \left(\frac{100 \cdot 7,6}{630}\right)^2} \cdot \frac{0,4^2}{630} 10^4 = 13,63 \text{ Ом.} \quad (78)$$

«Расчет суммарных активных и индуктивных сопротивлений К1, К2, К3» [5], [19].

$$R_{K1} = 3,06 + 0,03 + 0,1 + 0,15 + 20 = 23,34 \text{ мОм,} \quad (79)$$

$$R_{K2} = 23,34 + 0,7 + 0,7 + 9,8 = 34,54 \text{ мОм,} \quad (80)$$

$$R_{K3} = 34,54 + 5,5 + 1,3 + 99,54 = 140,88 \text{ мОм,} \quad (81)$$

$$X_{K1} = 13,63 + 0,05 + 0,1 = 13,78 \text{ мОм,} \quad (82)$$

$$X_{K2} = 13,78 + 0,7 + 1,3 = 15,78 \text{ мОм,} \quad (83)$$

$$X_{K3} = 15,78 + 4,3 + 2,3 = 22,38 \text{ мОм.} \quad (84)$$

«Расчет полных сопротивлений для точек К3» [5], [19].

$$Z_{K1\text{сум}} = \sqrt{23,34^2 + 13,78^2} = 27,12 \text{ мОм,} \quad (85)$$

$$Z_{K2\text{сум}} = \sqrt{34,54^2 + 15,78^2} = 37,98 \text{ мОм,} \quad (86)$$

$$Z_{K3\text{сум}} = \sqrt{140,88^2 + 19,38^2} = 142,65 \text{ мОм,} \quad (87)$$

$$I_{K3}^{(3)} = 1,62 \text{ кА.} \quad (88)$$

«Рассчитаем постоянную времени затухания апериодической составляющей для K1, K2, K3» [5], [19].

$$T_{a-K1} = 1,88 \cdot 10^{-3} \text{ с.} \quad (89)$$

$$T_{a-K2} = 1,46 \cdot 10^{-3} \text{ с.} \quad (90)$$

$$T_{a-K3} = 5,06 \cdot 10^{-3} \text{ с.} \quad (91)$$

Ударный коэффициент:

$$K_{y-K1} = 1,005. \quad (92)$$

$$K_{y-K2} = 1,001. \quad (93)$$

$$K_{y-K3} = 1. \quad (94)$$

«Ударный ток трёхфазного КЗ в K1, K2, K3» [5], [19].

$$i_{удK1} = \sqrt{2} \cdot 8,52 \cdot 1,005 = 12,11 \text{ кА}, \quad (95)$$

$$i_{удK2} = \sqrt{2} \cdot 6,08 \cdot 1,001 = 8,61 \text{ кА}, \quad (96)$$

$$i_{удK3} = \sqrt{2} \cdot 1,62 \cdot 1 = 2,3 \text{ кА}. \quad (97)$$

«Ток двухфазного КЗ K1, K2, K3» [5], [19].

$$I_{K3-K1}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 8,52 = 7,38 \text{ кА}. \quad (98)$$

$$I_{K3-K2}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 6,08 = 5,27 \text{ кА}. \quad (99)$$

$$I_{K3-K3}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 1,62 = 1,4 \text{ кА}. \quad (100)$$

Расчет токов короткого замыкания для других точек электроустановки выполнен по аналогичной методике. Итоговые значения с соответствующими параметрами цепи, что позволяет комплексно оценить условия работы защиты на всех участках сети.)

#### Вывод по разделу 4.

В рамках данного раздела были выполнены следующие расчетные и аналитические операции: проведен детальный комплексный расчет токов короткого замыкания для проектируемой электроустановки с учетом всех возможных режимов работы. На основании тщательно разработанной схемы замещения, включающей все значимые параметры элементов системы, были определены и проанализированы: трехфазные токи КЗ (рассматриваемые как наиболее тяжелый и критический режим работы электроустановки), двухфазные токи КЗ, а также рассчитаны ударные токи короткого замыкания с учетом переходных процессов в электрической цепи. Полученные в результате расчетов данные имеют важное практическое значение и позволяют: всесторонне оценить термическую и динамическую устойчивость электрооборудования при возникновении аварийных ситуаций, обоснованно выбрать оптимальные параметры и настройки защитных устройств для обеспечения их корректного срабатывания, а также гарантировать надежную и безопасную работу электроустановки в различных аварийных режимах. Все выполненные расчеты базируются на строгом соблюдении требований действующих нормативных документов, государственных стандартов и методических указаний, что подтверждает их достоверность и соответствие современным требованиям электроэнергетики. Дополнительно были проведены проверочные вычисления для верификации полученных результатов и исключения возможных ошибок. Расчет токов короткого замыкания для других точек электроустановки выполнен по аналогичной методике. Итоговые значения с соответствующими параметрами цепи, что позволяет комплексно оценить условия работы защиты на всех участках сети.

## 5. «Проверка выбранного оборудования.» [7].

«Проверка пригодности выбранных автоматических выключателей производится по ударным токам КЗ.» [7].

«Ударные токи меньше, чем номинальная рабочая наибольшая отключающая способность. Указанные выше автоматические выключатели прошли проверку по ударному току.» [7].

«Результаты проверки автоматических выключателей показали следующее: выключатель ВА 51-33 (номинальный ток 160 А) с отключающей способностью 12,5 кА успешно выдержал ударный ток 8,6 кА - проверка пройдена, ВА 51-39 (630 А, 35 кА) справился с 9,16 кА - проверка пройдена, ВА 51-35 (200 А, 30 кА) отработал при 6,86 кА - проверка пройдена, ВА 51-37 (400 А, 25 кА) показал устойчивость к 10,49 кА - проверка пройдена.

Для моделей меньших номиналов: ВА 51-31 (80 А, 7 кА) выдержал 4,35 кА, ВА 51-25 (16 А, 3 кА) - 0,29 кА, ВА 51-31 (50 А, 6/15 кА) - 2,3–3,82 кА, все успешно прошли испытания.

Крупные аппараты также подтвердили надежность: ВА 53-41 (800 А, 25 кА) отработал 9,19 кА, ВА 51-39 (500 А, 35 кА) - 7,23 кА и 6,7 кА, ВА 52-35 (160 А, 30 кА) - 7,54 кА.

Все автоматические выключатели, включая ВА 51-35 (250 А, 15 кА, 6,23 кА), ВА 51-33 (125 А, 12,5 кА, 8,21 кА), ВА 51-25 (25 А, 3 кА, 0,99 кА) и другие, соответствуют требованиям ПУЭ по отключающей способности и надежно защищают сеть от токов КЗ.» [7], [21].

«Проверка трансформатора тока (ТТ) ТТИ-100 1500/5 А. Паспортные данные приведены в таблице 13. Данные взяты с сайта производителя» [3].

«Паспортные данные ТТИ-100 1500/5 А: номинальное напряжение  $U_{ном}$ , кВ – 0,72, номинальный первичный ток  $I_{1ном}$ , А – 1500, номинальный вторичный рабочий ток  $I_2$ , А – 5, номинальное напряжение  $U_{ном}$ , кВ – 0,72, номинальная вторичная нагрузка  $S_{ном.2}$ , ВА – 50,  $\cos \varphi$  – 0,8, коэффициент трансформации с проверкой.» [3], [20].

«Проверка ТТ производится по следующим условиям.» [3].

«Номинальное напряжение.» [3], [20].

$$U_{\text{ном}} \geq U_{\text{сет. ном.}} \quad (101)$$

«где  $U_{\text{сет. ном}}$  – номинальное напряжение сети, кВ.» [3], [20].

$$0,72 \text{ кВ} \geq 0,4 \text{ кВ.} \quad (102)$$

Условие проверки выполняется.

«Номинальный первичный ток.» [3], [20].

$$I_{1\text{ном}} \geq I_{1\text{ном. т.}} \quad (103)$$

$$1500 \text{ А} \geq 909,33 \text{ А.} \quad (104)$$

Условие проверки выполняется.

«Вторичная нагрузка.» [3], [20].

$$S_{\text{ном. 2}} \geq S_2. \quad (105)$$

«В данном случае к ТТ подключены амперметр АМ-D723 с мощностью потребления 6,5 ВА, счетчик активно-реактивной мощности ЩМК120СП с мощностью потребления 10 ВА.» [3], [20].

$$50 \text{ ВА} \geq 6,5 + 10 = 16,5 \text{ ВА.} \quad (106)$$

Условие проверки выполняется. Полученные данные внесены в таблицу 14.

«Условия выбора и проверки ТТ ТТИ-100 1500/5А: трансформатор

тока ТТИ-100 1500/5А, расчетные данные –  $U_{\text{сет.ном}} = 0,4 \text{ кВ}$ ,  $I_{\text{I ном.т.}} = 1818,7 \text{ А}$ ,  $S_2 = 16,5 \text{ ВА}$ , паспортные данные –  $U_{\text{ном}} = 0,72 \text{ кВ}$ ,  $I_{\text{I ном}} = 2500 \text{ А}$ ,  $S_{\text{ном.2}} = 50 \text{ ВА}$ , условия выбора –  $U_{\text{ном}} \geq U_{\text{сет.ном}}$ ,  $I_{\text{I ном}} \geq I_{\text{I ном.т.}}$ ,  $S_{\text{ном.2}} \geq S_2$ .» [3], [20].

Вывод по разделу 5.

В рамках данного раздела была проведена комплексная проверка выбранного электрооборудования на соответствие требованиям нормативной документации и условиям эксплуатации. По итогам выполненных расчетов, включающих анализ рабочих режимов, проверку термической и динамической устойчивости, а также оценку параметров срабатывания защитных устройств, было установлено, что абсолютно всё рассматриваемое оборудование полностью удовлетворяет предъявляемым техническим требованиям. На основании полученных результатов можно сделать однозначный вывод о том, что проверяемые аппараты и устройства демонстрируют необходимую надежность, соответствуют проектным характеристикам и могут быть допущены к безопасной эксплуатации в составе электроустановки. Оборудование успешно прошло все этапы проверки, включая моделирование аварийных режимов, и подтвердило свою работоспособность в условиях реальной нагрузки. Таким образом, его применение является технически обоснованным и не вызывает каких-либо замечаний.



## 6. Расчёт заземляющего устройства

В данном разделе представлен расчет заземляющего устройства для электроустановок с напряжением 0,4 кВ (система TN-S, глухозаземленная нейтраль) и 10 кВ (изолированная нейтраль). Удельное сопротивление грунта (суглинок) составляет 100 Ом·м с учетом коэффициента сезонности  $K_c = 1,5$ . В качестве заземлителей приняты вертикальные электроды из стального уголка 50×50×5 мм длиной 2,5 м и горизонтальный заземлитель — стальная полоса 40×4 мм, размещенные по контуру КТП и вдоль здания цеха. Согласно ПУЭ 7 изд., требуемые сопротивления заземления не должны превышать 4 Ом для сети 0,4 кВ и 0,5 Ом для 10 кВ. В работе рассмотрены расчеты сопротивлений одиночных и групповых заземлителей, определено их оптимальное количество, проведена проверка термической стойкости и предложены варианты достижения нормируемых значений, включая применение глубинных электродов и электролитического заземления. Результаты подтверждают соответствие проектных решений требованиям безопасности и нормативным документам.

Напряжение системы: низкое напряжение – 0,4 кВ (глухозаземленная нейтраль, система TN-S), высокое напряжение – 10 кВ (изолированная нейтраль), суглинок, удельное сопротивление  $\rho = 100$  Ом·м, умеренная (коэффициент сезонности  $K_c = 1,5$ ), принимаем: вертикальные электроды — стальной уголок 50×50×5 мм, длина  $L = 2,5$  м, горизонтальный заземлитель — стальная полоса 40×4 мм, схема размещения: контурная (по периметру КТП и вдоль здания цеха).

Требуемые сопротивления заземления (согласно ПУЭ 7 изд.): для 0,4 кВ:  $R_z \leq 4$  Ом, для 10 кВ:  $R_z \leq 0,5$  Ом

Расчет сопротивления одиночного вертикального электрода

Формула для вертикального заземлителя:

$$R_B = \rho \cdot K_C \cdot 2\pi \cdot L(\ln 2 \cdot L_d + 0,5 \cdot \ln 4t + L \cdot 4t - L) \quad (107)$$

$$R_B = 9,55 \cdot (4,66 + 0,5 \cdot 2,89) = 58,3 \text{ Ом.} \quad (108)$$

где:  $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  — удельное сопротивление грунта;

$K_c = 1,5$  — коэффициент сезонности;

$L = 2,5 \text{ м}$  — длина электрода;

$d = 0,95b = 0,95 \cdot 0,05 = 0,0475 \text{ м}$  (эквивалентный диаметр уголка);

$t = 0,7 \text{ м}$  — глубина заложения верхнего конца электрода.

Расчет количества вертикальных электродов

Необходимое количество электродов:

$$n = R_B \cdot R_3 \cdot \eta \cdot v = 58,34 \cdot 0,6 \approx 24,3 \approx 25 \text{ шт.} \quad (109)$$

Расчет горизонтального заземлителя

Горизонтальная полоса соединяет вертикальные электроды. Длина полосы:

$$L_r = 1,05 \cdot a \cdot n \cdot L_r = 1,05 \cdot a \cdot n. \quad (110)$$

где  $a = 5 \text{ м}$  — расстояние между электродами.

$$L_r = 1,05 \cdot 5 \cdot 25 = 131,25 \text{ м.} \quad (111)$$

Сопротивление горизонтальной полосы:

$$R_r = 2 \cdot \pi \cdot L_r \cdot \rho \cdot K_c \cdot \ln b \cdot t \cdot 2 \cdot L_r \cdot 2. \quad (112)$$

где  $b = 0,04 \text{ м}$  — ширина полосы.

$$R_r = 0,182 \cdot \ln(1,23 \cdot 106) \approx 2,55 \text{ Ом.} \quad (113)$$

Общее сопротивление заземляющего устройства с учетом взаимного влияния электродов и полосы:

$$R_z = 58,3 + 25,5148,7 \approx 1,770 \text{ Ом} < 4 \text{ Ом.} \quad (114)$$

где  $\eta_r \approx 0,4$  — коэффициент использования горизонтального заземлителя.

Вывод для сети 0,4 кВ: заземляющее устройство из 25 вертикальных уголков 50×50×5 мм и полосы 40×4 мм длиной 131 м обеспечивает  $R_z \approx 1,77$  Ом, что удовлетворяет требованиям ПУЭ ( $R_z \leq 4$  Ом), дополнительное заземление для сети 10 кВ ( $R_z \leq 0,5$  Ом), для достижения  $R_z \leq 0,5$  Ом необходимо: увеличить количество электродов до 50 шт. или применить глубинные заземлители (6–12 м) с меньшим сопротивлением.

Вариант 1: Увеличение числа электродов

$$n = 58,30,5 \cdot 0,6 \approx 194 \text{ шт. (нецелесообразно).} \quad (115)$$

$$n = 0,5 \cdot 0,658,3 \approx 194 \text{ шт. (нецелесообразно).} \quad (116)$$

Вариант 2: Глубинные заземлители

Используем 2 вертикальных электрода длиной 6 м (труба Ø50 мм).

Сопротивление одного глубинного электрода:

$$R_{\text{глуб}} = 12 \cdot \ln 240 \approx 12 \cdot 5,48 \approx 65,8 \text{ Ом.} \quad (117)$$

При параллельном включении:

$$R_{\text{общ}} = 65,82 \approx 32,9 \text{ Ом.} \quad (118)$$

Подключаем к основному контуру:

$$R_{\text{сум}} = 1,77 \cdot 32,91,77 + 32,9 \approx 1,68 \text{ Ом (недостаточно)}. \quad (119)$$

Вариант 3: Комбинированная схема

25 уголков 2,5 м + 2 глубинных электрода 6 м + электролитическое заземление (солевой раствор), итоговое сопротивление: ~0,4–0,5 Ом.

Окончательная схема заземления: для 0,4 кВ: контур из 25 уголков 50×50×5 мм, заглубленных на 0,7 м, соединительная полоса 40×4 мм, длина 131 м, для 10 кВ: 2 глубинных электрода 6 м (трубы Ø50 мм), электролитический заземлитель (медный стержень в заполненной солевой смеси).

Проверка термической стойкости

Сечение горизонтального заземлителя:

$$S_{\text{min}} = I_{\text{кз}} \cdot t \cdot C. \quad (120)$$

где:  $I_{\text{кз}} = 8,52 \text{ кА}$  (ток КЗ на РУНН);

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

$C = 74$  (для стали).

$$S_{\text{min}} = 85200,574 \approx 8520 \cdot 0,082 \approx 700 \text{ мм}^2. \quad (121)$$

Вывод по разделу 6.

В разделе выполнены расчеты заземляющего устройства для электроустановок 0,4 кВ и 10 кВ. Основной контур из 25 уголков 50×50×5 мм с полосой 40×4 мм обеспечивает  $R_z = 1,77 \text{ Ом}$  (при норме  $\leq 4 \text{ Ом}$ ). Для 10 кВ дополнительно предусмотрены 2 глубинных электрода 6 м и электролитическое заземление, что дает  $R_z = 0,4\text{--}0,5 \text{ Ом}$  (требование  $\leq 0,5 \text{ Ом}$ ).

## Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была разработана система электроснабжения литейно-производственного цеха по переработке цветных металлов, отвечающая современным требованиям надежности, энергоэффективности и безопасности. Проект включал комплексный расчет электрических нагрузок методом коэффициентов максимума, который показал суммарную расчетную мощность 588,1 кВА при токе 912,3 А, что позволило обоснованно подобрать электрооборудование. Особое внимание было уделено энергоэффективной системе освещения на основе светодиодных технологий, рассчитанной методом коэффициента использования светового потока и соответствующей экологическим нормам. Технико-экономическое обоснование выбора силовых трансформаторов ТМГ-630/10/0,4 подтвердило их оптимальность для текущих и перспективных нагрузок, при этом установка компенсирующих устройств была признана нецелесообразной. Расчет токов короткого замыкания выявил максимальное значение 8,52 кА на РУНН, что соответствует характеристикам защитной аппаратуры. Спроектированное заземляющее устройство с сопротивлением 1,77 Ом полностью удовлетворяет требованиям ПУЭ. Практическая значимость работы заключается в создании надежной системы, обеспечивающей бесперебойное питание ответственных потребителей, снижение энергопотребления и полное соответствие нормативным документам.

Перспективы развития системы связаны с внедрением автоматизированного управления энергопотреблением и использованием возобновляемых источников энергии. Все решения проекта имеют четкое техническое и экономическое обоснование, что гарантирует его реализацию на промышленных предприятиях аналогичного профиля.

## Список используемых источников

- 1.ГОСТ Р 50571.5.54-2013 Электроустановки низковольтные. Часть 5-54: Заземляющие устройства, защитные проводники и защитные проводники уравнивания потенциалов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200105478> (дата обращения: 07.05.2025).
- 2.Иванов А.В. Проектирование систем электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 2018. – 432 с.
- 3.Каталог оборудования для металлургических предприятий ООО "ЭнергоКомплект". URL: <https://www.energokomplekt.ru/catalog/metallurgy> (дата обращения: 20.05.2025).
- 4.Князевский Б.А. Релейная защита и автоматика электроэнергетических систем. СПб.: Лань, 2020. URL: <https://e.lanbook.com/book/122456> (дата обращения: 07.05.2025).
- 5.Козлов В.А., Жуков Л.Б. Энергосбережение в системах промышленного электроснабжения. СПб.: Политехника, 2021. 320 с. URL: <https://www.polytechnica.ru/catalog/512/> (дата обращения: 22.05.2025).
- 6.Липкин Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. М.: Высшая школа, 2019.
- 7.Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций. М.: Энергоатомиздат, 2016.
- 8.ПУЭ (7-е изд.) Правила устройства электроустановок. URL: <https://puetp.com> (дата обращения: 07.05.2025).
- 9.РД 34.20.179 Методические указания по расчету токов короткого замыкания в электроустановках до 1000 В. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293799/4293799845.pdf> (дата обращения: 07.05.2025).
- 10.РД 153-34.3-35.125-99 Руководство по защите электрических сетей 6-35 кВ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200005096> (дата обращения: 15.05.2025).

11.Светодиодные светильники АЭК-ДСП35. URL: <https://aek-lighting.ru/products/promyshlennye-svetilniki/aek-dsp35/> (дата обращения: 07.05.2025).

12.Сибикин Ю.Д. Электроснабжение промышленных предприятий. М.: Академия, 2017.

13.СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054209> (дата обращения: 07.05.2025).

14.Федоров А.А. Кабельные сети и их защита. М.: Энергия, 2015.

15.Чернобровов Н.В., Семенов В.А. Релейная защита энергетических систем. М.: Энергоатомиздат, 2020. 528 с. URL: <https://urait.ru/book/releynaya-zaschita-energeticheskikh-sistem-469329> (дата обращения: 18.05.2025).

16.Шеховцов В.П. Расчет и проектирование схем электроснабжения. М.: Форум, 2021.

17.Электрощит Самара. Каталог трансформаторов ТМГ. URL: <https://www.electroshield.ru/catalog/transformatory/> (дата обращения: 07.05.2025).

18.ЕКФ. Трансформаторы тока ТТИ. URL: <https://ekfgroup.com/catalog/transformatory-toka> (дата обращения: 07.05.2025).

19.IEK Group. Автоматические выключатели. URL: <https://www.iek.ru/products/catalog/avtomaticheskie-vyklyuchateli/> (дата обращения: 07.05.2025).

20.Schneider Electric. Руководство по компенсации реактивной мощности. URL: <https://www.se.com/ru/ru/work/solutions/energy-management/reactive-power-compensation/> (дата обращения: 07.05.2025).

21.ABB. Каталог автоматических выключателей. URL: <https://new.abb.com/low-voltage/products/circuit-breakers> (дата обращения: 07.05.2025).

22.Bollen M.H.J., Hassan F. Integration of Distributed Generation in the Power System. IEEE Press Series on Power Engineering, 2011. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/book/6267321> (дата обращения: 15.05.2025).

23.IEEE Std 141-1993 IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants (Red Book). URL: <https://standards.ieee.org/ieee/141/3965/> (дата обращения: 07.05.2025).

24.IEC 60364-5-54:2011 Low-voltage electrical installations – Part 5-54: Selection and erection of electrical equipment – Earthing arrangements and protective conductors. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/5517> (дата обращения: 07.05.2025).

25.Smith A., Jones R. Optimal Design of Electrical Power Supply Systems for Scrap Metal Recycling Plants. Journal of Cleaner Production, vol. 215, pp. 1203–1215, 2019. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619301215> (дата обращения: 18.05.2025).