

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

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.03.02. Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Электроснабжение

(направленность (профиль)/специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Электроснабжение группы цехов сталеплавильного комбината

Обучающийся

А. Е. Трощанович

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., Д. А. Кретов

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

Тольятти 2025

Аннотация

Выпускная квалификационная работа посвящена разработке системы электроснабжения группы цехов сталеплавильного комбината с целью повышения ее надежности и экономичности. В работе анализируются схема электроснабжения и состояние оборудования, выявляются основные недостатки и проблемные зоны. На основе проведенного анализа разработаны предложения по оптимизации системы, направленные на сокращение потерь мощности и обеспечение устойчивости энергоснабжения.

Актуальность данной работы заключается в необходимости разработки эффективного и надежного электроснабжения группы цехов сталеплавильного комбината, что позволит повысить производственные показатели и снизить эксплуатационные издержки.

Целью данной выпускной квалификационной работы является разработка системы электроснабжения группы цехов сталеплавильного комбината, обеспечивающей высокий уровень надежности, устойчивости и экономичности как всего предприятия, так и отдельной его системы электроснабжения.

Результаты работы позволят повысить эффективность функционирования цехов за счет разработанной схемы электроснабжения, что обеспечит сокращение эксплуатационных затрат и улучшение показателей производственной надежности.

Пояснительная записка выпускной квалификационной работы содержит 12 разделов. Текст выпускной квалификационной работы представлен на 61 печатном листе, содержит 19 таблиц и 11 рисунков.

Содержание

Введение.....	4
1 Общие сведения о предприятии	6
2 Расчет электрических нагрузок	11
3 Определение расчетных нагрузок предприятия в целом	17
4 Картограмма нагрузок и центра электрических нагрузок	21
5 Выбор числа и мощности цеховых трансформаторов	24
6 Схема внешнего электроснабжения.....	28
7 Схема внутризаводской распределительной сети 10 кВ.....	32
8 Расчет токов КЗ выше 1000 В и выбор коммутационных аппаратов	37
9 Выбор коммутационных аппаратов	44
9.1 Выбор выключателей и разъединителей	44
9.2 Выбор трансформаторов тока	46
9.3 Выбор трансформаторов напряжения	48
10 Построения эпюры отклонений напряжения для цепочки линий от шин ГПП наиболее удалённого от цеховой ТП электроприемника для режимов максимальной и минимальной нагрузок.....	51
Заключение	57
Список используемой литературы и используемых источников.....	59

Введение

Сталеплавильное производство является одной из ключевых отраслей современной промышленности, обеспечивая выпуск стали — материала, который лежит в основе строительства, машиностроения и многих других сфер экономики. Эффективная работа сталеплавильного комбината невозможна без надежного и бесперебойного электроснабжения, так как технологические процессы характеризуются высокой энергоемкостью и требуют стабильного обеспечения электроэнергией. В рамках данной выпускной квалификационной работы рассматривается система электроснабжения группы цехов сталеплавильного комбината, что подчеркивает актуальность изучения особенностей предприятия и его энергетической инфраструктуры.

Электроснабжение промышленных предприятий, особенно таких энергоемких, как сталеплавильные комбинаты, играет ключевую роль в обеспечении их бесперебойной и эффективной работы. Сталеплавильные цеха предъявляют высокие требования к стабильности и надежности подачи электроэнергии, поскольку отклонения в энергоснабжении могут привести к технологическим сбоям и значительным финансовым потерям. В современных условиях проблема обеспечения устойчивого и экономичного электроснабжения сталеплавильных предприятий приобретает особую актуальность.

В условиях растущих требований к энергосбережению и оптимизации затрат на электроэнергию возникает необходимость в совершенствовании существующих схем электроснабжения и повышении уровня автоматизации контроля за параметрами электрических сетей.

Актуальность данной работы заключается в необходимости разработки эффективного и надежного электроснабжения группы цехов сталеплавильного комбината, что позволит повысить производственные показатели [2] и снизить эксплуатационные издержки.

Целью данной выпускной квалификационной работы является разработка системы электроснабжения группы цехов сталеплавильного комбината, обеспечивающей высокий уровень надежности, устойчивости и экономичности как всего предприятия, так и отдельной его системы электроснабжения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать характеристики предприятия в целом и параметры нагрузки в группе цехов сталеплавильного комбината.
- провести расчёт электрических нагрузок предприятия, построить его картограмму нагрузок,
- разработать систему внутреннего и внешнего электроснабжения предприятия с выбором основного электрооборудования, в том числе и силовых трансформаторов;
- построить эпюры отклонений напряжения для цепочки линий от шин ГПП наиболее удалённого от цеховой ТП электроприемника для режимов максимальной и минимальной нагрузок.

Проведение анализа существующей системы электроснабжения и выявленных недостатков подтверждает необходимость достижения поставленной цели и выполнения указанных задач. Устранение текущих проблем позволит обеспечить более стабильное и эффективное электроснабжение цехов, что будет способствовать повышению общей производительности» [2] и снижению затрат на электроэнергию.

1 Общие сведения о предприятии

Данный раздел посвящен описанию сталеплавильного комбината как объекта данной ВКР. Особое внимание будет уделено технологическим особенностям цехов, входящих в группу, для которой проектируется система электроснабжения. Эти данные станут основой для дальнейшего анализа и разработки решений, направленных на повышение надежности и эффективности энергоснабжения комбината.

Сталеплавильный комбинат предназначен для производства стали путем переработки металлолома, чугуна и других сырьевых материалов в высококачественный металл, который служит основой для создания продукции, используемой в промышленности, строительстве и машиностроении. Исходными данными на проектирование являются генеральный план сталеплавильного комбината, приведённый на рисунке 1 и сведения об электрических нагрузках сталеплавильного комбината представленные в таблице 1 [3].

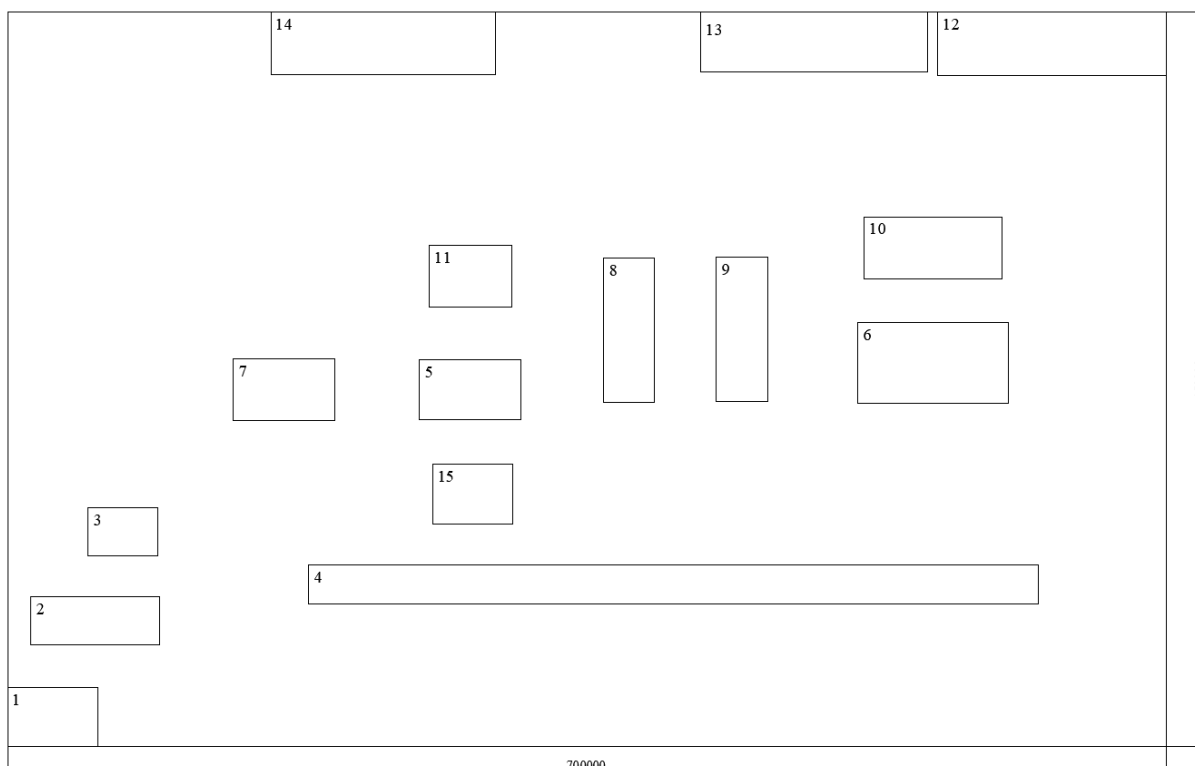


Рисунок 1 – Генплан сталеплавильного комбината

Таблица 1 – Сведения об электрических нагрузках комбината

№ на ген.плане	Наименование цеха	Установленная мощность цеха, кВт
1	Вагоноопрокидыватель	390
2	Отделение предварительного дробления	1720
3	Переворачивающая станция №1	650
4	Закрытый склад угля	450
5	Отделение окончательного дробления №2	2600
6	Отделение окончательного дробления №1	1600
7	Ремонтно-механический цех	—
8	Бункеры концентрата	160
9	Бункеры флотоконцентрата	730
10	Смесительное отделение №1	1450
11	Смесительное отделение №2	1520
12	Угольная башня №1	660
13	Угольная башня №2	780
14	Угольная башня №3	1200
15	Переворачивающая станция №2	350

«Кроме того, в работе планируется подробно рассматривать ремонтно-механический цех (РМЦ) предприятия. План РМЦ приведен на рисунке 2» [3].

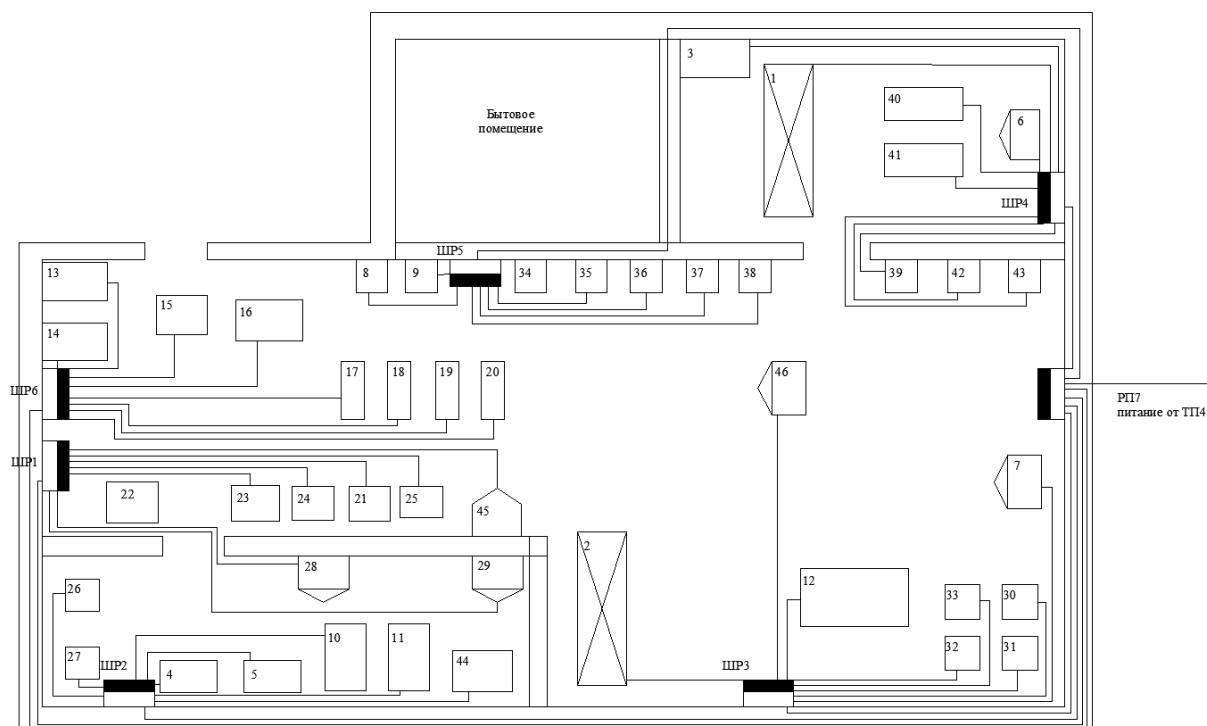


Рисунок 2 – План РМЦ

Ремонтно-механический цех предназначен для обеспечения технического обслуживания, ремонта и изготовления запасных частей и оборудования, необходимых для бесперебойной работы основных производственных подразделений предприятия. Сведения об электрических нагрузках РМЦ приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Сведения об электрических нагрузках РМЦ

№ на схеме	Наименование электроприемника	Р _н , кВт
1,2	Кран–балка ПВ=25%	14
3	Листозагибочная машина	50
6,7	Универсально–фрезерный станок	13
10,11	Токарно–револьверный станок	3
4,5	Токарно–винторезный станок	2
13–16,26,27	Настольно–сверлильный станок	10
17–20	Резьбонарезной полуавтомат	8
8,9	Заточной станок	25
44	Фрезерный станок с ЧПУ	50
21–25	Точильно–шлифовальный станок	23
28,29	Радиально–сверлильный станок	55
30–33	Универсально–заточной станок	19
12	Плоскошлифовальный станок	2
40,41	Полировальный станок	10
42,43	Сварочная машина ПВ=25%	6
34–39	Сварочная кабина ПВ=40%	1,5
45,46	Вертикально–сверлильный станок	14

«Описание условий производственных помещений центрального ремонтно-механического цеха и классификация электроприемников по надежности электроснабжения

В рамках данной работы исследуется система электроснабжения РМЦ. Сталеплавильный комбинат в целом включает 15 производственных помещений, среди которых выделяются основные и вспомогательные цеха, а также административные и исследовательские подразделения, такие как заводоуправление и лаборатория.

Особенности внешней среды, такие как температура, уровень влажности и наличие зон с повышенной пожаро- или взрывоопасностью, оказывают влияние на выбор конструкции оборудования, а также на подбор марок,

сечений проводов, кабелей и устройств защиты. Производственные процессы на проектируемом комбинате в основном протекают в стандартных условиях, однако отдельные участки цехов могут относиться к помещениям с повышенной температурой, высокой влажностью или химически агрессивной средой. Сведения об условиях среды ключевых производственных помещений комбината отражены в таблице 3» [7].

«Сбои в подаче электроэнергии к электроприемникам основного производства сталеплавильного комбината способны вызвать значительные нарушения в выпуске продукции и остановку работы персонала, что позволяет классифицировать такие электроприемники как относящиеся ко второй категории по надежности электроснабжения. В свою очередь, вспомогательные цеха и подразделения, не связанные напрямую с выпуском продукции, можно отнести к третьей категории по надёжности электроснабжения. Подробная классификация большей части электроприемников комбината по уровню бесперебойности электроснабжения представлена в таблице 3» [8].

Таблица 3 – Характеристика внешней среды производственных помещений сталеплавильного комбината и бесперебойности электроснабжения основных производств

Номер на ген. плане	Наименование цехов	Характеристика среды	Категория электроснабжения	Установленная мощность, кВт
1	Вагоноопрокидыватель	пыльная	III	390
2	Отделение предварительного дробления	пыльная	III	1720
3	Переворачивающая станция №1	пыльная	III	650
4	Закрытый склад угля	нормальная	II	450
5	Отделение окончательного дробления №2	пыльная	III	2600
6	Отделение окончательного дробления №1	пыльная	II	1600
7	РМЦ	пыльная, жаркая	III	–
8	Бункеры концентрата	шумная, пыльная	III	160
9	Бункеры флотоконцентрата	нормальная	III	730

Продолжение таблицы 3

Номер на ген. плане	Наименование цехов	Характеристика среды	Категория электроснабжения	Установленная мощность, кВт
10	Смесительное отделение №1	пыльная, жаркая	III	1450
11	Смесительное отделение №2	пыльная, жаркая	II	1520
12	Угольная башня №1	задымленная	II	660
13	Угольная башня №2	задымленная	II	780
14	Угольная башня №3	задымленная	II	1200
15	Переворачивающая станция №2	пыльная	III	350

Выводы по разделу 1.

В первом разделе рассмотрены основные характеристики сталеплавильного комбината, включая его план и характеристики цехов. Сталеплавильный комбинат предназначен для выпуска стали, являющейся ключевым материалом для множества отраслей промышленности, а центральный ремонтно-механический цех выполняет важную функцию обеспечения технического обслуживания и ремонта оборудования, необходимого для бесперебойной работы предприятия. Были проанализированы особенности производственных помещений, включая условия среды (температура, влажность, химическая активность), которые влияют на выбор оборудования и элементов системы электроснабжения.

Также в разделе определена классификация электроприемников по надежности электроснабжения: основное производство отнесено ко второй категории ввиду значимости бесперебойной работы, а вспомогательные подразделения — к третьей категории. Полученные данные о структуре предприятия, условиях эксплуатации и категориях электроприемников создают основу для дальнейшего проектирования системы электроснабжения группы цехов, позволяя учесть специфику комбината и обеспечить его эффективное функционирование.

2 Расчет электрических нагрузок

Одним из ключевых этапов проектирования системы электроснабжения любого производственного объекта является расчет электрических нагрузок, который позволяет определить потребляемую мощность, выбрать соответствующее оборудование и обеспечить надежность и эффективность энергоснабжения. В рамках данной выпускной квалификационной работы рассматривается электроснабжение РМЦ сталеплавильного комбината, который выполняет важную вспомогательную функцию, обеспечивая техническое обслуживание и ремонт оборудования основного производства. Точный расчет электрических нагрузок необходим для учета специфики работы цеха, включая разнообразие электроприемников, режимы их эксплуатации и условия производственной среды.

Данный раздел посвящен определению электрических нагрузок ремонтно-механического цеха с учетом его технологических особенностей и классификации электроприемников по надежности электроснабжения. Расчеты будут основываться на анализе состава оборудования, его «мощности, коэффициентов использования и спроса, а также на данных о производственных процессах. Результаты расчетов станут основой для выбора схемы электроснабжения, сечений проводников и защитной аппаратуры, что обеспечит стабильную работу цеха и минимизацию рисков перебоев в энергоснабжении.

Расчет силовых нагрузок цеха производим по методу упорядоченных диаграмм, т.е. с использованием коэффициента максимума и $P_{см}$.

Все электроприемники цеха разбиваются на две группы с одинаковыми режимами работы:

- электроприемники с переменным графиком нагрузки, $k_{и} < 0,6$ – группа А;
- электроприемники с практически постоянным графиком нагрузки, $k_{и} \geq 0,6$ – группа Б.

По каждой группе определяется суммарная номинальная мощность» [17]:

$$P_{\text{ном}} = \sum_{i=1}^n P_{\text{ном}}, \quad (1)$$

«в которую входят мощности ЭП, приведенные к ПВ=100%.

Средняя активная нагрузка за наиболее загруженную смену для каждой группы электроприемников» [17]:

$$P_{\text{см}} = k_{\text{и}} \cdot P_{\text{ном}}, \quad (2)$$

«где $k_{\text{и}}$ – коэффициент использования.

Средняя реактивная нагрузка за наиболее загруженную смену для каждой группы электроприемников» [17]:

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

«Коэффициент использования $k_{\text{и}}$ и $\cos\varphi$ для каждого ЭП или группы ЭП определяются по справочным данным» [17].

«Средневзвешенный коэффициент использования определяется:

$$K_{\text{исп}} = \frac{\sum P_{\text{см}}}{\sum P_{\text{ном}}}, \quad (4)$$

где $\sum P_{\text{см}}$ – суммарная средняя активная нагрузка за наиболее загруженную смену группы электроприемников цеха,

$\sum P_{\text{ном}}$ – суммарная установленная мощность группы электроприемников цеха.

Коэффициент максимума активной мощности определяется по в зависимости от средневзвешенного коэффициента использования $k_{и}$ и эффективного числа электроприемников $n_{э}$, для данной группы» [17]:

$$n_{э} = \frac{(\sum_1^n P_{ном})}{\sum_1^n P_{ном}}. \quad (5)$$

«При $m \leq 3$ и любом значении $k_{и}$ допускается принимать $n_{э} = n$, где n – исходное число ЭП:

$$m = \frac{P_{ном.макс.}}{P_{ном.мин.}}, \quad (6)$$

Расчетная активная и реактивная мощности группы приемников определяются из выражений» [17]:

$$P_{max} = k_{max} \cdot P_{см}, \quad (7)$$

$$Q_{max} = Q_{см} \text{ при } n_{э} > 10, \quad (8)$$

$$Q_{max} = 1,1 \cdot Q_{см} \text{ при } n_{э} \leq 10. \quad (9)$$

Освещение производственных помещений является важной составляющей системы электроснабжения любого промышленного объекта, включая ремонтно-механический цех сталеплавильного комбината. Правильный расчет электрических нагрузок осветительных приемников позволяет обеспечить комфортные и безопасные условия труда, соответствие нормам освещенности, а также оптимизировать энергопотребление. Расчетная нагрузка осветительных приемников определяется на основе установленной мощности осветительных приборов и коэффициента спроса, что отражает реальное использование электроэнергии в процессе эксплуатации:

$$P_{p.o} = P_{ном.o} \cdot k_{c.o.}, \quad (10)$$

где $k_{c.o}$ – коэффициент спроса осветительной нагрузки Коэффициент спроса учитывает степень одновременности работы осветительных приборов и их фактическое использование в течение рабочего времени. Этот показатель зависит от режима эксплуатации цеха и специфики производственного процесса. Для ремонтно-механического цеха, где работы могут проводиться неравномерно (например, в зависимости от графика ремонтов или сменности), «коэффициент спроса составляет $k_{c.o} = 0,85$;

$P_{ном.о}$ – номинальная мощность осветительных приборов, кВт;

$$P_{ном.о} = P_{уд.о} \cdot F_{ц}, \quad (11)$$

где $P_{уд.о}$ – удельная плотность осветительной нагрузки, кВт/м²;

$F_{ц}$ – площадь цеха по генплану» [1].

«Полная расчетная нагрузка цеха с учетом освещения определяется:

$$S_p = \sqrt{(P_p + P_{p.o.})^2 + Q_p^2}. \quad (12)$$

Расчетный ток» [1]:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}. \quad (13)$$

В качестве примера данного расчёта рассматривается группа потребителей, состоящая из станков различного типа, которая группируется под одним пунктом – станки разные, которая имеет следующие характеристики:

$$P_{уст} = 579 \text{ кВт}; k_{и} = 0,14; \cos \varphi = 0,6;$$

$$P_{\text{см}} = 0,14 \cdot 589 = 81,06 \text{ кВт};$$

$$Q_{\text{см}} = 81,06 \cdot \text{tg} (\arccos(0,6)) = 108,08 \text{ квар};$$

$$m = \frac{P_{\text{ном.макс.}}}{P_{\text{ном.мин.}}} = \frac{55}{0,95} = 57,9.$$

«Эффективное число электроприемников.

Группа А: $m > 3$, $k_{\text{и}} < 0,2$, эффективное число ЭП определяется с помощью [17], тогда $n_3 = 24$ и $k_{\text{м}} = 1,57$ » [17].

$$F_{\text{ц}} = 100 \cdot 48 = 4800 \text{ м}^2; F_{\text{с.о.}} = 0,85; P_{\text{уд.о}} = 0,015 \text{ кВт/м}^2.$$

Установленная мощность осветительных приемников представляет собой суммарную мощность всех осветительных приборов, установленных в ремонтно-механическом цехе и равна:

$$P_{\text{ном.о}} = 0,015 \cdot 4800 = 72 \text{ кВт};$$

тогда расчётная мощность системы освещения составляет:

$$P_{\text{р.о}} = 72 \cdot 0,85 = 61,2 \text{ кВт}.$$

Полученная расчетная нагрузка осветительных приемников включается в общий баланс электрических нагрузок цеха и используется для выбора сечений кабелей, мощности трансформаторов и защитной аппаратуры. Тогда полная мощность ремонтно-механического цеха составляет:

$$S_{\text{р}} = \sqrt{(153,5 + 61,2)^2 + 128,01^2} = 249,96 \text{ кВА},$$

тогда расчётный ток ремонтно-механического цеха составляет:

$$I_p = \frac{249,96}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 380,2 \text{ А.}$$

Определение расчетных нагрузок ремонтно-механического цеха приведено в таблице 4.

Таблица 4 – Определение расчетных нагрузок ремонтно-механического цеха

Потребители	Количество ЭП	Установленная мощность		$m = P_{\text{max}}/P_{\text{min}}$	$K_{\text{и}}$	$\cos\phi$	Средняя нагрузка		n	$K_{\text{м}}$	Максимальная нагрузка			$I_p, \text{ А}$
		Одного ЭП $P_n, \text{ кВт}$	Общая $P_n, \text{ кВт}$				$P_{\text{см}}, \text{ кВт}$	$Q_{\text{см}}, \text{ кВар}$			$P_m, \text{ кВт}$	$Q_m, \text{ кВар}$	$S_m, \text{ кВА}$	
Кран–балка ПВ=25%	2	7	14	–	0,05	0,5	0,70	1,21	–	–	–	–	–	–
Разные станки	35	2–55	579	–	0,14	0,6	81,06	108,08	–	–	–	–	–	–
Листозагибочная машина	1	50	50	–	0,25	0,65	12,50	14,61	–	–	–	–	–	–
Сварочная машина ПВ=25%, Сварочная кабина ПВ=40%	8	0,95–3	11,7	–	0,30	0,65	3,51	4,10	–	–	–	–	–	–
Итого по цеху без освещения	46	0,95–55	654,7	$m > 3$	0,15	–	97,77	128,01	24	1,57	153,50	128,01	–	–
Осветительная нагрузка	–	–	72	–	0,85	–	61,2	–	–	–	61,2	–	–	–
Всего с учетом освещения	–	–	726,7	–	–	–	158,97	128,01	–	–	214,70	128,01	249,96	380,23

Выводы по разделу 2.

Во втором разделе ВКР выполнены расчеты электрических нагрузок ремонтно-механического цеха сталеплавильного комбината, что позволило определить общую потребляемую мощность и характеристики электроприемников, задействованных в его работе. На основе анализа состава оборудования, режимов его эксплуатации и коэффициентов использования были получены данные о расчетных нагрузках.

3 Определение расчетных нагрузок предприятия в целом

Проектирование системы электроснабжения сталеплавильного комбината требует комплексного подхода, включающего определение расчетных электрических нагрузок всего предприятия. Этот этап является основополагающим для обеспечения надежности, эффективности и безопасности энергоснабжения, так как сталеплавильное производство характеризуется высокой энергоемкостью и сложной структурой электроприемников. В рамках данной выпускной квалификационной работы рассматривается электроснабжение группы цехов комбината, однако для разработки целостной системы необходимо учитывать совокупные нагрузки всех производственных и вспомогательных подразделений предприятия.

Данный раздел посвящен анализу и расчету общей электрической мощности, потребляемой сталеплавильным комбинатом, с учетом его технологических особенностей и разнообразия электроприемников. В процессе выполнения расчётов будут учтены данные о составе оборудования, режимах его работы, коэффициентах спроса и использования, а также специфика производственных помещений, включая условия среды. Полученные результаты позволят обосновать выбор мощности питающих линий, трансформаторов и распределительных устройств, «обеспечивая оптимальное функционирование предприятия в целом и создавая основу для последующих этапов проектирования системы электроснабжения.

Расчетную полную мощность предприятия определяем по расчетным активным и реактивным нагрузкам цехов (до и выше 1000 В) с учетом расчетной нагрузки освещения цехов и территории предприятия, потерь мощности в трансформаторах цеховых подстанций и ГПП, и потерь в высоковольтных линиях.

Расчетная нагрузка силовых приемников цехов определяется из соотношений» [17]:

$$P_p = K_c \cdot P_n; \quad (14)$$

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (15)$$

где P_n – «суммарная установленная мощность всех приемников цеха;
 K_c – коэффициент спроса, принимаемый по справочным данным;
 $\operatorname{tg} \varphi$ – принимается по соответствующему значению коэффициента мощности» [17].

«Пример расчета для «Вагоноопрокидывателя»:

$$P_p^H = 0,7 \cdot 390 = 273 \text{ кВт},$$

$$Q_p^H = 273 \cdot \operatorname{tg}(\arccos 0,8) = 204,75 \text{ кВар}.$$

Расчетные силовые и осветительные нагрузки по цехам предприятия сведем в таблицу 5.

Определяется полная расчетная нагрузка предприятия» [3]:

$$\sum P_p^H = 9516 \text{ кВт},$$

$$\sum Q_p^H = 7862 \text{ кВар},$$

$$\sum P_{po} = 1175 \text{ кВт}.$$

Таблица 5 – Определение расчетных нагрузок по цехам комбината

Наименование потребителя	Силовая нагрузка					Осветительная нагрузка					Расчетная нагрузка		
	P _{ном} , кВт	к _с	cosφ / tgφ	P _p , кВт	Q _p , кВАр	F, м²	P _{уд.} , кВт/м²	P _{н.о.} , кВт	к _{с.о}	P _{р.о.} , кВт	P _p +P _{р.о.} , кВт	Q _p , кВАр	S _p , кВА
Вагоноопрокидыватель	390	0,7	0,8/0,75	273	204,75	2912	0,015	43,68	0,9	39,31	312,31	204,75	373,45
Отделение предварительного дробления	1720	0,6	0,9/0,48	1032	495,36	22400	0,016	358,4	0,6	215,04	1247,04	495,36	1341,82
Переворачивающая станция №1	650	0,8	0,75/0,88	520	457,6	5920	0,015	88,80	0,85	75,48	595,48	457,6	751,00
Закрытый склад угля	450			360	316,8	5920		88,80		75,48	435,48	316,8	538,52
Отделение окончательного дробления №2	2600			2080	1830,4	9600		144,00		122,40	2202,40	1830,4	2863,73
Отделение окончательного дробления №1	1600	0,6	0,8/0,75	960	720	9600		144,00		122,40	1082,40	720	1300,00
Ремонтный цех	654,7	—	—	153,5	128,01	4800		72,00		61,20	214,70	128,01	249,97
Бункеры концентрата	160	0,8	0,7/1	128	128	5820		87,30		74,21	202,21	128	239,31
Бункеры флотоконцентрата	730		0,6/1,33	216	287,28			87,30		74,21	290,21	287,28	408,35
Смесительное отделение №1	1450	0,75	0,8/0,75	1087,5	815,62	6720		87,30		74,21	1161,71	815,63	1419,44
Смесительное отделение №2	1520	0,6		912	684			100,80		85,68	997,68	684	1209,64
Угольная башня №1	660		0,7/1	396	396	38,40		32,64		428,64	396	583,57	
Угольная башня №2	780			468	468	38,40		32,64		500,64	468	685,32	
Угольная башня №3	1200			720	720	0,02	51,20	0,9	46,08	766,08	720	1051,32	
Переворачивающая станция №2	350			210	210		640	0,016	10,24	0,6	6,14	216,14	210
Территория комбината	—	—	—	—	—	239200	0,0002	38,7	1	38,27	38,27	—	76,31
ИТОГО	14914	—	—	9516	7861,8	93652,00		1479	—	1175	10691,38	7861,8	13317

На этапе проектирования системы электроснабжения ремонтно-механического цеха сталеплавильного комбината выбор трансформаторов для цеховых подстанций (ТП) еще не произведен. В связи с этим точные значения потерь мощности в трансформаторах определить невозможно, и для предварительных расчетов используются приближенные методы. Эти методы основаны на установленных соотношениях, которые позволяют оценить потери с приемлемой точностью на стадии разработки проекта, до окончательного выбора оборудования:

$$\begin{aligned}\Delta P_T &= 0,02 \cdot S_P^H = 0,02 \cdot 13317 = 266,3 \text{ кВт}, \\ \Delta Q_T &= 0,1 \cdot S_P^H = 0,1 \cdot 13317 = 1332 \text{ кВар}, \\ \Delta P_L &= 0,03 \cdot S_P^H = 0,03 \cdot 13317 = 299,5 \text{ кВт}, \\ S_P^H &= \sqrt{(\sum P_P^H + \sum P_{po})^2 + \sum Q_P^{H^2}}, \\ S_P^H &= \sqrt{(9516 + 1175)^2 + 7862^2} = 13317 \text{ кВА}.\end{aligned}\tag{16}$$

Выводы по разделу 3.

В третьем разделе ВКР были проведены расчеты электрических нагрузок сталеплавильного комбината в целом, что позволило установить совокупную потребляемую мощность предприятия с учетом всех производственных и вспомогательных подразделений. Анализ состава электроприемников, их режимов работы, а также коэффициентов спроса и использования показал высокую энергоемкость комбината, обусловленную спецификой сталеплавильного производства. Эти результаты стали основой для выбора параметров питающих линий, трансформаторов и распределительных устройств, обеспечивая надежность и эффективность работы комбината. Таким образом, расчет нагрузок предприятия в целом создал фундамент для дальнейшей разработки СЭС, гарантирующей устойчивое функционирование всех его структурных элементов.

4 Картограмма нагрузок и центра электрических нагрузок

Важным этапом проектирования системы электроснабжения сталеплавильного комбината является разработка картограммы нагрузок и определение центра электрических нагрузок. Эти инструменты позволяют визуализировать распределение потребляемой мощности по территории предприятия и установить оптимальное расположение источников питания, что напрямую влияет на эффективность, надежность и экономичность энергоснабжения.

Раздел «Картограмма нагрузок и центра электрических нагрузок» направлен на создание схематического изображения распределения электрических нагрузок по производственным и вспомогательным помещениям комбината, а также на вычисление координат центра электрических нагрузок. Это необходимо для рационального размещения цеховых подстанций, минимизации потерь электроэнергии в сетях и оптимизации протяженности кабельных линий. Расчеты будут базироваться на данных о потребляемой мощности электроприемников, их расположении и режимах работы, полученных в предыдущих разделах. Результаты данного анализа станут основой для дальнейшего выбора схемы электроснабжения и проектирования распределительной сети, обеспечивая сбалансированное энергоснабжение всех подразделений комбината.

«Радиусы кругов рассчитываются по формулам:

$$r_i = \sqrt{\frac{S_{pi}}{\pi \cdot m}}, \quad (17)$$

где m – выбираемый масштаб, принимаем $m=1$ кВА/мм.

Осветительная нагрузка представляется в виде секторов, углы которых определяются» [4]:

$$\alpha_i = \frac{360 \cdot P_{po}}{S_{pi}}. \quad (18)$$

Результаты расчёта сведены в таблицу 6.

Таблица 6 – Расчетные данные для построения картограммы нагрузок

№ цеха на ген. плане	S _p , кВА	P _{p.o} , кВт	r, мм	α, град	X, мм	Y, мм	S _p · X, кВА·мм	S _p · Y, кВА·мм
1	373,45	39,31	14	22	112	154	72170	99234
2	1341,82	215,04	10	208	48		17859	57298
3	751,00	75,48	22	18	238		366217	236964
4	538,52	75,48	17	30	252	78	229458	71022
5	2863,73	122,40	19	39	125		142387	88849
6	1300,00	122,40	15	59	76	42	56170	31041
7	249,97	61,20	11	65	37		15108	17150
8	239,31	74,21	22	17	158	24	240817	36579
9	408,35	74,21	13	41	175	154	94643	83286
10	1419,44	74,21	18	24	194	24	211754	26196
11	1209,64	85,68	7	202			29579	3659
12	583,57	32,64	15	17			136242	16854
13	685,32	32,64	6	92			24641	3048
14	1051,32	46,08	9	57			56062	6935
15	301,36	6,14	6	20	252	28	27846	3094
Итого	13317	1175	–	–	–	–	1939244	973307

«Координаты центра электрических нагрузок:

$$x_0 = \frac{\sum S_{pi} x_i}{\sum S_{pi}}, \quad (19)$$

$$x_0 = \frac{1939244}{10290} = 188,$$

$$y_0 = \frac{\sum S_{pi} y_i}{\sum S_{pi}}, \quad (20)$$

$$y_0 = \frac{973307}{10290} = 94.$$

Картограмма электрических нагрузок приведена на рисунке 3» [4].

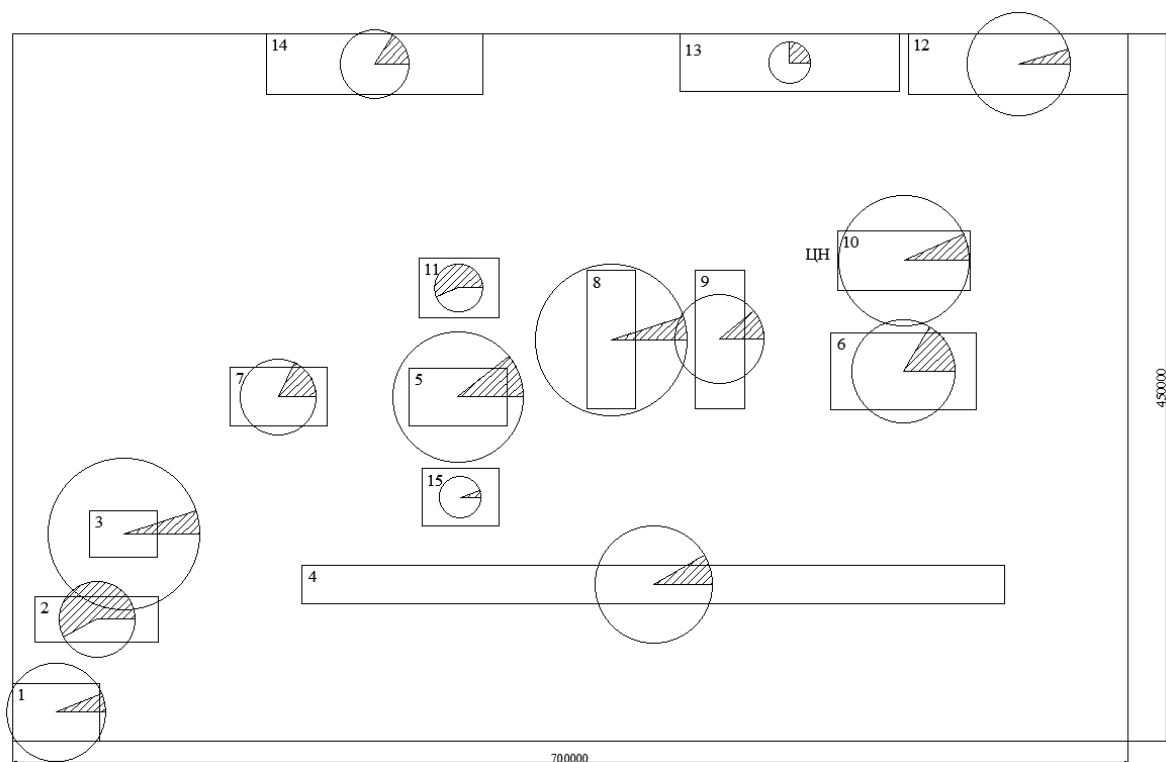


Рисунок 3 – Картограмма электрических нагрузок

Выводы по разделу 4.

В четвертом разделе ВКР разработана картограмма нагрузок сталеплавильного комбината. Определен центр электрических нагрузок, что позволило установить оптимальную точку для размещения источников питания. Проведенный анализ показал неравномерность распределения нагрузок, связанную с высокой энергоемкостью основного производства и меньшей потребностью вспомогательных подразделений.

Результаты разработки картограммы и вычисления центра нагрузок подтвердили необходимость учета топологии предприятия при проектировании системы электроснабжения. Определение центра электрических нагрузок способствовало минимизации протяженности кабельных линий и снижению потерь электроэнергии в распределительных сетях. Эти данные стали важным этапом для выбора местоположения цеховых подстанций и разработки рациональной схемы энергоснабжения, обеспечивая сбалансированное распределение мощности и повышение общей эффективности работы комбината.

5 Выбор числа и мощности цеховых трансформаторов

Одним из ключевых этапов проектирования системы электроснабжения сталеплавильного комбината является выбор числа и мощности цеховых трансформаторов, которые обеспечивают преобразование и распределение электроэнергии между производственными и вспомогательными подразделениями предприятия. От правильности этого выбора зависят надежность энергоснабжения, минимизация потерь электроэнергии, а также экономическая эффективность эксплуатации системы. В рамках данной выпускной квалификационной работы, посвященной электроснабжению группы цехов сталеплавильного комбината, данный раздел играет важную роль в создании сбалансированной и устойчивой энергетической инфраструктуры.

«Раздел направлен на определение оптимальных параметров трансформаторного оборудования на основе ранее рассчитанных электрических нагрузок предприятия и анализа их распределения. В процессе выбора будут учтены такие факторы» [8], как суммарная мощность электроприемников, режимы их работы, коэффициенты загрузки, а также требования к резервированию мощности для обеспечения бесперебойности производства. Итоговые решения позволят сформировать основу для проектирования цеховых подстанций, гарантируя соответствие системы энергоснабжения технологическим потребностям комбината и нормативам эксплуатации.

«Номинальная мощность определяется плотностью нагрузки и выбирается, как правило, одинаковой для всей группы цеховых трансформаторов.

Удельная плотность нагрузки:

$$\sigma = \frac{S_p^H}{F_{\text{цехов}}}, \quad (21)$$

$$\sigma = \frac{13317}{53652} = 0,25 \text{ кВа/м}^2.$$

Принимаем номинальную мощность трансформатора $S_{\text{ном}} = 1600 \text{ кВа}$.
 Расчетное число трансформаторов цеховых ТП» [8]:

$$N_0 = \frac{\Sigma(P_p^H + P_{po})}{\beta_T S_{\text{нтр}}}, \quad (22)$$

$$N_0 = \frac{9516 + 1175}{0,7 \cdot 1600} = 9,54.$$

«Принимаем $N=10$

Активная нагрузка на один трансформатор:

$$P_1 = \frac{P_p + P_{po}}{N}, \quad (23)$$

$$P_1 = \frac{9516 + 1175}{10} = 1069,1 \text{ кВт.}$$

Количество трансформаторов в цехе:

$$n_1 = \frac{(P_p + P_{po})_i}{P_1}. \quad (24)$$

Итак, по цехам, соответственно номеру» [8]:

$$n_1 = \frac{312,31}{1069,1} = 0,29; n_6 = \frac{1082,4}{1069,1} = 1,01; n_{11} = \frac{997,68}{1069,1} = 0,93$$

$$n_2 = \frac{1247,04}{1069,1} = 1,17; n_7 = \frac{214,7}{1069,1} = 0,2; n_{12} = \frac{428,64}{1069,1} = 0,4;$$

$$n_3 = \frac{595,48}{1069,1} = 0,56; n_8 = \frac{202,21}{1069,1} = 0,19; n_{13} = \frac{500,64}{1069,1} = 0,47;$$

$$n_4 = \frac{435,48}{1069,1} = 0,41; n_9 = \frac{290,21}{1069,1} = 0,27; n_{14} = \frac{766,08}{1069,1} = 0,72;$$

$$n_5 = \frac{2202,4}{1069,1} = 2,06; n_{10} = \frac{1161,71}{1069,1} = 1,09; n_{15} = \frac{216,14}{1069,1} = 0,2;$$

Таким образом, получим следующую схему электроснабжения цехов, приведенную на рисунке 4.

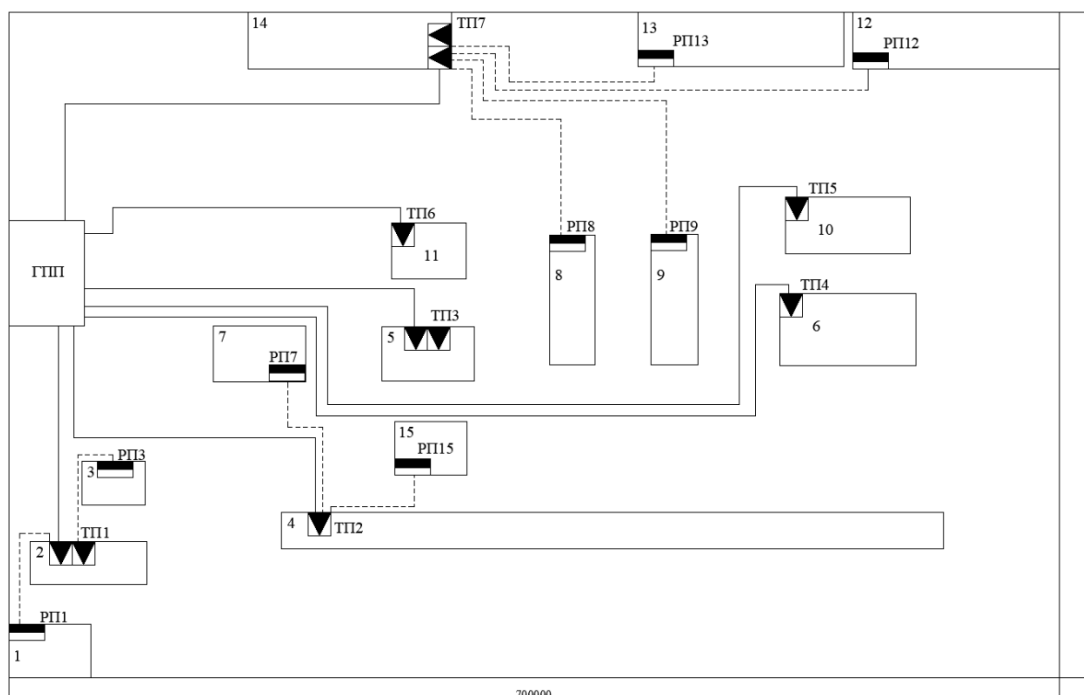


Рисунок 4 – Схема питания цеховых ТП и высоковольтных электроприемников

«Кабели 10 кВ прокладываются в траншеях, в земле.

Распределение электрических нагрузок по пунктам питания приведено в таблице 7» [8].

Таблица 7 – Распределение электрических нагрузок по пунктам питания

Наименование пункта питания	Потребители электроэнергии	Месторасположение пунктов питания на генплане
ТП–2	Цех №1, №2, №3	Цех №2
ТП–4	Цеха №4, №7, №15	Цех №4
ТП–5	Цех №5	Цех №5
ТП–6	Цеха №6	Цех №6
ТП–10	Цеха №10	Цех №10
ТП–11	Цеха №11	Цех №11
ТП–14	Цеха №12,13, 14	Цех №14

Выводы по разделу 5.

В пятом разделе ВКР» [8] выполнен выбор числа и мощности цеховых трансформаторов для системы электроснабжения сталеплавильного комбината на основе данных о расчетных электрических нагрузках и их распределении по предприятию. Анализ суммарной мощности электроприемников, режимов их работы и коэффициентов загрузки позволил определить оптимальное количество трансформаторов и их номинальную мощность, обеспечивающих стабильное энергоснабжение всех производственных и вспомогательных подразделений. Учет требований к резервированию мощности подтвердил необходимость выбора трансформаторов с запасом, что гарантирует бесперебойность работы комбината даже при пиковых нагрузках или аварийных ситуациях.

Результаты подбора трансформаторов показали, что выбранные параметры соответствуют технологическим особенностям предприятия и позволяют минимизировать потери электроэнергии в процессе преобразования и распределения. Определенное число и мощность трансформаторов стали основой для дальнейшего проектирования цеховых подстанций, обеспечивая рациональное использование ресурсов и экономическую эффективность системы. Таким образом, проведенные расчеты и обоснованный выбор оборудования создали надежный фундамент для реализации устойчивой и эффективной системы электроснабжения сталеплавильного комбината.

6 Схема внешнего электроснабжения

Разработка схемы внешнего электроснабжения сталеплавильного комбината является важным этапом проектирования, обеспечивающим подключение предприятия к энергосистеме и надежную передачу электроэнергии от внешнего источника к главной понизительной подстанции (ГПП). Этот процесс требует тщательного выбора параметров питающей сети, чтобы гарантировать соответствие требованиям по мощности, устойчивости и безопасности. В рамках данной выпускной квалификационной работы, посвященной электроснабжению группы цехов сталеплавильного комбината, данный раздел играет ключевую роль в формировании общей структуры энергоснабжения.

Раздел «Схема внешнего электроснабжения» посвящен обоснованию и выбору напряжения питающей воздушной линии (ВЛ), определению марки и сечения проводов этой линии, а также подбору силового трансформатора главной понизительной подстанции. Решения будут основываться на данных о расчетных нагрузках предприятия, удаленности от источника питания, а также на технических и экономических критериях. Итогом станет разработка схемы, обеспечивающей эффективную передачу электроэнергии с минимальными потерями и соответствием нормативам, что создаст основу для дальнейшего распределения энергии по цехам комбината.

«Номинальные напряжения сети выбираются в зависимости от передаваемой мощности и дальности передачи. Для предварительного выбора номинального напряжения можно использовать эмпирическую формулу Г.А. Илларионова:

$$U_H = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{l} + \frac{2500}{P}}}, \quad (25)$$
$$U_H = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{13} + \frac{2500}{10,69}}} = 60,6 \text{ кВ.}$$

Принимаем $U_H = 110$ кВ.

Определим номинальную мощность трансформаторов ГПП:

$$S_{н.тр} = \frac{S_{р.гпп}}{2 \cdot \beta_T}, \quad (26)$$

где $S_{р.гпп}$ – расчётная мощность ГПП предприятия, кВА» [13],

β_T – «коэффициент загрузки трансформатора, $\beta_T = 0,7$,

$$S_{н.тр} = \frac{13317}{2 \cdot 0,7} = 9512.$$

Округляется до ближайшего большего значения $S_{ном} = 10000$ кВА

Принимается трансформатор типа ТДН – 10000/110/10 У1» [24].

«Выбор сечения проводов воздушных линий, питающих трансформаторы ГПП. Питающие линии выполняются проводом марки АС, сечение которого выбирается по нагреву расчетным током.

Расчетный ток на одну линию» [8]:

$$I_p = \frac{S_{р.гпп}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_H}, \quad (27)$$
$$I_p = \frac{2 \cdot 1000}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 110} = 52,5 \text{ A.}$$

«В аварийном режиме:

$$I_p = \frac{S_{р.гпп}}{\sqrt{3} \cdot U_H}, \quad (28)$$
$$I_p = \frac{2 \cdot 10000}{\sqrt{3} \cdot 110} = 105 \text{ A}$$

Экономическое сечение:

$$S_{\text{ЭК}} = \frac{I_p}{i_{\text{ЭК}}}, \quad (29)$$

где $j_{\text{ЭК}}$ – нормированное значение экономической плотности тока при

$$T_m > 5000 \text{ ч, } j_{\text{ЭК}} = 1 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2} \gg [14].$$

$$S_{\text{ЭК}} = \frac{52,5}{1} = 52,5 \text{ мм}^2.$$

«Округлив расчетную величину сечения до ближайшей стандартной, получим 70 мм^2 , но по условиям ограничений потерь на корону для 110 кВ минимальное сечение – 70 мм^2 , поэтому принимаем сечение питающих линий 70 мм^2 . Для АС – 70 допустимый ток $I_{\text{доп}} = 265 \text{ А}$.

Для выбранного сечения выполним необходимые проверки.

По послеаварийному току, когда одна из линий повреждена или отключена:

$$1,3 \cdot 265 = 344,5 \text{ А} > 105 \text{ А};$$

следовательно, выбранное сечение эту проверку проходит.

Проверка по коронированию не производится» [8].

«По механической прочности минимальное сечение $F_{\text{min}} = 25 \text{ мм}^2$ что меньше выбранного

Проверка по допустимой потере напряжения. Допустимая длина питающей линии:

$$L_{\text{доп}} = L_{\Delta U 1\%} \cdot \Delta U_{\text{доп}} \% \cdot \frac{I_{\text{доп}}}{I_p} \geq L_{\text{факт}}, \quad (30)$$

где $L_{\Delta U 1\%}$ – длина линии при полной нагрузке, на которой потеря напряжения равна 1 %, принимается $L_{\Delta U 1\%} = 5,1 \text{ км}$ » [9],

$\Delta U_{\text{доп}}$ – «допустимая потеря напряжения в нормальном режиме,
 $\Delta U_{\text{доп}}\% = 5\%$.

$$L_{\text{доп}} = 5,1 \cdot 5\% \cdot \frac{265}{50,827} = 132,951 \text{ км} \geq L_{\text{факт}} = 13 \text{ км},$$

следовательно, выбранное сечение проходит и эту проверку» [8].

Выводы по разделу 6

«В шестом разделе ВКР разработана схема внешнего электроснабжения комбината. Определено, что электроснабжение завода осуществляется от подстанции энергосистемы по двум воздушным линиям напряжением 110 кВ, выполненным проводом марки АС–70/11.

ГПП размещена на территории предприятия с учетом особенностей расположения цехов, что привело к ее смещению относительно центра электрических нагрузок. Для трансформации напряжения на ГПП выбраны два двухобмоточных силовых трансформатора типа ТДН–10000/110/10 кВ» [8], которые гарантируют достаточную мощность и резервирование для бесперебойного энергоснабжения. Принятые решения по выбору напряжения питающей ВЛ, марки и сечения проводов, а также параметров трансформаторов обеспечивают эффективную передачу электроэнергии с минимальными потерями и создают надежную основу для распределения энергии по цехам комбината, соответствуя техническим и экономическим требованиям проекта.

7 Схема внутризаводской распределительной сети 10 кВ

После получения электроэнергии от внешней энергосистемы через главную понизительную подстанцию (ГПП) важным этапом проектирования системы электроснабжения сталеплавильного комбината становится разработка внутризаводской распределительной сети. Эта сеть обеспечивает передачу электроэнергии от ГПП к цеховым трансформаторным подстанциям (ТП), снабжающим производственные и вспомогательные подразделения предприятия. От грамотного проектирования распределительной сети напряжением 10 кВ зависят надежность энергоснабжения, минимизация потерь и оптимальное распределение мощности по территории комбината. В рамках данной выпускной квалификационной работы, посвященной электроснабжению группы цехов, этот раздел занимает центральное место в создании целостной системы энергоснабжения.

«Раздел посвящен разработке конфигурации сети, выбору типа линий, определению их сечений и трассировки с учетом расположения цехов и центра электрических нагрузок» [18]. Основой для проектирования станут данные о расчетных нагрузках, полученные ранее, а также требования к резервированию и устойчивости сети. Результаты работы позволят обеспечить эффективное распределение электроэнергии от ГПП к цеховым подстанциям, создавая условия для стабильной работы всего сталеплавильного комбината.

«Распределительная сеть 10 кВ выполняется трехжильными кабелями с алюминиевыми жилами, с бумажной изоляцией, с прокладкой в траншеях.

Выбор сечения кабельных линий производится по экономической плотности тока.

Схема внутризаводской распределительной сети 10 кВ представлена на рисунке 5» [18].

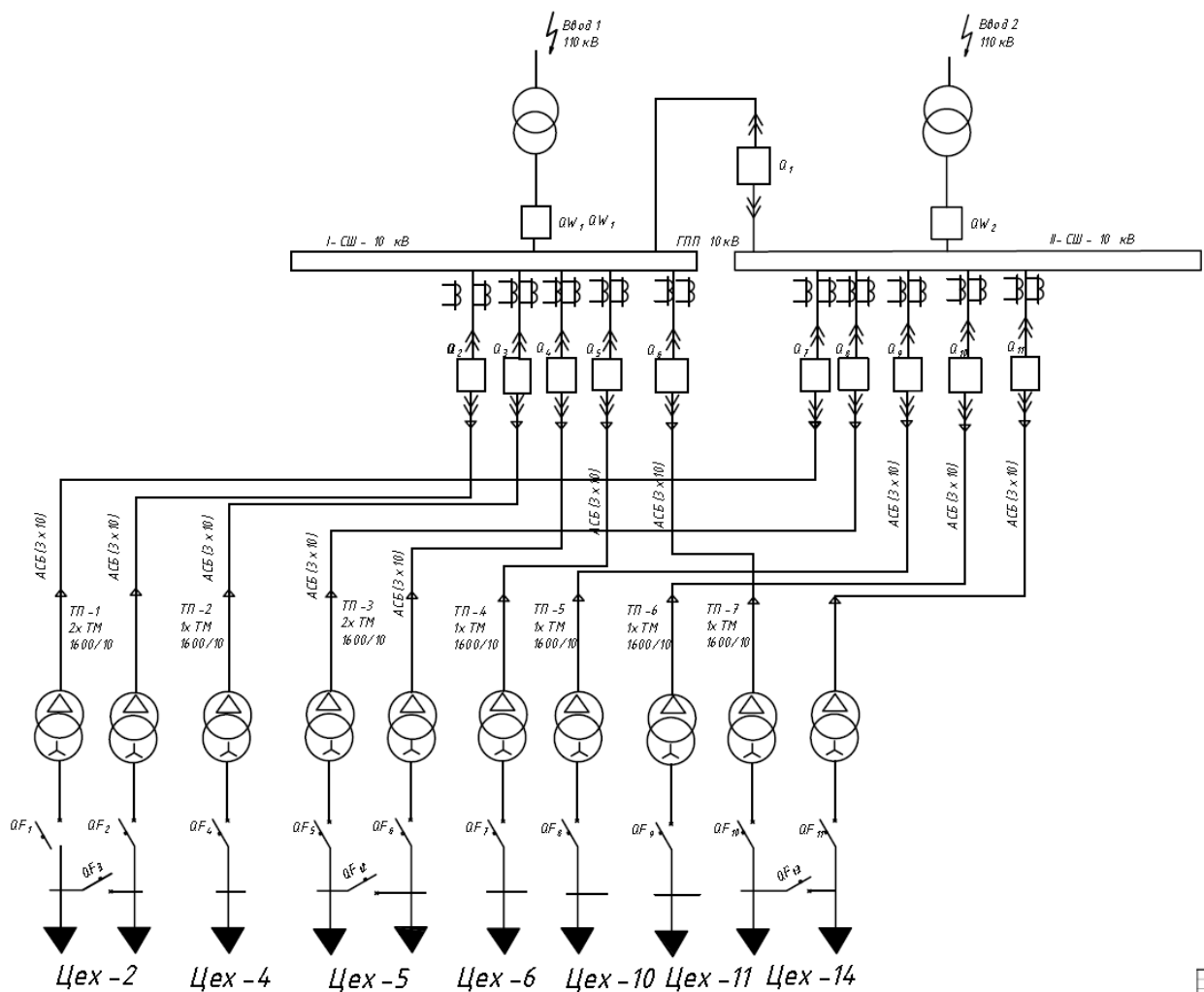


Рисунок 5 – «Схема внутриводской распределительной сети 10 кВ

КЛ от ГПП до ТП-1.

Рассматриваются две параллельные линии, идущие с разных секций ГПП до каждого трансформатора ТП-1.

Расчетный ток на одну линию» [18]:

$$I_p = \frac{S_p^H}{2\sqrt{3} \cdot U_H}, \quad (31)$$

$$I_p = \frac{2 \cdot 1600}{2\sqrt{3} \cdot 10} = 92,376 \text{ A}$$

$$S_{ЭК} = \frac{I_p}{j_{ЭК}}, \quad (32)$$

$$S_{ЭК} = \frac{92,376}{1,2} = 76,376 \text{ A}$$

Принимается $S = 70 \text{ мм}^2$, $I_{\text{доп}} = 165 \text{ А}$.

С учетом прокладки:

$$I'_{\text{доп}} = k \cdot I_{\text{доп}}, \quad (33)$$

где k – коэффициент, учитывающий прокладку кабеля, так как расстояние между кабелями – 300 мм, то $k = 0,87$ [14],

$I_{\text{доп}}$ – допустимый ток, А,

$$I'_{\text{доп}} = 0,87 \cdot 165 = 143,55 \text{ А}.$$

«Проверка выбранного сечения по расчетному току:

$$I_p \leq I'_{\text{доп}}, \quad (34)$$

$$92,376 \text{ А} \leq 143,55 \text{ А}.$$

Проверка выбранного сечения по послеаварийному току:

$$I_{n/\text{ав}} \leq 1,3 \cdot I'_{\text{доп}}, \quad (35)$$

$$2 \cdot 92,376 = 184,752 \text{ А} \leq 1,3 \cdot 143,550 = 186,615 \text{ А}.$$

Таким образом, выбранное сечение проходит проверки.

Выбран кабель 2×АСБ (3×70).

КЛ от РУ–2 до ТП–2.

Рассматривается одна линия.

Расчетный ток» [8]:

$$I_p = \frac{S_p^H}{\sqrt{3} \cdot U_H}, \quad (36)$$

$$I_p = \frac{2 \cdot 1600}{\sqrt{3} \cdot 10} = 92,376 \text{ А},$$

$$S_{\text{эк}} = \frac{I_p}{j_{\text{эк}}}, \quad (37)$$

$$S_{\text{эк}} = \frac{92,376}{1,2} = 76,376 \text{ А.}$$

Принимается $S = 70 \text{ мм}^2$, $I_{\text{доп}} = 165 \text{ А}$.

«С учетом прокладки:

$$I'_{\text{доп}} = k \cdot I_{\text{доп}}, \quad (38)$$

где k – коэффициент, учитывающий прокладку кабеля, так как расстояние между кабелями – 100 мм, то $k = 1,0$ [14],

$I_{\text{доп}}$ – допустимый ток, А,

$$I'_{\text{доп}} = 1 \cdot 165 = 165 \text{ А.}$$

Проверка выбранного сечения по расчетному току выполняется по формуле» [8]:

$$I_p \leq I'_{\text{доп}},$$

$$92,376 \text{ А} \leq 165 \text{ А.}$$

«Проверка по послеаварийному току не производится, так как линия от РУ–2 до трансформаторной подстанции ТП–2 – одноцепная, и в случае аварии электроснабжение прекращается. Таким образом, выбранное сечение проходит проверки.

Выбран кабель АСБ (3×70).

Выбор остальных кабельных линий выполняется аналогично. Выбор кабельных линий распределительной сети 10 кВ приведён в таблице 8» [18].

Таблица 8 – Выбор кабельных линий распределительной сети 10 кВ

№ лин ии	Назначение линии	Кол- во лин- ий	Расчетная нагрузка на 1 линию		Дли на ли нии, км	Способ прокладки	Поп равко эфпр окл	Марка и сече ние кабеля	Доп. нагр. на 1 кабель	
			I_p, A	$I_{п/ав}, A$					I', A доп	$1,3 I', A$ доп
Л1	ГПП–ТП–2	2	92,4	184,8	0,5	траншея	0,85	2×АСБ (3×70)	148,5	193
Л2	ГПП–ТП–4	1		–	0,120			1×АСБ (3×70)	148,5	193
Л3	ГПП–ТП–5	2		184,8	0,160			2×АСБ (3×70)	143,6	186,6
Л4	ГПП–ТП–6	1		–	0,205			1×АСБ (3×70)	148,5	193
Л5	ГПП–ТП–10	1		–	0,105				143,6	186,6
Л6	ГПП–ТП–11	1		–	0,210				148,5	193
Л7	ГПП–ТП–14	2		184,8	0,08			2×АСБ (3×70)	143,6	186,6

Выводы по разделу 7.

В седьмом разделе ВКР разработана схема внутриводской распределительной сети напряжением 10 кВ, обеспечивающая передачу электроэнергии от главной понизительной подстанции (ГПП) к цеховым трансформаторным подстанциям (ТП) сталеплавильного комбината. На основе анализа расчетных нагрузок, расположения цехов и центра электрических нагрузок была определена оптимальная конфигурация сети, включающая выбор типа линий и их параметров. Для реализации схемы выбраны кабели марки АСБ с сечением 3х70 мм², которые обладают достаточной пропускной способностью, устойчивостью к эксплуатационным условиям и соответствуют требованиям по надежности и долговечности.

Принятая схема сети учитывает необходимость резервирования и минимизации потерь электроэнергии, а также рациональную трассировку линий с учетом топологии предприятия. Использование кабелей АСБ 3х70 обеспечивает эффективное распределение мощности от ГПП к цеховым ТП, гарантируя стабильное энергоснабжение всех подразделений комбината.

8 Расчет токов КЗ выше 1000 В и выбор коммутационных аппаратов

Обеспечение надежности и безопасности системы электроснабжения сталеплавильного комбината требует тщательного анализа аварийных режимов, в частности, коротких замыканий (КЗ), которые могут возникать в сетях с напряжением выше 1000 В. Расчет токов КЗ и проверка оборудования на устойчивость к ним являются неотъемлемой частью проектирования, позволяя предотвратить повреждение элементов сети и обеспечить бесперебойную работу предприятия. В рамках данной выпускной квалификационной работы, посвященной электроснабжению группы цехов сталеплавильного комбината, особое внимание уделяется внутривародской распределительной сети 10 кВ, связывающей главную понизительную подстанцию (ГПП) с цеховыми трансформаторными подстанциями (ТП).

Данный раздел направлен на определение максимальных значений токов короткого замыкания в сети 10 кВ, а также на проверку термической стойкости выбранных кабелей к воздействию этих токов. Расчеты будут основываться на параметрах сети, характеристиках источников питания и выбранного оборудования. Результаты позволят подтвердить соответствие принятых решений требованиям нормативных документов и гарантировать устойчивость системы электроснабжения к аварийным ситуациям, обеспечивая безопасность и надежность эксплуатации комбината.

«В качестве примера рассмотрим участок система – ГПП – РУ–1 – ТП–

1. При расчетах принимаем следующие допущения:

- активные сопротивления линий и трансформаторов равны нулю, так как они пренебрежимо малы по сравнению с реактивными,
- так как мощность системы не задана, то подразумеваем, что $S_c = \infty$, откуда $x_c = 0$.

Однолинейная расчетная схема сети приведена на рисунке 6» [15].

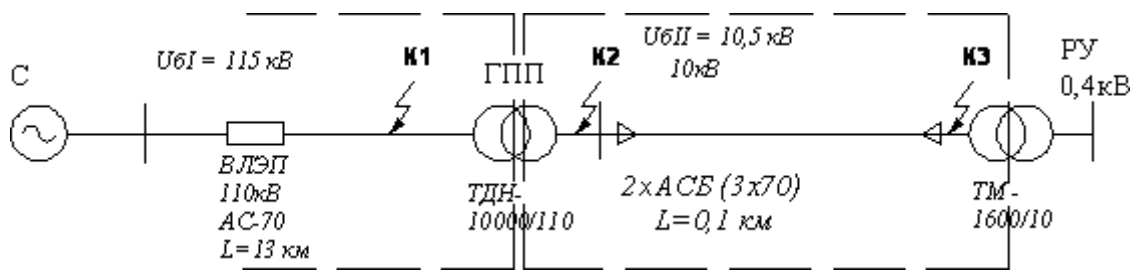


Рисунок 6 – Однолинейная расчетная схема сети

«Упрощенная однолинейная схема замещения приведена на рисунке 7.

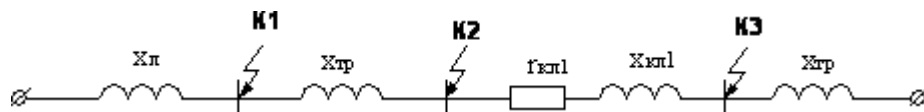


Рисунок 7 – Упрощенная однолинейная схема замещения

Расчет ведем в относительных единицах.

Принимаем базисные единицы» [15]:

$$S_6 = 100 \text{ МВА}, U_{6I} = 115 \text{ кВ}, U_{6II} = 10,5 \text{ кВ}.$$

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{6I}}, \quad (39)$$

$$I_{6I} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,502 \text{ кА},$$

$$I_{6II} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5,5 \text{ кА}.$$

Рассмотрим точку К1:

Сопротивление короткого замыкания [15]:

$$Z_{\Sigma k1} = x_{л1} = x_0 \cdot I \cdot \frac{S_6}{U_{II}^2}, \quad (40)$$

$$Z_{\Sigma k1} = 0,4 \cdot 13 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,039.$$

Тогда действующее значение тока К3 [15]:

$$I_{K1} = \frac{I_{61}}{Z_{\Sigma k1}}, \quad (41)$$

$$I_{K1} = \frac{0,502}{0,039} = 12,872 \text{ кА.}$$

«Ударный ток:

$$I_{уд1} = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_{K1}, \quad (42)$$

$$I_{уд1} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 12,872 = 32,767 \text{ кА}$$

Мощность короткого замыкания:

$$S_{K1} = \frac{S_6}{Z_{\Sigma k1}}, \quad (43)$$

$$S_{K1} = \frac{100}{0,039} = 2564,103 \text{ МВА.}$$

Рассмотрим точку К2.

«Сопротивление короткого замыкания» [15]:

$$Z_{\Sigma k2} = Z_{\Sigma k1} + \frac{u_K \% \cdot S_B}{100 \cdot S_{H.TP}}, \quad (44)$$

$$Z_{\Sigma k2} = 0,039 + \frac{10,5 \cdot 100}{100 \cdot 16} = 0,695.$$

«Тогда действующее значение тока КЗ:

$$I_{K2} = \frac{I_{6II}}{Z_{\Sigma k2}}, \quad (45)$$

$$I_{K2} = \frac{5,5}{0,695} = 7,914 \text{ кА.}$$

Ударный ток:

$$I_{уд2} = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_{к2}, \quad (46)$$

$$I_{уд2} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 7,914 = 20,145 \text{ кА.}$$

Мощность короткого замыкания:

$$S_{к2} = \frac{S_6}{Z_{\Sigma к2}}, \quad (47)$$

$$S_{к2} = \frac{100}{0,695} = 143,885 \text{ МВА}$$

Рассмотрим точку КЗ» [15].

«Сопротивление короткого замыкания:

$$Z_{\Sigma к3} = Z_{\Sigma к2} + Z_{\Sigma кл2} = Z_{\Sigma к2} + x_0 \cdot I \cdot \frac{S_6}{U_{6II}^2}, \quad (48)$$

$$Z_{\Sigma к3} = 0,695 + 0,08 \cdot 0,049 \cdot \frac{100}{10,5^2} = 0,695.$$

Тогда действующее значение тока КЗ:

$$I_{к3} = \frac{I_{6II}}{Z_{\Sigma к3}}, \quad (49)$$

$$I_{к3} = \frac{5,5}{0,699} = 7,873 \text{ кА.}$$

Ударный ток:

$$I_{уд3} = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_{к3}, \quad (50)$$

$$I_{уд3} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 7,873 = 20,042 \text{ кА.}$$

Мощность короткого замыкания» [15]:

$$S_{кз} = \frac{S_6}{x_{\Sigma кз}}, \quad (51)$$

$$S_{кз} = \frac{100}{0,699} = 143,062 \text{ МВА.}$$

Результаты расчета токов КЗ сведены в таблицу 9.

Таблица 9 – Результаты расчета токов КЗ

Расчетные точки		К1	К2	К3
Токи КЗ	I_{∞} , кА	12,872	7,914	7,873
	i_y , кА	32,767	20,145	20,042

«Используя полученные значения токов короткого замыкания, проверим принятые ранее сечение кабелей на термическую стойкость при КЗ в начале линии. Термически стойкое сечение» [11]:

$$F_{min} = \frac{\sqrt{B_K}}{C_T} \quad (52)$$

где C_T – коэффициент, зависящий от допустимой температуры при КЗ и материала проводника; принимаем равным 85 ($A \cdot c^{-1}/mm^2$).

B_K – тепловой импульс тока КЗ, $A^2 \cdot c$;

$$B_K = I_k^2 + (t_{отк} + T_a), \quad (53)$$

где T_a – постоянная затухания апериодической составляющей тока КЗ, принимаем равной 0,01 с,

$t_{отк}$ – время отключения КЗ, с;

$$t_{отк} = t_3 + t_b, \quad (54)$$

где t_3 – время действия основной защиты, принимаем равной 1,2 с.

t_b – полное время отключения выключателя; учитывая, что в ЗРУ ГПП установлены выключатели типа ВМЭ–10Э, у которого $t_b = 12$ с» [11].

Проверяется линия ГПП – РУ–1:

$$\begin{aligned} I_{k2} &= 7,914 \text{ кА}, \\ (t_{отк} + T_a) &= 1,2 + 0,12 + 0,01 = 1,33 \text{ с}, \\ F_{min} &= \frac{I_{k2} \sqrt{t_{отк} + T_a}}{C_T}, \\ F_{min} &= \frac{7,914 \cdot 10^3 \sqrt{1,33}}{85} = 107,375 \text{ мм}^2. \end{aligned} \quad (55)$$

«Полученное значение минимального сечения показывает, что выбранный кабель, для данного участка распределительной сети АСБ – 4×(3×120) проходит по термической стойкости к току КЗ:

$$\begin{aligned} F &\geq F_{min}, \\ 2 \times 120 \text{ мм}^2 &> 107,375 \text{ мм}^2. \end{aligned} \quad (56)$$

Линия РУ–1 – ТП1:

$$\begin{aligned} I_{k3} &= 7,873 \text{ кА} \\ F_{min} &= \frac{7,873 \cdot 10^3 \sqrt{1,33}}{85} = 106,819 \text{ мм}^2. \end{aligned}$$

Полученное значение минимального сечения показывает, что выбранный кабель, для данного участка распределительной сети 10 (кВ) АСБ – 2×(3×70) не проходит по термической стойкости к току КЗ: $F < F_{min}$ ($70 < 106,819 \text{ мм}^2$). Поэтому для этого участка принимаем ближайшее большее к минимальному сечение: $F = 120 \text{ мм}^2$ » [11].

Выводы по разделу 8

«В восьмом разделе ВКР выполнены расчеты токов КЗ в распределительной сети напряжением 10 кВ сталеплавильного комбината, а также проведена проверка термической стойкости выбранных кабелей к

воздействию этих токов. На основе анализа параметров сети и характеристик оборудования установлены максимальные значения токов КЗ» [11], что позволило оценить устойчивость кабелей марки АСБ $2 \times (3 \times 70)$ с сечением 70 мм^2 . Результаты показали, что «минимально допустимое сечение для обеспечения термической стойкости составляет $106,819 \text{ мм}^2$, что превышает сечение выбранного кабеля. Таким образом, кабель АСБ $2 \times (3 \times 70)$ не удовлетворяет требованиям по термической стойкости к токам КЗ для данного участка сети.

С учетом полученных данных было принято решение заменить кабель на ближайшее большее сечение, соответствующее требованиям. Для этого участка распределительной сети 10 кВ выбрано сечение» [11] 120 мм^2 , что гарантирует термическую устойчивость к расчетным токам короткого замыкания и соответствие нормативным стандартам. Данный выбор обеспечивает безопасность и надежность работы системы электроснабжения, предотвращая возможные повреждения кабелей в аварийных режимах и создавая основу для стабильной эксплуатации сталеплавильного комбината.

9 Выбор коммутационных аппаратов

Создание надежной и эффективной системы электроснабжения сталеплавильного комбината невозможно без правильного подбора коммутационных аппаратов, которые обеспечивают управление потоками электроэнергии, защиту сети от перегрузок и коротких замыканий, а также оперативное переключение в нормальных и аварийных режимах. Коммутационные аппараты являются ключевыми элементами системы электроснабжения предприятия и их выбор напрямую влияет на устойчивость и безопасность работы предприятия. В рамках данной выпускной квалификационной работы, посвященной электроснабжению группы цехов сталеплавильного комбината, этот раздел имеет важное значение для завершения проектирования системы.

Раздел «Выбор коммутационных аппаратов» «посвящен определению типов и характеристик коммутационного оборудования для сети напряжением 110 кВ и 10 кВ, включая выключатели, разъединители и другие устройства. Выбор будет основываться на результатах расчетов токов короткого замыкания, данных о нагрузках и параметрах сети» [25], а также на требованиях нормативных документов. Основной целью является обеспечение надежной коммутации, защиты оборудования и минимизации рисков аварийных ситуаций. Итоги данного раздела позволят сформировать завершенную схему распределительной сети, гарантирующую стабильное энергоснабжение всех подразделений комбината.

9.1 Выбор выключателей и разъединителей

«Выбор выключателей 10 кВ выполняется по следующим параметрам:

- по напряжению установки: $U_{уст} \leq U_{ном}$;
- по длительному току: $I_p \leq I_n$;
- по отключающей способности: $I_0 \leq I_{н.откл}$;

- по электродинамической стойкости: $i_y \leq i_{\text{дин}}$;
- по термической стойкости: $B_k \leq I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}}$ [25].

«Выбор выключателя 10 кВ, установленного на низкой стороне силового трансформатора ГПП, сведем в таблицу 10. Выбирается выключатель ВВТЭ–М–10–20 УЗ, характеристики которых приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Выбор выключателя на низкой стороне силового трансформатора ГПП

Расчетные данные	Каталожные данные выключателя ВВТЭ–М–10–20/1600
$U_{\text{уст}} = 10 \text{ кВ}$	$U_{\text{н}} = 10 \text{ кВ}$
$I_{\text{max}} = 1118 \text{ А}$	$I_{\text{н}} = 1600 \text{ А}$
$I_0 = 7,91 \text{ кА}$	$I_{\text{н.откл}} = 20 \text{ кА}$
$i_y = 20,14 \text{ кА}$	$i_y = 31,5 \text{ кА}$
$B_k = 61,1 \text{ кА}^2\text{с}$	$I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} = 1600 \text{ кА}^2\text{с}$

Выбранный нами выключатель удовлетворяет всем условиям» [20].

Со стороны 110 кВ применяется схема 110–4Н «Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий» [6]. «Выбор разъединителя 110 кВ осуществим по следующим условиям:

- по напряжению установки: $U_{\text{уст}} \leq U_{\text{н}}$;
- по длительному току: $I_p \leq I_{\text{н}}$;
- по электродинамической стойкости: $i_y \leq i_{\text{дин}}$;
- по термической стойкости: $B_k \leq I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}}$.

Выбор разъединителя сведем в таблицу 11. Выбираются выключатель ВГТ-110–40/2000 У1» [21] и «разъединитель РН-СЭЩ-110/1000 У1.

Таблица 11 – Выбор разъединителя 110 кВ

Расчетные данные	Каталожные данные	
	Выключатель ВГТ-110–40/2000 У1	Разъединитель РН-СЭЩ-110/1000 У1
$U_{\text{уст}} = 110 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} = 110 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} = 110 \text{ кВ}$
$I_{\text{max}} = 101 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 630 \text{ А}$
$i_y = 32,77 \text{ кА}$	$i_{\text{дин}} = 100 \text{ кА}$	$i_{\text{дин}} = 80 \text{ кА}$
$B_k = 10,9^2 \cdot 1,33 = 158 \text{ кА}^2\text{с}$	$I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} = 502 \cdot 4 = 10000 \text{ кА}^2\text{с}$	$I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} = 31,5^2 \cdot 4 = 3969 \text{ кА}^2\text{с}$

Выбранный нами разъединитель удовлетворяет всем условиям» [22].

9.2 Выбор трансформаторов тока

«Осуществляется выбор по следующим условиям:

- по напряжению установки: $U_{уст} \leq U_{ном}$;
- по длительному току: $I_{ном} \leq I_{ном}$; $I_{max} \leq I_{ном}$;
- по электродинамической стойкости: $i_y \leq i_{дин}$;
- по термической стойкости: $B_k \leq I_{тер}^2 \cdot t_{тер}$
- по вторичной нагрузке:

$$Z_2 \leq Z_{2ном}; \quad (57)$$

$$r_2 = Z_2 \leq Z_{2ном}, \quad (58)$$

где Z_2 – вторичная нагрузка трансформатора тока;

$Z_{2ном}$ – номинальная допустимая нагрузка трансформатора тока в выбранном классе точности» [25].

«Выбор трансформатора тока 110 кВ. Выбираем ТОГФ-110–150/5–У1» [23]. Выбор трансформатора тока сведем в таблицу 12.

Таблица 12 – Выбор трансформатора тока 110 кВ

Расчетные данные	Каталожные данные ТОГФ-110–150/5–У1
$U_{уст} = 110 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 110 \text{ кВ}$
$I_{max} = 101 \text{ А}$	$I_{ном} = 150 \text{ А}$
$i_y = 32,77 \text{ кА}$	$i_{дин} = 41 \text{ кА}$
$B_k = 158 \text{ кА}^2\text{с}$	$I_{тер}^2 \cdot t_{тер} = 8^2 \cdot 3 = 192 \text{ кА}^2\text{с}$
$r_2 = z_2 = 1,2 \text{ Ом}$	$z_2 = 1,2 \text{ Ом}$

Проверим выбранный трансформатор тока по вторичной нагрузке [25].

«Вторичная нагрузка трансформатора тока приведена в таблице 13.

Таблица 13 – Вторичная нагрузка трансформатора тока

Прибор	Тип	Нагрузка, ВА, фазы		
		А	В	С
Счетчик активной энергии	СА4-И 682	2,5	–	2,5
Счетчик реактивной энергии	СР4-И 682	2,5	–	2,5
Амперметр регистрирующий	Н-344	–	10	–
Ваттметр	Д-335	0,5	–	0,5
Итого	–	5,5	10	5,5

Наиболее загружен трансформатор тока фазы В [26]:

$$r_{\text{приб}} = \frac{S_{\text{приб}}}{I_2^2}, \quad (59)$$

$$r_{\text{приб}} = \frac{10}{25} = 0,4 \text{ Ом},$$

Допустимое сопротивление проводов» [26]:

$$r_{\text{приб}} = Z_{\text{приб}} - r_{\text{приб}} - r_k, \quad (60)$$

где $r_k = 0,1$ – «принимается при числе приборов, большем трех (сопротивление контактов).

$$r_{\text{приб}} = 1,2 - 0,4 - 0,1 = 0,7 \text{ Ом}.$$

Зная $r_{\text{приб}}$, можно определить сечение соединительных проводов [26]:

$$q = \frac{\rho \cdot l_{\text{расч}}}{r_{\text{пр}}}, \quad (61)$$

где $\rho = 0,0283$ – удельное сопротивление провода, Ом/м» [25].

$l_{\text{расч}}$ – «длина соединительных проводов, $l_{\text{расч}} = 150$ м,

$$q = \frac{0,283 \cdot 150}{0,7} = 6 \text{ мм}^2.$$

Принимаем контрольный кабель АКРВГ с жилами сечением 6 мм².
 Выбранный нами трансформатор тока удовлетворяет всем условиям выбора трансформатора тока 10 кВ.

Выбирается трансформатор тока типа ТШЛ–10–У3.

Выбор трансформатора тока 10 кВ сведем в таблицу 14» [16].

Таблица 14 – Выбор трансформатора тока 10 кВ

Расчетные данные	Каталожные данные ТШЛ–10–У3
$U_{уст} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$
$I_{max} = 1118 \text{ А}$	$I_{ном} = 2000 \text{ А}$
$i_y = 20,14 \text{ кА}$	$i_{дин} = 25 \text{ кА}$
$B_k = 61,1 \text{ кА}^2\text{с}$	$I_{терм}^2 \cdot t_{терм} = 3675 \text{ кА}^2\text{с}$
$r_2 = z_2 = 1,2 \text{ Ом}$	$z_2 = 1,2 \text{ Ом}$

«Проверка производится аналогично трансформатору тока 110 кВ ТОГФ-110.

Выбранный нами трансформатор тока удовлетворяет всем условиям.

9.3 Выбор трансформаторов напряжения

Осуществляем выбор трансформаторов напряжения по следующим условиям:

- по напряжению установки: $U_{уст} \leq U_{ном}$;
- по конструкции и схеме соединения обмоток;
- по классу точности;
- по вторичной нагрузке:

$$S_{2\Sigma} \leq S_{ном}; \quad (62)$$

где $S_{ном}$ – номинальная мощность в выбранном классе точности;

$S_{2\Sigma}$ – нагрузка всех измерительных приборов» [27].

«Выбираем трансформатор напряжения НТМК–10–71У3:

- $U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$;
- класс точности: 0,5;
- схема соединения обмоток: звезда/звезда/треугольник/0

Проверка по вторичной нагрузке:

$$S_{2\Sigma} = \sqrt{P_{\text{приб}}^2 + Q_{\text{приб}}^2}$$

Вторичная нагрузка трансформатора напряжения первой секции приведена в таблице 15» [27].

Таблица 15 – Вторичная нагрузка трансформатора напряжения

Прибор		Тип	Мощность одной обмотки.	Число обмоток	cos φ	sin φ	число приборов	Общая потребляемая мощность	
								P, Вт	Q,ВАр
Вольтметр (сборные шины)		Э–335	2	1	1	0	1	2	–
Счетчик активной энергии	Ввод 10 кВ от трансформатора	И–674	3 Вт	2	0,38	0,925	1	6	14,5
Счетчик реактивной энергии		И–673	3 Вт	2	0,38	0,925	1	6	14,5
Счетчик активной энергии	Линии 10 кВ	И–674	3 Вт	2	0,38	0,925	7	42	102
Счетчик реактивной энергии		И–673	3 Вт	2	0,4	0,93	7	42	102
Итого								96	233

«Вторичная нагрузка трансформатора напряжения первой секции:

$$S_{2\Sigma} = \sqrt{96^2 + 233^2} = 252 \text{ А.}$$

Трансформаторы, соединенные по схеме открытого треугольника, имеют мощность: $2 \cdot 75 = 150 \text{ ВА}$.

$S_{\text{ном}} < S_{2\Sigma}$, поэтому предусматриваем дополнительно установку двух трансформаторов НТМК–10–71У3, общей мощностью $2 \cdot 75 = 150$ ВА.

Полная мощность всех установленных на первой секции трансформаторов напряжения: $150 + 150 = 300$ ВА.

Таким образом, трансформаторы напряжения будут работать в выбранном классе точности 0,5.

Выбор трансформаторов напряжения второй секции шин производится аналогично.

Выбираем трансформаторы НТМК–10–71У3.

Выбранный нами трансформатор напряжения удовлетворяет всем условиям» [25].

Выводы по разделу 9

В девятом разделе ВКР осуществлен выбор коммутационных аппаратов для системы электроснабжения сталеплавильного комбината. На основе выполненных расчетов токов короткого замыкания, анализа нагрузок и параметров сети были определены типы и характеристики коммутационного оборудования, включая выключатели и разъединители. Подобранные аппараты соответствуют требованиям по отключающей способности, номинальному току и термической стойкости, что гарантирует их надежную работу в нормальных и аварийных режимах.

Результаты выбора подтвердили, что принятые решения обеспечивают эффективное управление потоками электроэнергии, защиту сети от перегрузок и коротких замыканий, а также оперативное переключение при необходимости. Применение выбранных коммутационных аппаратов позволяет минимизировать риски сбоев в системе электроснабжения и повысить общую устойчивость сети. Таким образом, данный раздел завершил формирование схемы распределительной сети, создав надежную основу для стабильного и безопасного энергоснабжения всех подразделений сталеплавильного комбината в соответствии с проектными и нормативными требованиями.

10 Построения эпюры отклонений напряжения для цепочки линий от шин ГПП наиболее удалённого от цеховой ТП электроприемника для режимов максимальной и минимальной нагрузок

Одним из важных аспектов проектирования системы электроснабжения сталеплавильного комбината является обеспечение стабильного уровня напряжения на всех участках сети, особенно для электроприемников, удаленных от источников питания. Отклонения напряжения могут существенно влиять на работу оборудования, вызывая снижение производительности или повреждения, что особенно критично для энергоемкого производства. В рамках данной выпускной квалификационной работы, посвященной электроснабжению группы цехов сталеплавильного комбината, данный раздел фокусируется на анализе «напряжения в распределительной сети от ГПП до наиболее удаленного электроприемника.

Раздел направлен на расчет и графическое представление изменений напряжения вдоль цепочки линий в двух ключевых режимах работы – при максимальной и минимальной нагрузке» [12]. Анализ будет основан на параметрах сети 10 кВ, характеристиках линий, трансформаторов и нагрузок, определенных в предыдущих разделах. Результаты позволят оценить соответствие отклонений напряжения допустимым нормам, выявить проблемные участки и предложить меры по их устранению, обеспечивая надежное энергоснабжение предприятия в любых условиях эксплуатации.

«Отклонение напряжения:

$$\Delta U_{ij} = \frac{P_{ij}R_{ij} + Q_{ij}X_{ij}}{10U_i^2}, \quad (63)$$

где ΔU_{ij} – отклонение напряжения на соответствующем участке сети, %;

P_{ij} – поток активной мощности, передаваемый по соответствующему участку сети, кВт;

Q_{ij} – поток реактивной мощности, передаваемый по соответствующему участку сети, квар;

U_i – напряжение в начале соответствующего участка сети, кВ;

R_{ij} – активное сопротивление линии соответствующего участка сети, мОм,

$$R_{ij} = \tau_{oij} \cdot l_{ij}, \quad (64)$$

где τ_{oij} – удельное активное сопротивление линии соответствующего участка сети, Ом/км, принимаемое, согласно справочной литературе,

l_{ij} – длина линии соответствующего участка сети, км» [12].

«Отклонение напряжения на цеховом трансформаторе, %:

$$\Delta U_m = \beta_m (U_a \cdot \cos \varphi + U_p \sin \varphi_2) + \frac{\beta_m^2}{100} (U_a \sin \varphi_2 - U_p \cos \varphi), \quad (65)$$

где U_a – активная составляющая напряжения КЗ цехового трансформатора, %;

β_m – фактический коэффициент загрузки цехового трансформатора,

$$\beta_m = \frac{S_{ij}}{S_{н.тр}}, \quad (66)$$

где S_{ij} – поток мощности, передаваемый через цеховой трансформатор, кВА,

$S_{н.тр}$ – номинальная мощность цехового трансформатора, кВА» [12].

«Активная составляющая напряжения КЗ цехового трансформатора:

$$U_a = \frac{\Delta P_{кз} \cdot 100\%}{S_{н.тр}}, \quad (67)$$

где $\Delta P_{\text{кз}}$ – потери активной мощности при КЗ, принимаем согласно [19], кВт» [12].

«Реактивная составляющая напряжения КЗ цехового трансформатора определяется по формуле:

$$U_p = \sqrt{U_k^2 - U_a^2}, \quad (68)$$

где U_k – напряжение короткого замыкания, %» [10].

«Коэффициент мощности для вторичной нагрузки цехового трансформатора:

$$\cos \varphi_2 = \frac{P_2}{S_2} = \frac{P - \Delta P_m}{\sqrt{(P - \Delta P_m)^2 + (Q - \Delta Q_m)^2}}, \quad (69)$$

где P – поток активной мощности, передаваемой через цеховой трансформатор, кВт,

Q – поток реактивной мощности, передаваемой через цеховой трансформатор, квар,

ΔP_m – потери активной мощности в цеховом трансформаторе, $\Delta P_m = 0,02S$, кВт,

ΔQ_σ – потери реактивной мощности в цеховом трансформаторе, $\Delta Q_\sigma = 0,1S$, квар;

$\sin \varphi_2$ – соответствующий $\cos \varphi_2$ синус для вторичной нагрузки цехового трансформатора.

Расчет максимального режима.

Участок 1–2» [10].

$$\Delta U_{12} = \frac{P_{12} \cdot R_{12} + Q_{12} x_{12}}{10 \cdot U^2}; \quad (70)$$

$$R_{12} = r_{012} \cdot L_{12}, \quad (71)$$

$$R_{12} = 0,48 \cdot 0,21 = 0,1 \text{ Ом},$$

$$X_{12} = x_{012} \cdot L_{12}, \quad (72)$$

$$X_{12} = 0,06 \cdot 0,21 = 0,0126 \text{ Ом},$$

$$P_{12} = P_{p12} + P_{p9} + P_{p11} + P_{p13}, \quad (73)$$

$$P_{12} = 632,7 + 78,9 + 207,6 + 214,972 = 1134,172 \text{ кВт},$$

$$Q_{12} = 891,827 \text{ квар},$$

$$\Delta U_{12} = \frac{1134,172 \cdot 0,1 + 891,827 \cdot 0,0126}{10 \cdot 10,5^2} = 0,1\%.$$

Или в именованных единицах:

$$\Delta U_{12} = 0,1 \cdot \frac{10500}{100} = 11,8 \text{ В},$$

$$U_2 = 10500 - 11,8 = 10488,2 \text{ В}.$$

Расчёт остальных участков максимального режима выполняется аналогично. Результаты расчёта сведены в таблицу 19.

«Расчет минимального режима.

Для определения потоков мощностей для минимального режима воспользуемся характерным суточным графиком электрических нагрузок для предприятий тяжелого машиностроения (ввиду отсутствия в литературе других схожих)» [12]:

$$P_{\min 12} = 0,75 \cdot P_{\max 12} = 0,75 \cdot 1134,172 = 850,63 \text{ кВт},$$

$$Q_{\min 12} = 0,9 \cdot Q_{\max 12} = 0,9 \cdot 891,827 = 802,64 \text{ квар}.$$

Далее для участка 1–2:

$$R_{12} = r_{012} \cdot L_{12} = 0,48 \cdot 0,21 = 0,1 \text{ Ом},$$

$$X_{12} = x_{012} \cdot L_{12} = 0,06 \cdot 0,21 = 0,0126 \text{ Ом},$$

$$\Delta U_{12} = \frac{850,63 \cdot 0,1 + 802,64 \cdot 0,0126}{10 \cdot 10^2} = 0,095 \%$$

Или в вольтах:

$$\Delta U_{12} = 0,095 \frac{10000}{100} = 9,5 \text{ В},$$

$$U_2 = 10000 - 9,5 = 9990,5 \text{ В}.$$

Расчёт остальных участков минимального режима выполняется аналогично. Результаты расчёта сведены в таблицу 16.

«Результаты расчетов для построения эпюры отклонений напряжения для максимального и минимального режимов систематизируем в виде таблицы 16.

Таблица 16 – Расчетные данные для построения эпюры отклонений напряжения

Параметр	Максимальный режим	Минимальный режим
$\Delta U_{12}, \%$	0,1	0,095
$\Delta U_{12}, \text{В}$	11,8	9,5
$\Delta U_{23} = \Delta U_m, \%$	3,4	3,08
$\Delta U_{23} = \Delta U_m, \text{В}$	356,6	308,03
$\Delta U_{34}, \%$	0,93	0,81
$\Delta U_{34}, \text{В}$	3,4	2,98
$\Delta U_{45}, \%$	0,31	0,26
$\Delta U_{45}, \text{В}$	1,18	0,96
$\Delta U_{56}, \%$	0,34	0,38
$\Delta U_{56}, \text{В}$	1,3	1,37
$U_{\text{потр}}, \text{В}$	380,1	362,62

Эпюра отклонений напряжения приведена на рисунке 8» [12].

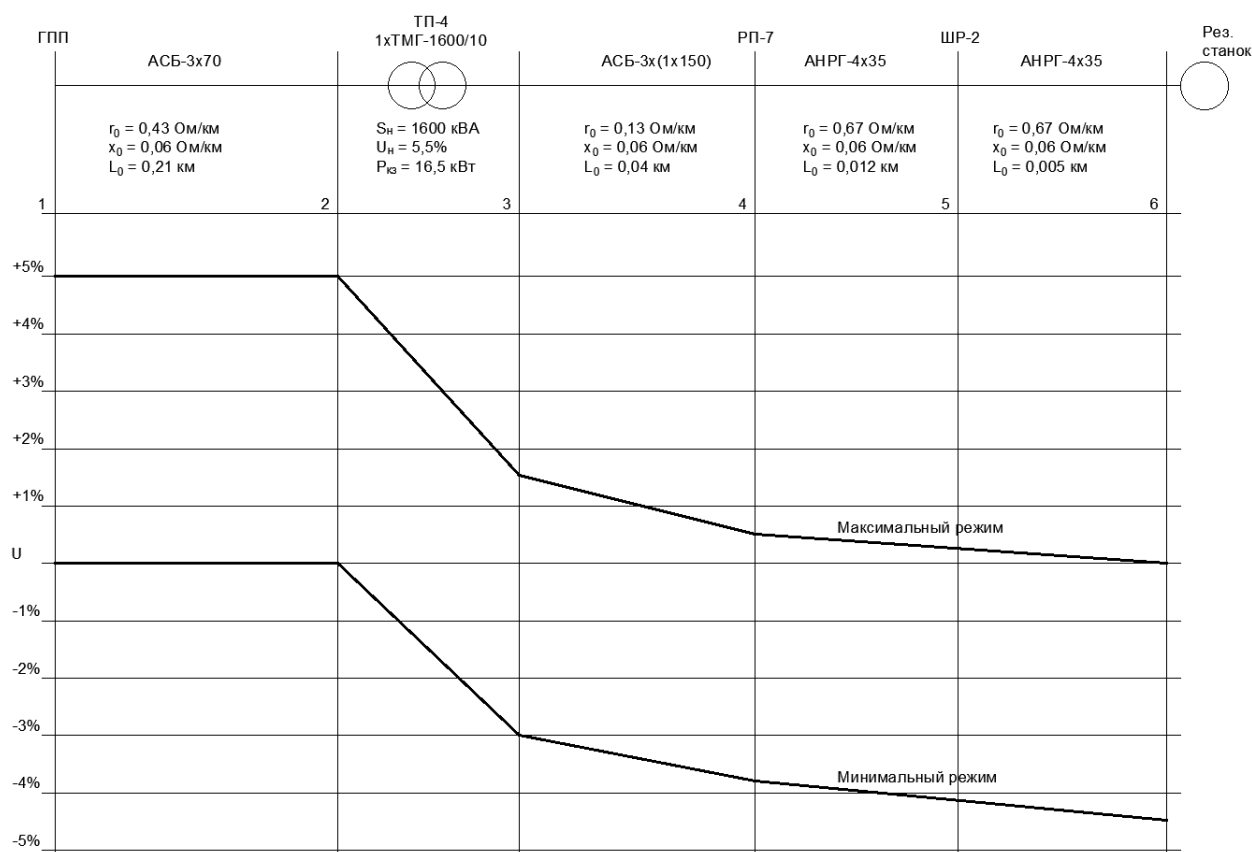


Рисунок 8 – Эпюры отклонений напряжения

Результаты расчётов показали, что отклонение во всех режимах не превышает нормы $\pm 5\%$, что удовлетворяет требованиям ГОСТ 32144-2013 [5].

Выводы по разделу 10.

В одиннадцатом разделе ВКР построены «эпюры отклонений напряжения для цепочки линий от шин ГПП наиболее удалённого от цеховой ТП электроприемника для режимов максимальной и минимальной нагрузок» [12]. Результаты расчётов показали, что отклонение во всех режимах не превышает нормы $\pm 5\%$, что удовлетворяет требованиям ГОСТ 32144-2013.

Заключение

В результате выполненной работы был проведен комплексный анализ системы электроснабжения группы цехов сталеплавильного комбината. На основе собранных данных и выполненных расчетов разработана схема электроснабжения, обеспечивающая надежность, эффективность и безопасность функционирования объекта. В процессе проектирования были учтены особенности технологического процесса сталеплавильного производства, требования к качеству электроэнергии и нормативы энергопотребления.

Проведен расчет электрических нагрузок группы цехов сталеплавильного комбината.

«Построена картограмма электрических нагрузок по данным расчета нагрузок цехов с потребителями 0,4 кВ. На основе картограммы определен центр электрических нагрузок.

В ходе проектирования определено необходимое количество и мощность цеховых трансформаторов. Выбрано 10 трансформаторов мощностью 1600 кВА каждый, марки ТМГ–1600/10.

В шестом разделе ВКР разработана схема внешнего электроснабжения комбината. Определено, что электроснабжение завода осуществляется от подстанции энергосистемы по двум воздушным линиям напряжением 110 кВ, выполненным проводом марки АС–70/11.

ГПП размещена на территории предприятия с учетом особенностей расположения цехов, что привело к ее смещению относительно центра электрических нагрузок. Для трансформации напряжения на ГПП выбраны два двухобмоточных силовых трансформатора типа ТДН–10000/110/10 кВ» [12], которые гарантируют достаточную мощность и резервирование для бесперебойного энергоснабжения. Принятые решения по выбору напряжения питающей ВЛ, марки и сечения проводов, а также параметров трансформаторов обеспечивают эффективную передачу электроэнергии с

минимальными потерями и создают надежную основу для распределения энергии по цехам комбината, соответствуя техническим и экономическим требованиям проекта.

Схема ГПП выполнена следующим образом:

- со стороны 110 кВ применяется схема 110–4Н «Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий».
- со стороны 10 кВ реализована радиальная схема с двумя системами шин и секционным выключателем. Распределительное устройство 10 кВ «собрано на основе шкафов КРУ–10 кВ с выкатными выключателями на тележках. Питание цеховых трансформаторов организовано с использованием одно– и двухцепных кабельных линий марки АСБ.

На основании расчетов токов короткого замыкания выше 1 кВ был выполнен выбор высоковольтного оборудования (выключателей, трансформаторов тока, ВН и др.).

Построена эпюра отклонений напряжения от ТП–10 кВ до наиболее мощного электроприемника, рассчитаны минимальные и максимальные падения напряжения. Результаты показали, что отклонение во всех режимах не превышает нормы $\pm 5\%$ [12], что удовлетворяет требованиям ГОСТ 32144-2013.

Таким образом, предложенная система электроснабжения группы цехов сталеплавильного комбината отвечает современным требованиям энергоэффективности, надежности и безопасности, что способствует стабильной работе предприятия и его дальнейшему развитию.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Анчарова Т. В., Рашевская М. А., Стебунова Е. Д. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений. 2–е изд., перераб. и доп. Москва: ФОРУМ, 2020. 414 с.
2. Афонин В. В., Набатов К. А. Электрические станции и подстанции. Учебное пособие. В 3 частях. Часть 1; Тамбовский государственный технический университет. Учеб. электрон. изд. комплекс. распространения. Тамбов: Изд–во ТГТУ, 2015. 88 с.
3. Быстрицкий Г. Ф., Б. И. Кудрин Электроснабжение. Силовые трансформаторы : учебное пособие для вузов. 2–е изд., испр. и доп. Москва : Издательство Юрайт, 2025. 199 с.
4. Вахнина В. В., Черненко А. Н. Системы электроснабжения: электрон. учеб. –метод. пособие, Тольяттинский государственный университет, Институт энергетики и электротехники, каф. «Электроснабжение и электротехника». Тольятти: Изд–во ТГУ, 2015. 46 с.
5. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (с поправкой, с Изменением N 1) // Консультант плюс: справочно–правовая система.
6. ГОСТ Р 59279-2020 Схемы принципиальные электрические распределительных устройств от 35 до 750 кВ подстанций // Консультант плюс: справочно–правовая система.
7. Климова Г. Н. Электроэнергетические системы и сети. Энергосбережение : учебник для вузов. 3–е изд., перераб. и доп. Москва : Издательство Юрайт, 2025. 177 с.
8. Конюхова Е. А. Электроснабжение: учебник. Москва: Издат. дом МЭИ, 2019. 510 с.
9. Кудрин Б.И. Электроснабжение: учебник. М.: Издательский центр «Академия», 2012. 352 с.

10. Кулеева Л. И., Митрофанов С. В., Семенова Л. А. Проектирование подстанции: учеб. пособие; Оренбургский государственный университет. Оренбург: ОГУ, 2016. 110 с.
11. Немировский А. Е., Сергиевская И. Ю., Крепышева Л. Ю. Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций: учеб. пособие. 4-е изд., доп. Москва: Инфра-Инженерия, 2020. 171 с.
12. Ополева Г.Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов : учебное пособие. М. : Форум, 2018. 350 с.
13. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. Москва: ИНФРА-М, 2018. 261 с.
14. Правила устройства электроустановок: утверждено приказом Минэнерго России от 20 июня 2003 г. № 242 : введены в действие 01.11.03 / Министерство энергетики Российской Федерации. Изд. 7-е. Москва: ЭНАС, 2013. 100 с.
15. РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования // Консультант плюс: справочно-правовая система
16. Рекомендации по технологическому проектированию подстанций переменного тока с высшим напряжением 35–750 кв.: утверждено приказом Минэнерго России от 30 июня 2003 г. № 288 / Министерство энергетики Российской Федерации. Москва: ЭНАС, 2017.
17. РТМ 36.18.32.4–92 Указания по расчету электрических нагрузок // Консультант плюс: справочно-правовая система.
18. Сивков А. А., Сайгаш А. С., Герасимов Д. Ю. Основы электроснабжения : учебное пособие для вузов. 3-е изд., испр. и доп. Москва : Издательство Юрайт, 2025. 173 с.
19. Степанов В.М., Косырихин В.С. Расчёт и проектирование электрических сетей и систем. ТулГУ. Тула : Изд-во ТулГУ, 2014. 351 с.
20. Технические характеристики вакуумных выключателей типа ВВТЭ-М-10. URL: <https://electrocomplex.nt->

rt.ru/images/manuals/TH_vukluchateli_vakuumn_vvte.pdf (дата обращения 24.03.2024).

21. Технические характеристики элегазовых выключателей типа ВГТ-110–40/2000 У1. URL: <https://zeto.ru/vgt-1/?ysclid=m8msmt1mj8357825120> (дата обращения 24.03.2024).

22. Технические характеристики разъединителей типа РН-СЭЩ-110/1000 У1. URL: <https://www.electroshield.ru/catalog/razyediniteli-i-vla/razediniteli-naruzhnoy-ustanovki-110-kv/> (дата обращения 24.03.2024).

23. Технические характеристики трансформаторов тока ТОГФ-110. URL: <https://www.electroshield.ru/catalog/razyediniteli-i-vla/razediniteli-naruzhnoy-ustanovki-110-kv/> (дата обращения 24.03.2024).

24. Технические характеристики силового трансформатора типа ТДН – 10000/110/10 У1. URL: <https://powertrans.nt-rt.ru/price/product/80551?ysclid=m970khdf4u208248438> (дата обращения 24.03.2024).

25. Ушаков В. Я. Электроэнергетические системы и сети : учебник для среднего профессионального образования. 2–е изд., перераб. и доп. Москва : Издательство Юрайт, 2025. 393 с.

26. Фролов Ю. М. Электроснабжение промышленных предприятий : учебник для вузов. Москва : Издательство Юрайт, 2025. 351 с.

27. Щербаков Е.Ф., Александров Д.С., Дубов А.Л. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях : учебное пособие. М. : Форум, 2016. 208 с.