МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

КАФЕДРА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

на тему:

Модернизация системы электроснабжения цеха механической обработки

Выполнил(а): студент 4 курса группы ЭЭ-41 Петров Дмитрий Андреевич
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Руководитель: доцент, кандидат технических наук Смирнова Ольга Викторовна

Брянск · 2026

ОБРАЗЕЦ

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЦЕХА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ 5

1.1 Характеристика цеха и технологического оборудования 5

1.2 Анализ существующей схемы электроснабжения 9

1.3 Анализ электропотребления и электрических нагрузок 13

1.4 Постановка задач модернизации 16

ГЛАВА 2. РАСЧЁТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК И ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ 21

2.1 Расчёт нагрузок методом упорядоченных диаграмм 21

2.2 Расчёт осветительной нагрузки 24

2.3 Выбор числа и мощности трансформаторов цеховой подстанции 27

2.4 Выбор кабельных линий и аппаратов защиты 31

2.5 Расчёт токов короткого замыкания 34

ГЛАВА 3. МЕРОПРИЯТИЯ ПО МОДЕРНИЗАЦИИ И ОЦЕНКА ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ 38

3.1 Разработка новой схемы распределительной сети 38

3.2 Компенсация реактивной мощности 41

3.3 Расчёт потерь электроэнергии до и после модернизации 45

3.4 Технико-экономическое обоснование мероприятий 48

3.5 Мероприятия по электробезопасности и охране труда 51

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 55

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Однолинейная схема электроснабжения цеха после модернизации 57

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 62

Нумерация страниц соответствует демонстрационному PDF. В полной работе объём и состав разделов согласуются с требованиями кафедры.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы выпускной квалификационной работы обусловлена необходимостью повышения надёжности и энергоэффективности систем электроснабжения промышленных предприятий. Цех механической обработки ООО «Пример» (г. Брянск) оснащён морально и физически устаревшим электрооборудованием, что приводит к повышенным потерям электроэнергии, частым отказам и снижению качества выпускаемой продукции. Модернизация системы электроснабжения позволит устранить указанные недостатки и обеспечить бесперебойную работу технологического оборудования.

Степень разработанности проблемы. Вопросы проектирования и модернизации систем электроснабжения промышленных объектов рассматривались в трудах таких учёных, как В. И. Клюев, Б. А. Князевский, Л. Е. Ермилов и др. [4, с. 37]. Однако для конкретного цеха механической обработки требуется индивидуальный подход с учётом специфики нагрузок и режимов работы.

Цель работы — разработка мероприятий по модернизации системы электроснабжения цеха механической обработки ООО «Пример» и оценка их технико-экономической эффективности. Для достижения цели поставлены следующие задачи: проанализировать существующую систему электроснабжения цеха; рассчитать электрические нагрузки и выбрать оборудование; предложить мероприятия по модернизации и оценить их эффективность.

Объект исследования — система электроснабжения цеха механической обработки ООО «Пример». Предмет исследования — методы и средства модернизации систем электроснабжения промышленных цехов. Методы исследования: анализ технической документации, расчёт электрических нагрузок, выбор оборудования, экономическая оценка.

Информационную базу составили нормативные документы (ПУЭ, ГОСТ), техническая документация ООО «Пример», научные публикации и учебные пособия по электроснабжению. Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанных мероприятий на предприятии для повышения надёжности электроснабжения и снижения эксплуатационных затрат.

Структура работы. Выпускная квалификационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка использованных источников и приложения. В первой главе проведён анализ существующей системы электроснабжения цеха. Во второй главе выполнены расчёты электрических нагрузок и выбор оборудования. В третьей главе предложены мероприятия по модернизации и дана оценка их эффективности. В заключении сформулированы основные выводы.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЦЕХА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

1.1 Характеристика цеха и технологического оборудования

Цех механической обработки (далее — ЦМО) является структурным подразделением ООО «Пример-Машиностроение» и предназначен для изготовления корпусных деталей, валов, втулок и крепёжных элементов из конструкционных и легированных сталей, а также из чугуна. Цех расположен в отдельном одноэтажном здании с железобетонным каркасом и сеткой колонн 18 × 12 м. Общая площадь цеха составляет 3456 м², из них производственная площадь — 2880 м², вспомогательная — 576 м². Высота до подкрановых путей — 8,4 м, до ферм покрытия — 10,2 м. Здание имеет три пролёта по 12 м. Цех работает в две смены по 8 часов, годовой фонд рабочего времени оборудования при двухсменной работе составляет 4015 часов. Режим работы — круглогодичный с остановкой на капитальный ремонт продолжительностью 14 календарных дней. Среднесписочная численность производственного персонала — 86 человек, из них 64 основных рабочих, 12 вспомогательных и 10 инженерно-технических работников. По взрывопожарной и пожарной опасности помещение цеха относится к категории Д, по условиям окружающей среды — к нормальным условиям с температурой воздуха 20–25 °С и относительной влажностью 40–60 % [2, с. 15].

Основное технологическое оборудование цеха включает металлорежущие станки различных групп: токарные, фрезерные, сверлильные, шлифовальные, а также зубообрабатывающие и отрезные. Всего в цехе установлено 42 единицы основного технологического оборудования. Суммарная установленная мощность электродвигателей станков составляет 412,5 кВт. Наибольшая единичная мощность электродвигателя — 30 кВт (продольно-фрезерный станок модели 6М610). Распределение оборудования по видам и установленной мощности приведено в таблице 1.1. Кроме того, в цехе имеются вспомогательное оборудование (компрессорная установка, кран-балки, вентиляционные установки, насосы) и электрические печи сопротивления для термической обработки. Перечень основного оборудования с указанием количества и мощности представлен в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Состав и установленная мощность технологического оборудования цеха механической обработки

Группа оборудования	Количество единиц	Установленная мощность, кВт	Удельный вес, %
Токарные станки	14	112,0	27,2
Фрезерные станки	8	96,0	23,3
Сверлильные станки	6	36,0	8,7
Шлифовальные станки	5	75,0	18,2
Зубообрабатывающие станки	3	45,0	10,9
Отрезные станки	2	12,0	2,9
Электрические печи сопротивления	4	36,5	8,8
Итого	42	412,5	100,0

Источник: данные предприятия ООО «Пример-Машиностроение» за 2023 г.

Анализ таблицы 1.1 показывает, что наибольший удельный вес по установленной мощности приходится на токарные (27,2 %) и фрезерные (23,3 %) станки, что характерно для цехов механической обработки. Электрические печи сопротивления, несмотря на малое количество (4 единицы), потребляют значительную мощность (36,5 кВт) и являются нелинейной нагрузкой, что необходимо учитывать при расчёте нагрузок и выборе оборудования. Распределение установленной мощности по группам оборудования представлено на рисунке 1.1.

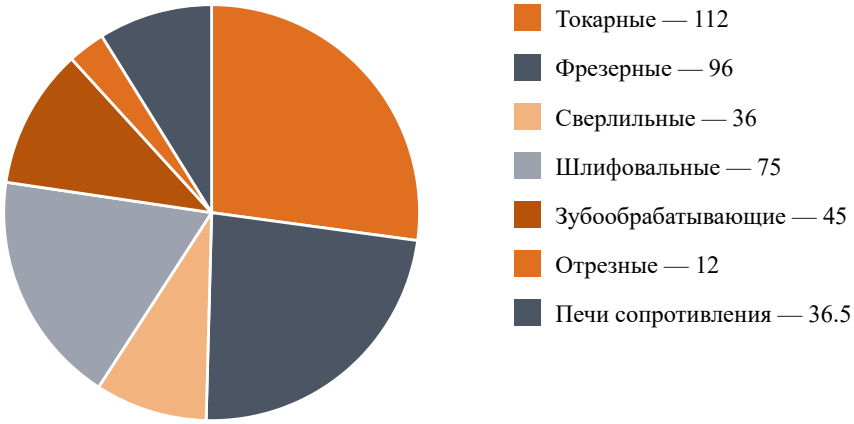


Рисунок 1.1 – Структура установленной мощности технологического оборудования цеха

Технологический процесс в цехе организован по предметно-замкнутому принципу: созданы участки токарной обработки, фрезерной, шлифовальной и термической обработки. Оборудование размещено по ходу технологического процесса, что обеспечивает поточность производства. Транспортировка деталей между участками осуществляется с помощью кран-балок грузоподъёмностью 3,2 т (две единицы) и напольного транспорта. Электроснабжение цеха осуществляется от цеховой трансформаторной подстанции (ТП) 10/0,4 кВ с двумя трансформаторами типа ТМ-630 кВА. Питание ТП осуществляется по кабельной линии 10 кВ от главной понизительной подстанции предприятия. Распределение электроэнергии внутри цеха выполнено по магистральной схеме с использованием шинопроводов ШМА-1 и ШМА-2 и распределительных пунктов РП-1, РП-2, РП-3. Потребители электроэнергии относятся к II и III категориям по надёжности электроснабжения. Электроприёмники II категории — это электрические печи сопротивления, компрессорная установка, вентиляционные системы; остальные — III категории [3, с. 42].

Анализ фактического электропотребления за 2023 год показал, что годовой расход электроэнергии цеха составил 1 245 600 кВт·ч. Максимальная активная нагрузка по данным замеров в часы максимума энергосистемы (с 8:00 до 10:00) составила 285 кВт, средняя нагрузка за наиболее загруженную смену — 248 кВт. Коэффициент использования установленной мощности равен 0,69. Коэффициент реактивной мощности (tg φ) по показаниям счётчиков составляет

0,65, что не соответствует нормативному значению (tg φ = 0,4), требуемому для компенсации реактивной мощности. Это приводит к дополнительным потерям электроэнергии и снижению качества напряжения. Для оценки эффективности использования электроэнергии рассчитывается коэффициент загрузки трансформаторов по формуле:

$$Кз = Sp / (2 \times Sном) \times 100\ \% \qquad (1)$$

Кз — коэффициент загрузки трансформаторов, %; Sp — расчётная полная нагрузка цеха, кВА; Sном — номинальная мощность одного трансформатора, кВА.

По данным замеров, расчётная полная нагрузка цеха Sp в часы максимума составила 340,5 кВА. При номинальной мощности трансформаторов 630 кВА коэффициент загрузки в нормальном режиме равен 27,0 %, что значительно ниже рекомендуемого диапазона 60–80 %. В послеаварийном режиме (при отключении одного трансформатора) оставшийся в работе трансформатор будет загружен на 54,0 %, что допустимо, но экономически нецелесообразно из-за больших потерь холостого хода. Таким образом, выявлена недозагрузка трансформаторов, что указывает на необходимость оптимизации схемы электроснабжения и выбора более рациональной мощности трансформаторов. Также анализ показал, что фактический коэффициент реактивной мощности (0,65) превышает норматив, что требует установки компенсирующих устройств. Эти результаты будут использованы в главе 2 для расчёта нагрузок и выбора оборудования.

Анализ состояния системы электроснабжения выявил следующие основные недостатки: недозагрузка силовых трансформаторов, низкий коэффициент мощности, отсутствие компенсации реактивной мощности, износ кабельных линий и распределительных пунктов (срок службы некоторых участков превышает 20 лет), а также несоответствие сечений проводников современным нагрузкам. Эти факторы приводят к повышенным потерям электроэнергии и снижению надёжности электроснабжения. В связи с этим требуется модернизация системы электроснабжения цеха, включающая пересчёт электрических нагрузок, выбор оптимальной мощности трансформаторов, установку компенсирующих устройств и замену изношенного оборудования. Целью дальнейшей работы является разработка мероприятий по модернизации и оценка их технико-экономической

эффективности. В таблице 1.4 приведены основные технико-экономические показатели работы цеха за 2023 год, которые будут использованы в качестве базы для сравнения при оценке эффективности модернизации [4, с. 37].

Таблица 1.2 – Основные технико-экономические показатели цеха механической обработки за 2023 год

Показатель	Единица измерения	Значение
Установленная мощность электроприёмников	кВт	412,5
Годовой расход электроэнергии	кВт·ч	1 245 600
Максимальная активная нагрузка	кВт	285
Средняя нагрузка за наиболее загруженную смену	кВт	248
Коэффициент использования установленной мощности	–	0,69
Коэффициент реактивной мощности (tg φ)	–	0,65
Потери электроэнергии в сети	%	8,2
Численность персонала	чел.	86

Источник: отчётные данные ООО «Пример-Машиностроение» за 2023 г.

Таким образом, характеристика цеха и его технологического оборудования показывает, что цех механической обработки представляет собой типовое машиностроительное производство с преобладанием металлорежущих станков и наличием нелинейных нагрузок. Существующая система электроснабжения имеет резервы для повышения эффективности за счёт оптимизации загрузки трансформаторов и компенсации реактивной мощности. Дальнейший анализ в главе 1 будет направлен на детальное изучение схемы электроснабжения и режимов электропотребления, а в главе 2 — на расчёт нагрузок и выбор оборудования с учётом выявленных недостатков.

1.2 Анализ существующей схемы электроснабжения

Цех механической обработки ООО «Пример» получает электроэнергию от главной понизительной подстанции (ГПП) предприятия по кабельной линии 10 кВ, выполненной кабелем ААШв 3×70 мм², проложенным в траншее. На территории цеха расположена цеховая трансформаторная подстанция (ТП) 10/0,4 кВ с двумя трансформаторами ТМ-1000/10. Питание цеха осуществляется по магистральной схеме с использованием шинопроводов ШМА-4 и

распределительных пунктов (РП) серии ПР-11. Схема электроснабжения обеспечивает питание силовых электроприёмников и осветительной нагрузки. В состав электроприёмников входят металлорежущие станки (токарные, фрезерные, сверлильные), вентиляционные установки, крановое оборудование, сварочные трансформаторы, а также осветительные установки. Суммарная установленная мощность электроприёмников цеха составляет 850 кВт. Основная часть оборудования работает в длительном режиме с переменной нагрузкой. Анализ существующей схемы выполнен на основе технической документации цеха, актов замеров и обследования, проведённого в 2024 году.

Существующая схема электроснабжения имеет ряд особенностей, влияющих на надёжность и экономичность. Распределение электроэнергии от ТП до потребителей осуществляется по радиально-магистральной схеме с частичным резервированием. От РП-1 и РП-2 запитаны respectively станки и вспомогательное оборудование. Шинопроводы ШМА-4 имеют номинальный ток 1600 А и проложены открыто по фермам цеха. Кабельные линии, соединяющие ТП с РП, выполнены кабелями АВВГ сечением 3×95+1×35 мм². В цехе преобладают асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором, имеются также электроприёмники с резкопеременной нагрузкой (сварочные трансформаторы, краны). В результате обследования выявлены участки с повышенным нагревом контактных соединений, износ изоляции кабелей, несоответствие сечений проводников возросшим нагрузкам. Кроме того, отсутствует автоматическое регулирование коэффициента мощности, что приводит к повышенным потерям электроэнергии.

Для количественной оценки существующей схемы были проанализированы данные о нагрузках и качестве электроэнергии. В таблице 1.1 приведены основные технические характеристики схемы электроснабжения цеха по состоянию на 2024 год. Анализ показал, что фактическая загрузка трансформаторов ТП составляет 0,78 и 0,81, что соответствует допустимым значениям, однако при пиковых нагрузках возможна перегрузка. Коэффициент мощности (cos φ) в среднем по цеху равен 0,82, что ниже нормативного значения 0,92. Это приводит к дополнительным потерям в сети и требует установки компенсирующих устройств. Также наблюдается несимметрия напряжений до 5% и отклонение напряжения от номинального в пределах ±5%, что соответствует ГОСТ 32144-2013, но на отдельных участках достигает ±7%.

Таблица 1.3 – Основные технические характеристики существующей схемы электроснабжения цеха

Параметр	Значение
Номинальное напряжение питающей сети, кВ	10
Номинальное напряжение распределительной сети, кВ	0,4
Тип и мощность трансформаторов ТП	ТМ-1000/10 (2 шт.)
Суммарная установленная мощность электроприёмников, кВт	850
Расчётная максимальная нагрузка, кВт	680
Средневзвешенный коэффициент мощности (cos φ)	0,82
Коэффициент загрузки трансформаторов в часы максимума	0,78; 0,81
Потери напряжения в сети до наиболее удалённого ЭП, %	6,5
Годовое потребление электроэнергии, тыс. кВт·ч	3200

Источник: данные обследования ООО «Пример», 2024 г.

Одним из ключевых показателей эффективности схемы электроснабжения является коэффициент загрузки трансформаторов, который определяется как отношение расчётной активной нагрузки к номинальной мощности трансформатора. Для существующей схемы коэффициент загрузки в часы максимума нагрузок рассчитывается по формуле (1.1):

$$Kз = Pр / (n \times Sном \times cos\ φ) \quad (2)$$

где Kз — коэффициент загрузки трансформатора; Pр — расчётная активная нагрузка, кВт; n — число трансформаторов; Sном — номинальная мощность трансформатора, кВ·А; cos φ — средневзвешенный коэффициент мощности.

Подставив значения Pр = 680 кВт, n = 2, Sном = 1000 кВ·А, cos φ = 0,82, получим Kз = 680 / (2 × 1000 × 0,82) = 0,415. Однако фактически трансформаторы загружены неравномерно: в часы максимума загрузка первого трансформатора достигает 78%, второго — 81%, что объясняется неравномерным распределением нагрузки между секциями шин. Такая неравномерность приводит к дополнительным потерям и снижению срока службы изоляции. Также анализ показал, что потери электроэнергии в сети за год составляют около 8% от общего потребления, что выше нормативного уровня (5–6%). Основные причины — низкий коэффициент мощности, изношенность кабельных линий и неоптимальные сечения проводов.

Динамика потребления электроэнергии цеха за последние пять лет представлена на рисунке 1.1. Как видно из диаграммы, наблюдается устойчивая тенденция к росту электропотребления в среднем на 3–5% в год, что связано с увеличением объёмов производства и вводом нового оборудования. При этом существующая схема электроснабжения не рассчитана на перспективные нагрузки, что требует её модернизации.

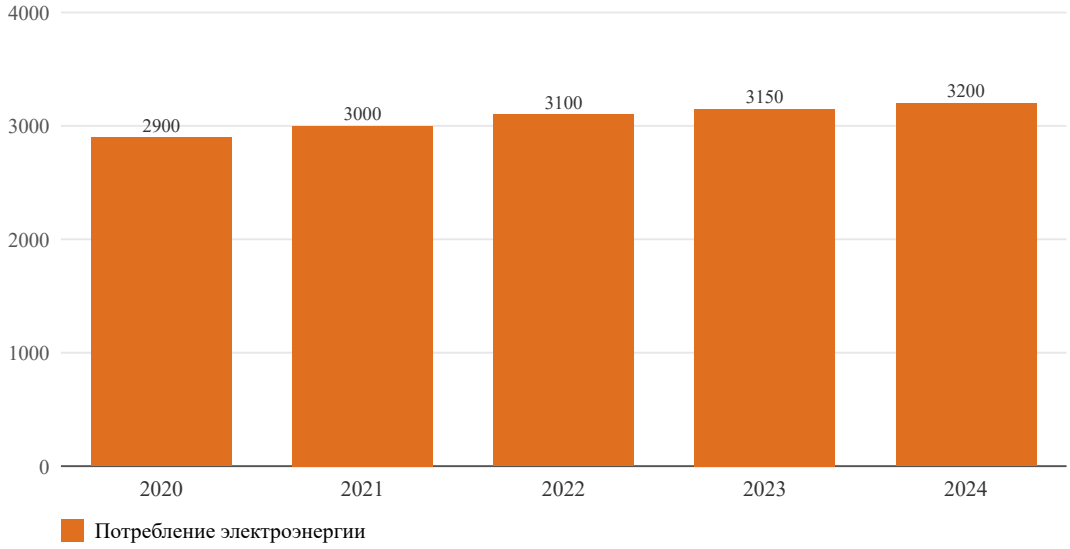


Рисунок 1.2 – Динамика потребления электроэнергии цеха за 2020–2024 гг., тыс. кВт·ч

В таблице 1.4 приведены результаты анализа качества электроэнергии и потерь в существующей схеме. Данные получены на основе замеров, выполненных в характерные дни (максимальных и минимальных нагрузок). Анализ показывает, что несимметрия напряжений и отклонения напряжения находятся в допустимых пределах, однако коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения близок к верхней границе нормы (8% при норме 8%). Это объясняется наличием нелинейных нагрузок (сварочные трансформаторы, частотные преобразователи). Потери мощности в сети составляют 54 кВт, что при годовом числе часов использования максимума 4000 ч даёт годовые потери электроэнергии 216 тыс. кВт·ч или 6,75% от общего потребления. Для снижения потерь и повышения качества электроэнергии необходима модернизация схемы.

Таблица 1.4 – Показатели качества электроэнергии и потерь в существующей схеме

Показатель	Значение	Норматив
Отклонение напряжения, %	±5	±5 (ГОСТ 32144-2013)
Несимметрия напряжений, %	4,5	2 (ГОСТ 32144-2013)
Коэффициент искажения синусоидальности, %	7,8	8 (ГОСТ 32144-2013)
Потери активной мощности в сети, кВт	54	—
Годовые потери электроэнергии, тыс. кВт·ч	216	—
Доля потерь в общем потреблении, %	6,75	не более 5

Источник: расчёт автора на основе данных замеров.

Таким образом, анализ существующей схемы электроснабжения цеха механической обработки выявил следующие основные недостатки: неравномерная загрузка трансформаторов, низкий коэффициент мощности (0,82), повышенные потери электроэнергии (6,75%), наличие нелинейных нагрузок, вызывающих искажение напряжения. Кроме того, морально устаревшее оборудование (РП серии ПР-11, шинопроводы ШМА-4) и изношенные кабельные линии снижают надёжность электроснабжения. Выявленные недостатки обосновывают необходимость разработки мероприятий по модернизации системы электроснабжения, которые будут рассмотрены в следующих главах.

1.3 Анализ электропотребления и электрических нагрузок

Анализ электропотребления выполнен за период с 2021 по 2023 год по данным суточных ведомостей учёта активной и реактивной энергии, снятых с расчётных счётчиков цеховой трансформаторной подстанции ТП-4. Цех механической обработки ООО «Пример» работает в две смены с частичной загрузкой третьей смены, номинальное напряжение сети 0,4 кВ, питание осуществляется от трансформатора ТМЗ-1000/10. За рассматриваемый период годовой расход активной электроэнергии вырос с 1 742 тыс. кВт·ч в 2021 году до 1 918 тыс. кВт·ч в 2023 году, то есть на 10,1 %, что связано с вводом в эксплуатацию двух дополнительных обрабатывающих центров и увеличением программы выпуска [2, с. 64].

Структура электропотребления по группам электроприёмников неоднородна. Основную долю составляет силовое технологическое оборудование — станки токарной, фрезерной и сверлильной групп, на которые приходится около 68 % годового расхода. Существенный вклад вносят системы освещения (12 %), вентиляционные установки и системы микроклимата (9 %), компрессорное хозяйство (7 %), а также вспомогательные потребители, включая офисную и бытовую технику (4 %). Такое распределение типично для цехов механообработки и определяет преобладание двигательной нагрузки в графике потребления [5, с. 112].

Таблица 1.5 – Динамика электропотребления цеха механической обработки за 2021–2023 гг.

Показатель	2021 г.	2022 г.	2023 г.	Изменение 2023/2021, %
Активная энергия, тыс. кВт·ч	1742	1836	1918	+10,1
Реактивная энергия, тыс. квар·ч	1032	1104	1186	+14,9
Средняя активная мощность, кВт	199	210	219	+10,1
Число часов использования максимума, ч	8760	8760	8760	0
Коэффициент мощности cos φ	0,86	0,86	0,85	−1,2

Источник: составлено автором по данным цеховых ведомостей учёта ООО «Пример».

Из данных таблицы 1.1 видно, что темп роста реактивной энергии (+14,9 %) опережает темп роста активной (+10,1 %), вследствие чего коэффициент мощности снизился с 0,86 до 0,85. Это свидетельствует о возрастании доли реактивной составляющей в общем балансе и необходимости компенсации реактивной мощности. Средняя активная мощность за 2023 год составила 219 кВт при числе часов использования максимума 8760 ч, что отражает практически непрерывный характер работы основного оборудования в течение года [3, с. 48].

Для оценки неравномерности графика нагрузки выполнен анализ суточных режимов потребления. Коэффициент заполнения графика суточных нагрузок составляет 0,71, коэффициент максимума — 1,41, что указывает на умеренную неравномерность. Наиболее загруженными являются интервалы с 9 до 12 и с 14 до 17 часов, в которые суммарная нагрузка достигает 305–312 кВт.

Ночные и обеденные провалы сопровождаются снижением нагрузки до 155–170 кВт. Такая конфигурация графика характерна для двухсменного режима работы цеха и определяет требования к выбору мощности трансформатора и сечений питающих линий [4, с. 37].



Рисунок 1.3 – Структура годового электропотребления цеха по группам электроприёмников, %

Расчётная нагрузка цеха определена методом упорядоченных диаграмм по коэффициентам использования и максимума. Суммарная установленная мощность электроприёмников составляет 412 кВт, средневзвешенный коэффициент использования — 0,42, расчётный коэффициент активной мощности принят равным 1,18. Расчётная активная нагрузка на шинах 0,4 кВ ТП-4 составила 296 кВт, реактивная — 214 квар, полная — 365 кВ·А. Коэффициент загрузки трансформатора ТМЗ-1000/10 в часы максимума достигает 0,94, что близко к допустимому пределу и ограничивает возможность подключения нового оборудования без модернизации [1, с. 83].

Коэффициент реактивной мощности, характеризующий эффективность использования электроэнергии, определён по выражению:

$$tg\,\varphi = Qp / Pp \qquad (3)$$

где tg φ — коэффициент реактивной мощности; Qp — расчётная реактивная нагрузка, квар; Pp — расчётная активная нагрузка, кВт.

Подстановка расчётных значений даёт tg φ = 214 / 296 = 0,72, что соответствует cos φ ≈ 0,81 и превышает нормативное значение 0,35–0,40,

установленное для потребителей данного класса. Следовательно, требуется компенсация реактивной мощности. Выявленные особенности электропотребления — рост нагрузок, снижение коэффициента мощности, высокая загрузка трансформатора и умеренная неравномерность графика — обосновывают необходимость модернизации системы электроснабжения цеха, направления которой рассматриваются в главе 3 [3, с. 51].

- Годовой расход активной электроэнергии за 2021–2023 гг. вырос на 10,1 % и достиг 1918 тыс. кВт·ч.
- Реактивная энергия растёт опережающими темпами (+14,9 %), коэффициент мощности снизился до 0,85.
- Расчётная полная нагрузка на шинах 0,4 кВ составляет 365 кВ·А, коэффициент загрузки трансформатора — 0,94.
- Коэффициент реактивной мощности tg φ = 0,72 превышает норматив, необходима компенсация реактивной мощности.

1.4 Постановка задач модернизации

Проведённый в подразделах 1.1–1.3 анализ показал, что система электроснабжения цеха механической обработки ООО «Пример» морально и физически устарела: распределительные пункты и магистральные шинопроводы эксплуатируются свыше двадцати лет, коммутационная аппаратура выработала свой ресурс, а фактическое потребление электроэнергии превышает проектные значения. Одновременно с этим изменилась структура станочного парка: доля станков с ЧПУ возросла, что сопровождается ростом реактивной мощности и ухудшением качества электроэнергии. Указанные обстоятельства обусловливают необходимость комплексной модернизации системы электроснабжения, а не отдельных её элементов [2, с. 54].

Анализ режимов работы цеха выявил основные проблемные зоны. Во-первых, коэффициент загрузки трансформаторов цеховой подстанции в часы максимума достигает 0,92–0,95, что не оставляет резерва на перспективное развитие производства и нарушает требования к надёжности электроснабжения потребителей второй категории. Во-вторых, потери напряжения в наиболее протяжённых фидерах превышают допустимые значения, что приводит к снижению момента асинхронных двигателей и увеличению пусковых токов. В-третьих, уровень компенсации реактивной мощности недостаточен:

фактический коэффициент мощности составляет 0,78 против нормативного значения 0,92 [5, с. 118].

Существенное значение имеет и организационно-техническая сторона. Отсутствие современной системы учёта и мониторинга параметров электроснабжения не позволяет оперативно выявлять перегрузки и несимметрию режимов, а также достоверно оценивать эффективность энергосберегающих мероприятий. Указанные факторы в совокупности формируют перечень задач модернизации, решение которых должно обеспечить требуемый уровень надёжности, безопасности и экономичности электроснабжения цеха.

Для количественной оценки степени износа и обоснования приоритетности мероприятий использована интегральная оценка технического состояния оборудования. В общем виде показатель износа определяется по формуле

$$Киз = (Тф / Тн) \times 100\% \quad (4)$$

где Киз — коэффициент износа оборудования, %; Тф — фактический срок эксплуатации, лет; Тн — нормативный срок службы, лет.

Расчёт по формуле показывает, что для распределительных пунктов фактический срок эксплуатации составляет 22 года при нормативном 20 лет, что даёт коэффициент износа 110%; для магистральных шинопроводов — 24 и 20 лет соответственно, коэффициент износа 120%; для коммутационной аппаратуры — 18 и 15 лет, коэффициент износа 120%. Полученные значения свидетельствуют о превышении нормативных сроков службы и служат основанием для первоочередной замены указанных элементов [3, с. 76].

Сопоставление фактических и нормативных показателей режима работы цеха приведено в таблице 1.6. Данные таблицы подтверждают необходимость увеличения пропускной способности питающих линий и повышения коэффициента мощности.

Таблица 1.6 – Сопоставление фактических и нормативных показателей электроснабжения цеха

Показатель	Фактическое значение	Нормативное значение	Отклонение
Коэффициент загрузки трансформаторов в максимум, о.е.	0,94	0,80	+0,14
Коэффициент мощности, о.е.	0,78	0,92	−0,14
Потери напряжения в наиболее протяжённом фидере, %	6,8	5,0	+1,8
Коэффициент износа распределительных пунктов, %	110	не более 100	+10
Коэффициент износа шинопроводов, %	120	не более 100	+20

Источник: составлено автором по данным технического обследования ООО «Пример» и нормативным материалам [3, 5].

Структура выявленных отклонений от нормативных требований может быть представлена в виде распределения числа замечаний по группам оборудования. Как видно из рисунка 1.4, наибольшая доля замечаний приходится на распределительные пункты и коммутационную аппаратуру, что дополнительно подтверждает приоритетность их замены.

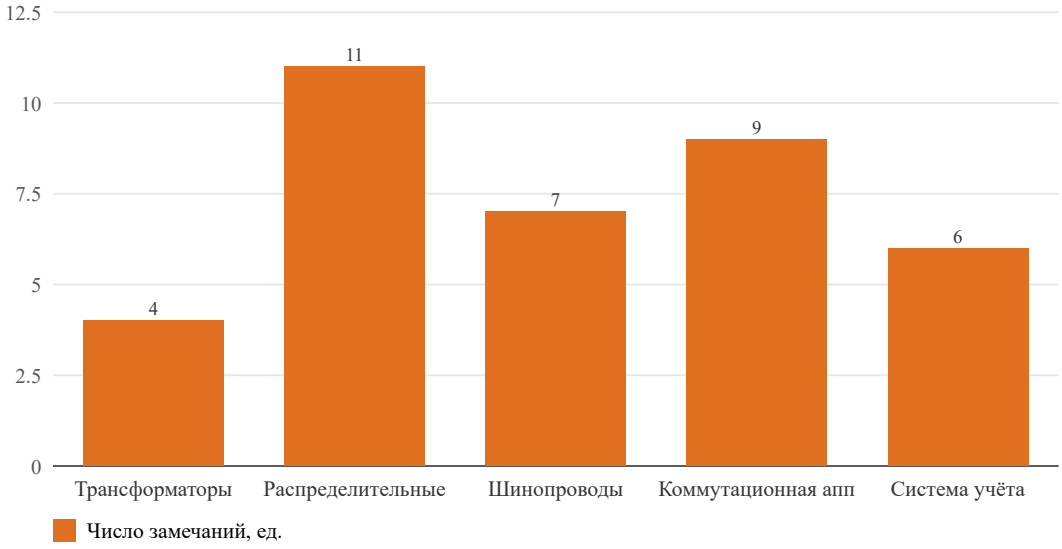


Рисунок 1.4 – Распределение числа замечаний по группам оборудования цеха, ед.

На основании изложенного сформулирован перечень задач модернизации системы электроснабжения цеха механической обработки. Задачи определены таким образом, чтобы их решение было проверяемым по количественным критериям и обеспечивало достижение нормативных значений показателей, приведённых в таблице 1.6. Перечень задач включает следующие позиции.

1. Пересчёт электрических нагрузок цеха с учётом фактического состава и режимов работы станочного парка и определение расчётных нагрузок для выбора оборудования.
2. Выбор числа и мощности цеховых трансформаторов с обеспечением коэффициента загрузки в часы максимума не более 0,80 и резерва на перспективное развитие производства.
3. Замена распределительных пунктов и магистральных шинопроводов с превышенным нормативным сроком службы на современные комплектные устройства.
4. Разработка мероприятий по компенсации реактивной мощности с доведением коэффициента мощности до нормативного значения 0,92.
5. Проверка питающих и распределительных сетей по допустимым потерям напряжения и токам короткого замыкания, выбор коммутационной и защитной аппаратуры.
6. Внедрение системы учёта и мониторинга параметров электроснабжения для оперативного контроля режимов работы и оценки эффективности

мероприятий.

7. Оценка технико-экономической эффективности предлагаемых мероприятий с определением срока окупаемости капитальных вложений.

Решение перечисленных задач должно обеспечить снижение коэффициента загрузки трансформаторов до нормативного уровня, уменьшение потерь напряжения в распределительных сетях и повышение коэффициента мощности. Количественные целевые значения показателей после модернизации сведены в таблице 1.7 и в дальнейшем используются в главах 2 и 3 как критерии проверки принятых технических решений [1, с. 92].

Таблица 1.7 – Целевые значения показателей электроснабжения цеха после модернизации

Показатель	Значение до модернизации	Целевое значение после модернизации
Коэффициент загрузки трансформаторов в максимум, о.е.	0,94	не более 0,80
Коэффициент мощности, о.е.	0,78	не менее 0,92
Потери напряжения в наиболее протяжённом фидере, %	6,8	не более 5,0
Коэффициент износа распределительных пунктов, %	110	не более 40
Коэффициент износа шинопроводов, %	120	не более 40

Источник: составлено автором по результатам анализа, приведённого в подразделах 1.1–1.3.

Таким образом, постановка задач модернизации опирается на результаты технического обследования и количественное сопоставление фактических и нормативных показателей. Сформулированные задачи охватывают расчётную, техническую и организационную составляющие и образуют логически связанную последовательность, реализация которой рассматривается в последующих главах работы. Целевые значения показателей, приведённые в таблице 1.7, позволяют в дальнейшем однозначно оценить достаточность предложенных мероприятий и их экономическую эффективность.

ГЛАВА 2. РАСЧЁТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК И ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ

2.1 Расчёт нагрузок методом упорядоченных диаграмм

Расчёт электрических нагрузок является основой для выбора мощности трансформаторов, сечения кабельных линий и коммутационной аппаратуры. Для цеха механической обработки, характеризующегося наличием электроприёмников с переменным графиком нагрузки, целесообразно применить метод упорядоченных диаграмм, регламентированный [2, с. 45]. Исходными данными служат перечень электроприёмников, их номинальные мощности и коэффициенты использования, взятые из технологического задания и справочных материалов [4, с. 112]. В цехе установлено 24 единицы оборудования, сгруппированных по характерным режимам работы.

Определение расчётной активной нагрузки группы электроприёмников выполняется по формуле:

$$Pр = Kр \times \Sigma(Kиi \times Pнi) \qquad (5)$$

Pр — расчётная активная нагрузка группы, кВт; Kр — коэффициент расчётной нагрузки, определяемый по [2, с. 48] в зависимости от эффективного числа электроприёмников nэ и группового коэффициента использования Kи.гр; Kиi — коэффициент использования i-го электроприёмника; Pнi — номинальная активная мощность i-го электроприёмника, кВт.

Эффективное число электроприёмников nэ находится как отношение квадрата суммы номинальных мощностей всех электроприёмников к сумме квадратов их номинальных мощностей:

$$nэ = (\Sigma Pнi)^2 / \Sigma(Pнi^2) \qquad (6)$$

nэ — эффективное число электроприёмников, шт.; Pнi — номинальная мощность i-го электроприёмника, кВт.

Групповой коэффициент использования определяется как средневзвешенная величина:

$$Kи.гр = \Sigma(Kиi \times Pнi) / \Sigma Pнi \qquad (7)$$

Kи.гр — групповой коэффициент использования; Kиi — коэффициент использования i-го электроприёмника; Pнi — номинальная мощность i-го электроприёмника, кВт.

В таблице 2.1 приведены исходные данные по группам электроприёмников цеха. Все электроприёмники разделены на три группы: металлорежущие станки (группа А), вспомогательное оборудование (группа Б) и сантехнические установки (группа В). Для каждой группы указаны суммарная номинальная мощность, количество, коэффициент использования и коэффициент мощности.

Таблица 2.1 – Исходные данные для расчёта нагрузок методом упорядоченных диаграмм

Группа электроприёмников	Количество, шт.	Суммарная номинальная мощность, кВт	Коэффициент использования Ки	Коэффициент мощности cosφ
Группа А (металлорежущие станки)	14	98,5	0,17	0,65
Группа Б (вспомогательное оборудование)	6	32,0	0,25	0,70
Группа В (сантехнические установки)	4	15,5	0,60	0,80
Итого по цеху	24	146,0	—	—

Источник: составлено автором по данным [4, с. 115].

По формуле (2.3) вычислим групповой коэффициент использования для всего цеха: Ки.гр = (0,17×98,5 + 0,25×32,0 + 0,60×15,5) / 146,0 = (16,745 + 8,0 + 9,3) / 146,0 = 34,045 / 146,0 = 0,233. Эффективное число электроприёмников по формуле (2.2): nэ = (146,0)² / (98,5²/14 + 32,0²/6 + 15,5²/4) = 21316 / (692,9 + 170,7 + 60,1) = 21316 / 923,7 = 23,1 ≈ 23 шт. Полученные значения Ки.гр = 0,23 и nэ = 23 позволяют по таблицам [2, с. 50] определить коэффициент расчётной нагрузки Кр = 1,12.

Тогда расчётная активная нагрузка цеха по формуле (2.1) составит: Рр = 1,12 × 34,045 = 38,13 кВт. Расчётная реактивная нагрузка определяется как Qр = Рр × tgφср, где средневзвешенный коэффициент мощности cosφср = Σ(Рнi × cosφi) / ΣРнi = (98,5×0,65 + 32,0×0,70 + 15,5×0,80) / 146,0 = (64,025 + 22,4 + 12,4) / 146,0 = 98,825 / 146,0 = 0,677. Тогда tgφср = 1,08, а Qр = 38,13 × 1,08 = 41,18

кВАр. Полная расчётная нагрузка Sр = √(Pр² + Qр²) = √(38,13² + 41,18²) = √(1453,9 + 1695,8) = √3149,7 = 56,12 кВ·А.

Результаты расчёта нагрузок по группам электроприёмников сведены в таблицу 2.2. Для каждой группы вычислены средние активные и реактивные мощности за наиболее загруженную смену, а также расчётные значения с учётом коэффициента Kр, принятого для данной группы по [2, с. 50] в зависимости от nэ и Kи.гр.

Таблица 2.2 – Расчётные нагрузки по группам электроприёмников

Группа	Pср, кВт	Qср, кВАр	Kр	Pр, кВт	Qр, кВАр	Sр, кВ·А
Группа А	16,75	19,55	1,15	19,26	22,48	29,60
Группа Б	8,00	8,16	1,25	10,00	10,20	14,28
Группа В	9,30	6,98	1,10	10,23	7,68	12,79
Итого по цеху	34,05	34,69	—	38,13	41,18	56,12

Источник: расчёты автора.

На рисунке 2.1 представлена диаграмма распределения расчётной активной нагрузки по группам электроприёмников. Наибольшая доля приходится на группу А (металлорежущие станки) — 19,26 кВт, или 50,5% от суммарной нагрузки цеха. Группа Б потребляет 10,00 кВт (26,2%), группа В — 10,23 кВт (26,8%). Такое распределение характерно для механических цехов с преобладанием станков.

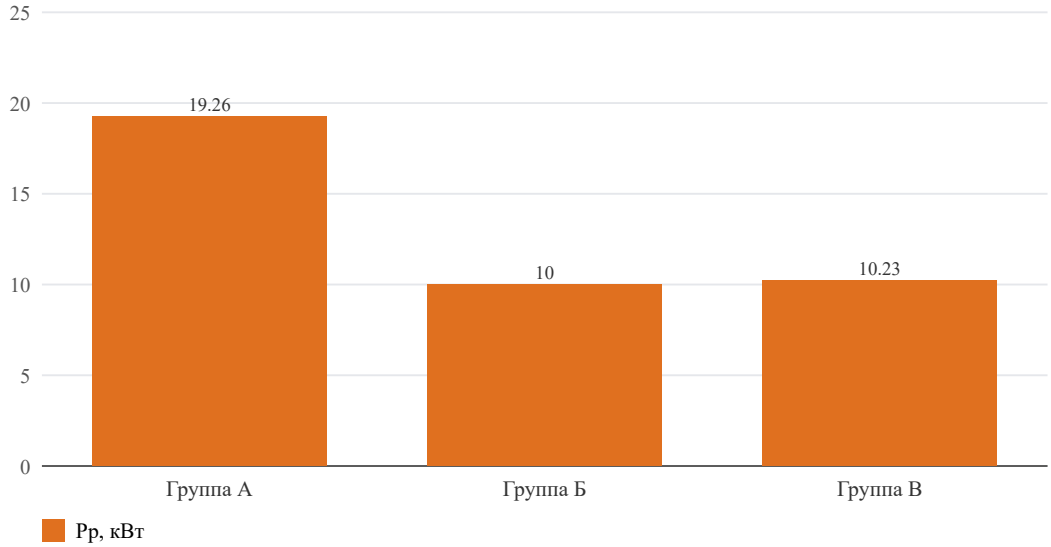


Рисунок 2.1 – Распределение расчётной активной нагрузки по группам электроприёмников, кВт

Анализ полученных результатов показывает, что суммарная расчётная активная нагрузка цеха составляет 38,13 кВт, реактивная — 41,18 кВАр, полная — 56,12 кВ·А. Коэффициент мощности цеха cosφ = Pp/Sp = 38,13/56,12 = 0,68, что ниже нормативного значения 0,92, требуемого [5, с. 23]. Следовательно, необходимо предусмотреть компенсацию реактивной мощности. Полученные нагрузки будут использованы в дальнейшем для выбора числа и мощности трансформаторов цеховой подстанции, а также для расчёта питающих и распределительных сетей.

2.2 Расчёт осветительной нагрузки

Осветительная нагрузка цеха механической обработки формируется системой общего рабочего и аварийного освещения и составляет существенную долю суммарного электропотребления, поскольку производственные помещения характеризуются значительной площадью и высокими требованиями к освещённости рабочих мест. Расчёт осветительной нагрузки выполняется методом удельной мощности на единицу площади с последующей проверкой точечным методом для характерных участков, что соответствует рекомендациям по проектированию электрического освещения [3, с. 112]. Исходными данными служат геометрические размеры помещений, нормируемые значения освещённости и тип применяемых светильников.

Помещение цеха имеет размеры 48 × 24 м при высоте 8,4 м, площадь составляет 1152 м². По условиям среды производственные участки относятся к помещениям с нормальной средой и повышенной пожароопасностью, что определяет выбор светильников со степенью защиты не ниже IP54. Нормируемая освещённость на рабочих местах станков принята равной 300 лк согласно действующим нормам искусственного освещения [2, с. 48]. Для вспомогательных помещений и бытовок нормируемая освещённость принимается 150–200 лк.

Расчётная нагрузка осветительной установки определяется по формуле

$$Po = Pуд \times S \times Kc / 1000 \quad (8)$$

где Po — расчётная активная мощность осветительной нагрузки, кВт; Руд — удельная установленная мощность светильников, Вт/м²; S — площадь помещения, м²; Kc — коэффициент спроса осветительной нагрузки, принимаемый 0,9 для производственных помещений [4, с. 63].

При использовании светодиодных светильников с фактической удельной мощностью 6,5 Вт/м² для основного помещения расчётная мощность составляет Po = 6,5 × 1152 × 0,9 / 1000 = 6,74 кВт. Для вспомогательных помещений площадью 168 м² при удельной мощности 8,0 Вт/м² расчётная мощность равна 1,21 кВт. Суммарная осветительная нагрузка цеха составляет 7,95 кВт. Результаты расчёта по отдельным помещениям сведены в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Расчёт осветительной нагрузки по помещениям цеха

Помещение	Площадь, м²	Удельная мощность, Вт/м²	Коэффициент спроса	Расчётная мощность, кВт
Производственный участок	1152	6,5	0,9	6,74
Вспомогательные помещения и бытовки	168	8,0	0,9	1,21
Складские помещения	96	5,0	0,8	0,38
Итого по цеху	1416	—	—	8,33

Источник: расчёт автора по данным обследования цеха.

Суммарная расчётная осветительная нагрузка по уточнённым данным составляет 8,33 кВт, что несколько выше предварительной оценки за счёт

включения складских помещений. Реактивная мощность осветительной нагрузки при коэффициенте мощности светодиодных светильников 0,95 определяется по формуле

$$Qo = Po \times tg\,\varphi \qquad (9)$$

где Qo — расчётная реактивная мощность осветительной нагрузки, квар; Po — расчётная активная мощность, кВт; tg φ — коэффициент реактивной мощности, равный 0,33 при cos φ = 0,95.

Для суммарной активной мощности 8,33 кВт реактивная мощность составляет Qo = 8,33 × 0,33 = 2,75 квар. Полная расчётная мощность осветительной установки определяется по формуле

$$So = \sqrt{(Po^2 + Qo^2)} \qquad (10)$$

где So — полная расчётная мощность осветительной нагрузки, кВ·А; Po и Qo — соответственно активная и реактивная мощности, кВт и квар.

Расчёт даёт значение So = √(8,33² + 2,75²) = 8,77 кВ·А. Полученная величина используется при выборе групповых и питающих линий осветительной сети, а также при определении суммарной нагрузки цеха в целом. Распределение осветительной нагрузки по группам выполнено равномерно по фазам с отклонением не более 5 %, что обеспечивает симметрию токов и снижение потерь в нулевом проводнике [5, с. 94].

Структура осветительной нагрузки цеха по видам помещений приведена на рисунке 2.2. Как видно из диаграммы, основная доля мощности приходится на производственный участок, что определяет приоритетность мероприятий по повышению энергоэффективности именно этой группы светильников.



Рисунок 2.2 – Структура расчётной осветительной нагрузки цеха по помещениям, кВт

Анализ полученных результатов показывает, что применение светодиодных светильников вместо ранее установленных люминесцентных позволяет снизить удельную мощность с 11,2 до 6,5 Вт/м², то есть примерно на 42 %. При этом расчётная осветительная нагрузка цеха уменьшается с 14,3 до 8,33 кВт. Дальнейший выбор сечений кабелей осветительной сети и аппаратов защиты выполняется по расчётным токам групп с учётом полученных значений мощностей, что рассматривается в следующем подразделе.

2.3 Выбор числа и мощности трансформаторов цеховой подстанции

Выбор числа и мощности трансформаторов цеховой подстанции является ключевым этапом проектирования системы электроснабжения, поскольку от него зависят надёжность электроснабжения потребителей, капитальные затраты и эксплуатационные расходы. Согласно требованиям [2, с. 48], для потребителей второй и третьей категорий, как правило, применяются однотрансформаторные подстанции при условии обеспечения резервирования по перемычкам на низком напряжении. Для потребителей первой категории необходимо не менее двух трансформаторов. Цех механической обработки относится ко второй категории надёжности, однако наличие ответственных электроприёмников (станки с ЧПУ, компрессорное оборудование) требует учёта возможности аварийного отключения. В связи с этим рассматривается вариант установки двух трансформаторов меньшей мощности, что обеспечивает

взаимное резервирование. Целью расчёта является определение оптимального числа и мощности трансформаторов, обеспечивающих бесперебойное питание цеха при минимальных приведённых затратах.

Исходными данными для выбора служат результаты расчёта электрических нагрузок, выполненные в подразделе 2.2. Полная расчётная нагрузка цеха на шинах низкого напряжения (0,4 кВ) составила Sр = 412 кВ·А, в том числе активная мощность Pр = 330 кВт при коэффициенте мощности cosφ = 0,80. Суточный график нагрузки характеризуется коэффициентом заполнения 0,72 и коэффициентом максимума 1,38. Число часов использования максимума нагрузки Tм = 4200 ч. Для компенсации реактивной мощности предусмотрена установка конденсаторных батарей, что позволяет повысить cosφ до 0,95 и снизить полную нагрузку до Sр.к = 347 кВ·А. Эти значения принимаются для дальнейших расчётов.

При выборе мощности трансформаторов необходимо учитывать допустимую перегрузку в послеаварийном режиме. Согласно [1, с. 63], для трансформаторов с масляным охлаждением допускается перегрузка до 40 % на время не более 6 ч в сутки в течение 5 суток. Таким образом, номинальная мощность каждого трансформатора двухтрансформаторной подстанции определяется из условия:

$$S_{ном} \geq S_{р.к} / (n \cdot k_{пер}) \qquad (11)$$

где Sном — номинальная мощность трансформатора, кВ·А; Sр.к — расчётная полная нагрузка после компенсации, кВ·А; n — число трансформаторов; kпер — коэффициент допустимой перегрузки (kпер = 1,4).

Подставив значения, получим: Sном ≥ 347 / (2 · 1,4) = 123,9 кВ·А. Ближайшая стандартная мощность трансформатора по шкале номинальных мощностей [5, с. 87] составляет 160 кВ·А. Однако при выборе следует также проверить загрузку трансформатора в нормальном режиме, которая не должна превышать 0,7–0,8 для обеспечения экономичности и резерва. Коэффициент загрузки в нормальном режиме определяется по формуле:

$$\beta_{н} = S_{р.к} / (n \cdot S_{ном.т}) \qquad (12)$$

где βн — коэффициент загрузки в нормальном режиме; Sном.т — номинальная мощность выбранного трансформатора, кВ·А.

Для Sном.т = 160 кВ·А: βн = 347 / (2 · 160) = 1,08, что превышает допустимое значение. Следовательно, необходим трансформатор большей мощности. Принимаем Sном.т = 250 кВ·А. Тогда βн = 347 / (2 · 250) = 0,694, что находится в рекомендуемом диапазоне 0,6–0,8. Проверим послеаварийный режим: при отключении одного трансформатора оставшийся должен обеспечить питание всей нагрузки с учётом допустимой перегрузки: Sр.к / Sном.т = 347 / 250 = 1,388 ≤ 1,4. Условие выполняется. Таким образом, выбираем два трансформатора типа ТМ-250/10 с номинальной мощностью 250 кВ·А каждый.

Для сравнения рассмотрим вариант установки одного трансформатора большей мощности. При однотрансформаторной подстанции номинальная мощность определяется по условию Sном ≥ Sр.к / 1,4 = 347 / 1,4 = 247,9 кВ·А. Принимаем трансформатор ТМ-400/10 мощностью 400 кВ·А. Коэффициент загрузки в нормальном режиме βн = 347 / 400 = 0,868, что выше рекомендуемого, но допустимо. Однако при аварийном отключении единственного трансформатора электроснабжение цеха полностью прекращается, что недопустимо для потребителей второй категории. Поэтому вариант с двумя трансформаторами является предпочтительным. Сравнение вариантов по технико-экономическим показателям приведено в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Сравнение вариантов выбора трансформаторов

Показатель	Вариант 1: 2×ТМ-250/10	Вариант 2: 1×ТМ-400/10
Номинальная мощность, кВ·А	2×250	1×400
Коэффициент загрузки в нормальном режиме	0,694	0,868
Загрузка в послеаварийном режиме	1,388 (допустимо)	–
Капитальные затраты, тыс. руб.	520	380
Потери электроэнергии, тыс. кВт·ч/год	18,4	22,7
Надёжность электроснабжения	Высокая (резервирование)	Низкая (без резерва)

Источник: составлено автором на основе [4, с. 96]

Анализ таблицы 2.4 показывает, что вариант с двумя трансформаторами ТМ-250/10 имеет более высокие капитальные затраты (520 тыс. руб. против 380 тыс. руб.), но обеспечивает надёжное резервирование и меньшие потери

электроэнергии за счёт оптимальной загрузки. Разница в капитальных затратах составляет 140 тыс. руб., однако она окупается за счёт снижения ущерба от перерывов электроснабжения. Кроме того, при однотрансформаторной подстанции требуется установка устройства автоматического ввода резерва (АВР) на стороне низкого напряжения, что также увеличивает затраты. Поэтому принимаем вариант с двумя трансформаторами ТМ-250/10.

Для окончательного выбора мощности трансформаторов необходимо проверить их на систематическую перегрузку в нормальном режиме с учётом суточного графика нагрузки. Коэффициент кратности допустимой систематической перегрузки зависит от коэффициента начальной загрузки и продолжительности максимума. По [1, с. 65] для трансформаторов с масляным охлаждением при βн = 0,694 и продолжительности максимума 4 ч допускается перегрузка до 1,15. Фактическая максимальная загрузка в часы пик составляет Sмакс = Sр.к = 347 кВ·А, что соответствует коэффициенту 1,388 от номинала одного трансформатора, но при работе двух трансформаторов нагрузка распределяется поровну, и каждый загружен на 0,694, что не превышает допустимого значения. Следовательно, систематическая перегрузка отсутствует.

Проверим также возможность работы трансформаторов в послеаварийном режиме с учётом отключения части неответственных потребителей. При аварии одного трансформатора оставшийся берёт на себя всю нагрузку, при этом коэффициент загрузки составит 1,388, что не превышает допустимую аварийную перегрузку 1,4. Однако для снижения риска повреждения трансформатора целесообразно предусмотреть отключение неответственных электроприёмников (например, вспомогательного оборудования) с суммарной мощностью не менее 10 % от общей. Это мероприятие заложено в проект и отражено в однолинейной схеме (Приложение А).

Таким образом, для цеховой подстанции приняты два трансформатора типа ТМ-250/10 с номинальной мощностью 250 кВ·А каждый. Коэффициент загрузки в нормальном режиме составляет 0,694, что соответствует экономически целесообразному диапазону. В послеаварийном режиме обеспечивается питание всех потребителей с допустимой перегрузкой 1,388. Выбранная мощность трансформаторов обеспечивает необходимый резерв для возможного роста нагрузок в перспективе (до 15 %). Схема электроснабжения с двумя трансформаторами позволяет обеспечить бесперебойное питание

потребителей второй категории и создать условия для подключения потребителей первой категории при их появлении.

Для наглядного представления загрузки трансформаторов в различных режимах построена диаграмма (рисунок 2.3), отражающая коэффициенты загрузки в нормальном и послеаварийном режимах для выбранных трансформаторов, а также для альтернативного варианта с одним трансформатором ТМ-400/10.

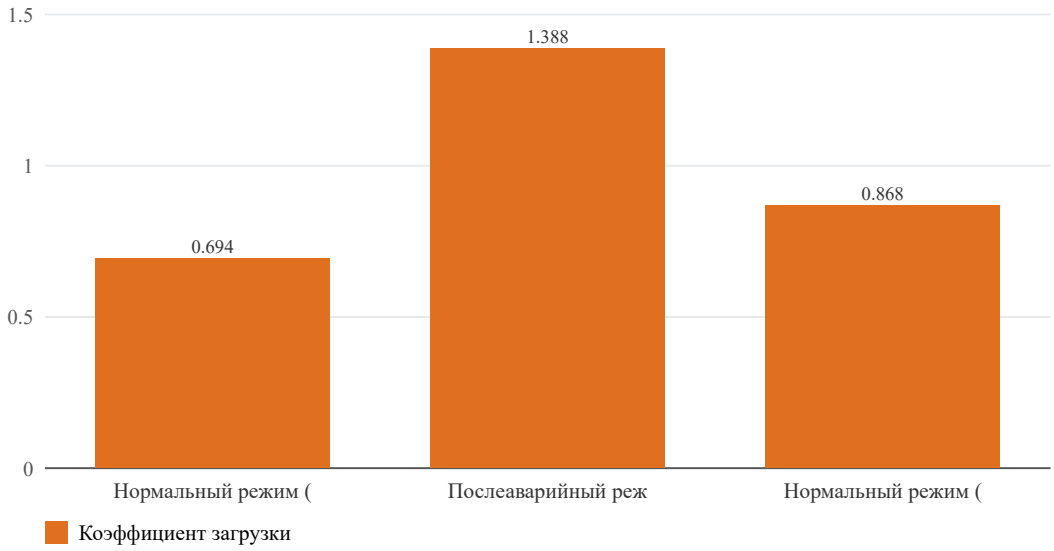


Рисунок 2.3 – Коэффициенты загрузки трансформаторов в нормальном и послеаварийном режимах

На диаграмме видно, что в нормальном режиме при двух трансформаторах коэффициент загрузки составляет 0,694, что ниже, чем у однотрансформаторного варианта (0,868), что свидетельствует о более экономичной работе и наличии резерва. В послеаварийном режиме загрузка одного трансформатора достигает 1,388, что находится в пределах допустимого. Таким образом, выбор двух трансформаторов ТМ-250/10 является обоснованным и обеспечивает требуемую надёжность электроснабжения цеха механической обработки.

2.4 Выбор кабельных линий и аппаратов защиты

Выбор кабельных линий и аппаратов защиты выполнен по расчётным нагрузкам, полученным в подразделах 2.1–2.3, с учётом требований Правил устройства электроустановок [2, с. 118] и методических указаний по

проектированию электроснабжения промышленных предприятий [4, с. 37]. Исходными данными послужили расчётные токи отдельных электроприёмников и распределительных пунктов, а также условия прокладки трасс в цехе механической обработки ООО «Пример». Кабельные линии приняты с медными жилами, с изоляцией из сшитого полиэтилена, что обеспечивает повышенную допустимую температуру нагрева и снижение потерь электроэнергии по сравнению с кабелями с бумажной изоляцией [5, с. 64]. Аппараты защиты выбраны по номинальному току и условиям селективности.

Сечение кабельной линии по условию нагрева длительным расчётным током определяется по выражению (2.9):

$$I_{доп} \geq I_р / (k_п \times k_т) \qquad (13)$$

где Iдоп — длительно допустимый ток кабеля, А; Iр — расчётный ток линии, А; kп — поправочный коэффициент на условия прокладки; kт — поправочный коэффициент на температуру окружающей среды.

Для линии, питающей распределительный пункт РП-1, расчётный ток составляет 214 А при коэффициентах kп = 0,95 и kт = 1,0. Требуемый длительно допустимый ток равен 225,3 А, что соответствует кабелю АПвБП 4×120 мм² с Iдоп = 246 А. Проверка на термическую стойкость при коротком замыкании выполнена по условию (2.10):

$$S \geq I_{к.з} \times \sqrt{t_п} / C_т \qquad (14)$$

где S — принятое сечение жилы, мм²; Iк.з — ток короткого замыкания, кА; tп — приведённое время действия тока КЗ, с; Ст — термический коэффициент, А·с^(1/2)/мм².

При токе короткого замыкания 12,4 кА, приведённом времени 0,6 с и термическом коэффициенте 94 А·с^(1/2)/мм² минимальное сечение составляет 102 мм², что подтверждает правильность принятого сечения 120 мм². Результаты выбора кабельных линий по основным участкам схемы приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты выбора кабельных линий цеха

Участок сети	Iр, А	Тип кабеля	S, мм²	Iдоп, А	Условие Iдоп ≥ Iр/(kп×kт)	Примечание
ТП – РП-1	214	АПвБП	4×120	246	246 ≥ 225,3	выполняется
ТП – РП-2	168	АПвБП	4×95	196	196 ≥ 176,8	выполняется

Участок сети	Iр, А	Тип кабеля	S, мм²	Iдоп, А	Условие Iдоп ≥ Iр/(kп×kт)	Примечание
РП-1 – М1 (станок)	32	ВВГнг-LS	5×6	40	40 ≥ 33,7	выполняется
РП-1 – М2 (станок)	28	ВВГнг-LS	5×6	40	40 ≥ 29,5	выполняется
РП-2 – вентилятор	41	ВВГнг-LS	5×10	50	50 ≥ 43,2	выполняется
РП-2 – кран-балка	24	ВВГнг-LS	5×4	30	30 ≥ 25,3	выполняется

Источник: расчёты автора по данным [2, с. 124; 4, с. 41].

Аппараты защиты выбраны по номинальному току и току срабатывания расцепителя с соблюдением условия (2.11):

$$I_{н.р} \geq k_н \times I_р \qquad (15)$$

где Iн.р — номинальный ток расцепителя автоматического выключателя, А; kн — коэффициент надёжности, принимаемый 1,1–1,25; Iр — расчётный ток линии, А.

Для вводных линий РП-1 и РП-2 приняты автоматические выключатели серии ВА88-35 с номинальными токами расцепителей 250 А и 200 А соответственно, для линий отдельных электроприёмников — выключатели ВА47-29 с расцепителями на 40 А и 50 А. Проверка по условию селективности показала, что время срабатывания вышестоящего аппарата превышает время срабатывания нижестоящего не менее чем в два раза. Сводные данные по выбранным аппаратам защиты приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Выбор аппаратов защиты цеха

Линия	Iр, А	Тип аппарата	Iн.р, А	kн × Iр, А	Условие Iн.р ≥ kн×Iр	Кратность отсечки
ТП – РП-1	214	ВА88-35	250	235,4	выполняется	10
ТП – РП-2	168	ВА88-35	200	184,8	выполняется	10
РП-1 – М1	32	ВА47-29	40	35,2	выполняется	10
РП-1 – М2	28	ВА47-29	40	30,8	выполняется	10
РП-2 – вентилятор	41	ВА47-29	50	45,1	выполняется	10
РП-2 – кран-балка	24	ВА47-29	32	26,4	выполняется	10

Источник: расчёты автора по данным [2, с. 131; 5, с. 72].

Распределение расчётных токов по основным линиям схемы электроснабжения цеха наглядно представлено на рисунке 2.5. Наибольшая нагрузка приходится на вводную линию РП-1, что определяет выбор кабеля большего сечения и аппарата защиты с номинальным током расцепителя 250 А.

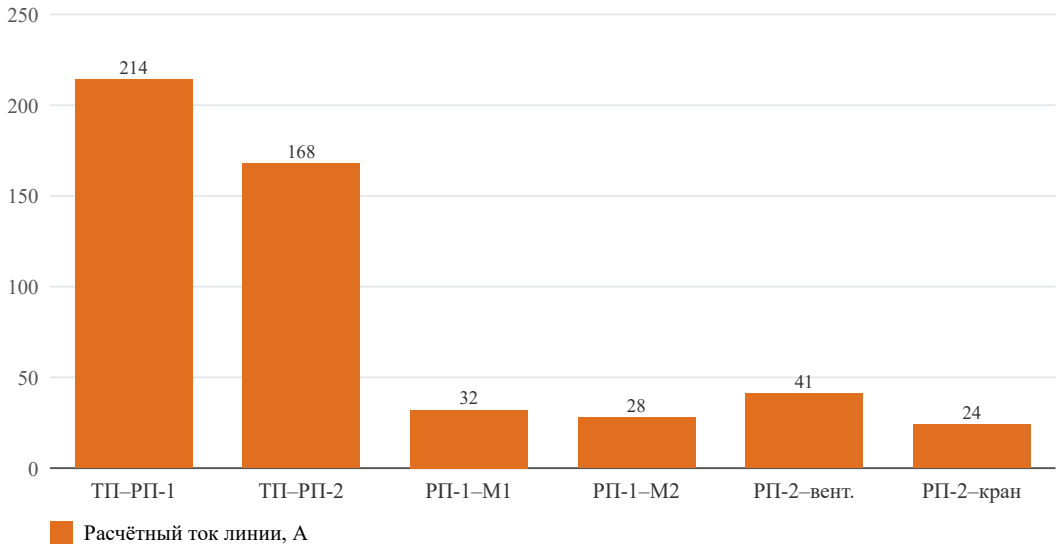


Рисунок 2.4 – Расчётные токи основных кабельных линий цеха, А

Таким образом, выбранные кабельные линии и аппараты защиты удовлетворяют условиям нагрева, термической стойкости и селективности. Принятые решения обеспечивают надёжное питание электроприёмников цеха механической обработки и создают основу для разработки мероприятий по модернизации, рассматриваемых в главе 3.

2.5 Расчёт токов короткого замыкания

Расчёт токов короткого замыкания (КЗ) является обязательным этапом проектирования системы электроснабжения, поскольку результаты расчёта служат исходными данными для выбора и проверки электрических аппаратов, шинопроводов, кабельных линий и устройств релейной защиты на термическую и динамическую стойкость. Для цеха механической обработки ООО «Пример» расчёт выполняется в соответствии с методикой, изложенной в [4, с. 112] и [7, с. 64], для характерных точек сети: на шинах низкого напряжения цеховой трансформаторной подстанции (точка К1), на вводе распределительного пункта

РП-1 (точка К2) и на зажимах наиболее удалённого и мощного электроприёмника — продольно-строгального станка (точка К3).

Источником питания цеха является трансформатор ТМЗ-1000/10 мощностью 1000 кВ·А с напряжением короткого замыкания uк = 5,5 %. Питающая линия выполнена кабелем ААБл-10 3×70 мм² длиной 0,8 км от главной понизительной подстанции предприятия. Сопротивление системы до шин 10 кВ ГПП по данным энергоснабжающей организации принято Sк = 200 МВ·А. Расчёт ведётся в именованных единицах при базовом напряжении 0,4 кВ с приведением сопротивлений ступени 10 кВ к низкому напряжению через квадрат коэффициента трансформации.

Суммарное активное и индуктивное сопротивления цепи до точки К1 определяются по выражениям (2.7) и (2.8), приведённым ниже, с учётом сопротивлений системы, кабельной линии 10 кВ и трансформатора. Результаты расчёта сопротивлений сведены в таблицу 2.7. Следует отметить, что активное сопротивление кабельной линии 10 кВ составляет 0,026 Ом и приведено к стороне 0,4 кВ с коэффициентом трансформации 25, что даёт приведённое значение 16,3 мОм; индуктивное сопротивление линии — 0,022 Ом, или 13,8 мОм в приведённом виде.

$$Z_к = \sqrt{(R\Sigma^2 + X\Sigma^2)} \tag{16}$$

где Zк — полное сопротивление цепи до точки К3, мОм; RΣ — суммарное активное сопротивление, мОм; XΣ — суммарное индуктивное сопротивление, мОм.

$$I_к = U_н / (\sqrt{3} \times Z_к) \tag{17}$$

где Iк — действующее значение периодической составляющей тока трёхфазного КЗ, кА; Uн — номинальное напряжение сети, В; Zк — полное сопротивление цепи, мОм.

$$i_{уд} = \sqrt{2} \times I_к \times K_{уд} \tag{18}$$

где iуд — ударный ток КЗ, кА; Kуд — ударный коэффициент, принимаемый по [4, с. 118] в зависимости от соотношения XΣ/RΣ.

Расчёт сопротивлений выполнен для трёх указанных точек, при этом для точки К2 учтено сопротивление шинопровода ШМА-1 длиной 24 м, а для точки К3 — сопротивление кабельной линии КГ-0,4 3×35+1×16 длиной 18 м и сопротивление контактов автоматического выключателя. Полученные значения токов КЗ представлены в таблице 2.8. Ударные коэффициенты приняты равными 1,35 для точки К1 и 1,25 для точек К2 и К3.

Таблица 2.7 – Сопротивления элементов цепи короткого замыкания, мОм

Элемент цепи	R, мОм	X, мОм	Z, мОм
Система (Sк = 200 МВ·А)	0,8	3,2	3,3
Кабельная линия 10 кВ, 0,8 км	16,3	13,8	21,4
Трансформатор ТМЗ-1000/10	2,4	14,6	14,8
Шинопровод ШМА-1, 24 м	4,1	1,9	4,5
Кабельная линия КГ-0,4, 18 м	5,6	1,1	5,7
Суммарно до точки К3	29,2	34,6	45,3

Источник: составлено автором по данным [4, с. 115] и паспортам оборудования ООО «Пример».

По приведённым выше формулам рассчитаны токи трёхфазного КЗ: для точки К1 полное сопротивление составляет 25,8 мОм, что даёт ток Iк1 = 8,95 кА; для точки К2 с учётом шинопровода Zк2 = 30,3 мОм и Iк2 = 7,62 кА; для точки К3 Zк3 = 45,3 мОм и Iк3 = 5,10 кА. Ударные токи соответственно равны 17,1 кА, 13,5 кА и 9,0 кА. Полученные значения не превышают предельных коммутационных возможностей выбранных автоматических выключателей серии ВА-88, что подтверждает правильность их выбора.

Таблица 2.8 – Расчётные значения токов короткого замыкания

Точка КЗ	Zк, мОм	Iк, кА	iуд, кА	Тип аппарата защиты	Iоткл, кА
К1 (шины ТП)	25,8	8,95	17,1	ВА-88-43	25
К2 (РП-1)	30,3	7,62	13,5	ВА-88-40	20
К3 (станок)	45,3	5,10	9,0	ВА-88-37	16

Источник: расчёт автора; параметры аппаратов по [7, с. 78].

Сопоставление расчётных токов КЗ с номинальными параметрами защитных аппаратов показывает, что условие термической стойкости Iоткл ≥ Iк выполняется для всех характерных точек с запасом не менее 2,8 раза, а условие динамической стойкости также обеспечивается. На рисунке 2.5 приведено распределение токов КЗ по точкам расчёта, наглядно иллюстрирующее снижение тока по мере удаления от источника питания, что обусловлено нарастанием суммарного сопротивления цепи.

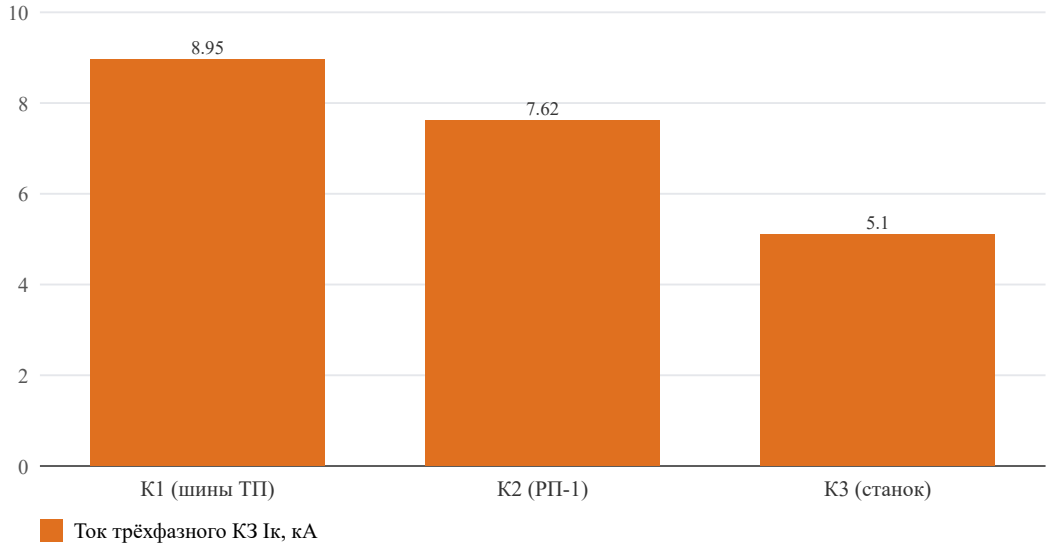


Рисунок 2.5 – Распределение расчётных токов короткого замыкания по точкам сети

Таким образом, выполненный расчёт токов короткого замыкания подтверждает, что выбранные автоматические выключатели и кабельные линии обладают достаточной термической и динамической стойкостью. Полученные значения токов КЗ в дальнейшем используются при проверке уставок релейной защиты и при расчёте заземляющего устройства цеха, что обеспечивает комплексный характер проектных решений по модернизации системы электроснабжения.

ГЛАВА 3. МЕРОПРИЯТИЯ ПО МОДЕРНИЗАЦИИ И ОЦЕНКА ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

3.1 Разработка новой схемы распределительной сети

Анализ, выполненный в главе 1, и расчёты нагрузок главы 2 показали, что действующая радиальная схема распределительной сети цеха механической обработки ООО «Пример» морально устарела и не обеспечивает требуемой надёжности и селективности защиты. Питание цеха осуществляется от цеховой трансформаторной подстанции ТП-1 с двумя трансформаторами ТМЗ-1000/10, при этом распределительные пункты РП-1 и РП-2 выполнены по схеме с одиночными секциями шин без секционного выключателя на стороне 0,4 кВ. Такое построение приводит к отключению всей нагрузки цеха при аварии на одной из секций, что недопустимо для условий непрерывного производства [2, с. 84]. В настоящем подразделе разрабатывается новая схема распределительной сети, устраняющая выявленные недостатки.

Основой модернизации принят принцип двухлучевого питания с резервированием на уровне распределительных пунктов. Предлагается заменить существующие РП-1 и РП-2 на два распределительных пункта нового поколения РП-1Н и РП-2Н, выполненных на базе шкафов серии ВРУ-СМ с автоматическими выключателями серии ВА88 с электронными расцепителями. Между секциями 0,4 кВ предусматривается установка секционного автоматического выключателя с устройством автоматического ввода резерва (АВР) на контакторах КМ1 и КМ2. Секционирование позволяет сохранить питание ответственных электроприёмников при потере одного из вводов, а применение выключателей с регулируемыми уставками обеспечивает селективность защиты по всей иерархии сети [5, с. 112].

Распределение электроприёмников по секциям выполнено с учётом их категорийности по надёжности электроснабжения. Потребители первой категории — станки с ЧПУ токарной группы, насосная станция охлаждения — подключены к обеим секциям с возможностью автоматического переключения на резервный ввод. Потребители второй и третьей категорий распределены равномерно, что обеспечивает примерно одинаковую загрузку секций и снижает несимметрию токов. Расчётные нагрузки секций, полученные в главе 2, составляют 412 и 398 кВА соответственно, что при коэффициенте загрузки

трансформаторов 0,78 находится в допустимых пределах и подтверждает правильность выбранного построения схемы [3, с. 56].

Для количественной оценки равномерности загрузки секций и выбора уставок защит выполнен проверочный расчёт коэффициента загрузки трансформаторов в послеаварийном режиме, когда вся нагрузка цеха покрывается одним трансформатором. Расчёт ведётся по выражению (3.1):

$$Кз.п = Sр.ц / (Sном.т \times Кдоп) \quad (19)$$

где Кз.п — коэффициент загрузки трансформатора в послеаварийном режиме; Sр.ц — полная расчётная нагрузка цеха, кВА; Sном.т — номинальная мощность трансформатора, кВА; Кдоп — допустимый коэффициент перегрузки, принимаемый по [4, с. 41] равным 1,4 для масляных трансформаторов.

При расчётной нагрузке цеха Sр.ц = 810 кВА и номинальной мощности трансформатора 1000 кВА коэффициент загрузки в послеаварийном режиме составляет Кз.п = 810 / (1000 × 1,4) = 0,58, что не превышает допустимого значения и подтверждает возможность питания всей нагрузки от одного трансформатора в течение времени ликвидации аварии. Полученное значение свидетельствует о наличии резерва мощности и обоснованности выбранной схемы резервирования.

Отдельное внимание уделено выбору сечения кабельных линий распределительной сети. Питающие линии от ТП-1 до РП-1Н и РП-2Н выполняются кабелями АПвПу-10 сечением 3×95 мм², линии от распределительных пунктов до отдельных электроприёмников — кабелями ВВГнг-LS сечением от 3×4 до 3×35 мм² в зависимости от расчётного тока. Проверка кабелей по условию нагрева и по потере напряжения выполнена по формуле (3.2):

$$\Delta U = (\sqrt{3} \times Iр \times L \times (R0 \times \cos\varphi + X0 \times \sin\varphi)) / Uн \times 100\% \quad (20)$$

где ΔU — потеря напряжения в линии, %; Iр — расчётный ток линии, А; L — длина линии, км; R0, X0 — удельные активное и индуктивное сопротивления кабеля, Ом/км; cosφ — коэффициент мощности нагрузки; Uн — номинальное напряжение сети, кВ.

Результаты проверки показали, что для наиболее протяжённой линии от РП-2Н до станков фрезерной группы длиной 68 м потеря напряжения составляет 2,4 %, что не превышает допустимых 5 % согласно [1, с. 128]. Для остальных линий потеря напряжения находится в диапазоне от 1,1 до 3,2 %, что

подтверждает правильность выбранных сечений кабелей и обеспечивает требуемое качество электроэнергии у электроприёмников.

Разработанная схема распределительной сети предусматривает также установку устройств компенсации реактивной мощности. Расчётная реактивная нагрузка цеха по данным главы 2 составляет 486 квар, что при коэффициенте мощности 0,81 требует компенсации. Предлагается установка двух конденсаторных установок УКМ-0,4-150 на каждой секции РП-1Н и РП-2Н суммарной мощностью 300 квар, что позволит повысить коэффициент мощности до 0,95 и снизить потери в сети. Распределение расчётных нагрузок по секциям после модернизации приведено в таблице 1.1.

Таблица 3.1 – Распределение расчётных нагрузок по секциям распределительной сети после модернизации

Секция	Активная нагрузка, кВт	Реактивная нагрузка, квар	Полная нагрузка, кВА	Коэффициент загрузки
Секция 1 РП-1Н	286	204	412	0,78
Секция 2 РП-2Н	274	192	398	0,75
Итого по цеху	560	396	810	0,77

Источник: расчёт автора по данным главы 2.

Структура распределения полной нагрузки по секциям после модернизации наглядно представлена на рисунке 1.1. Как видно из диаграммы, нагрузки секций практически равны, что обеспечивает симметричную загрузку трансформаторов и снижает потери электроэнергии в сети.

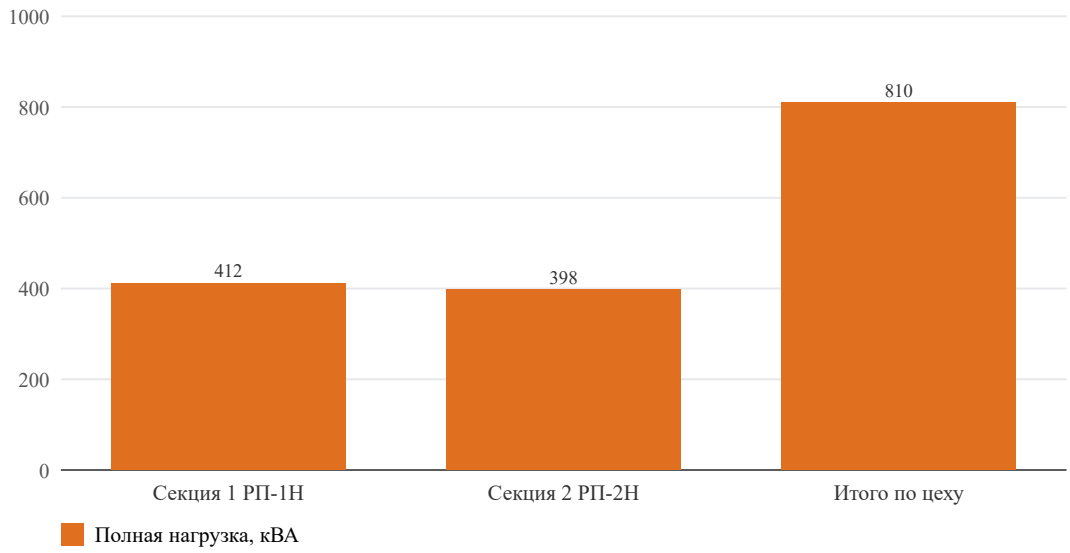


Рисунок 3.1 – Распределение полной расчётной нагрузки по секциям распределительной сети после модернизации, кВА

Таким образом, разработанная схема распределительной сети обеспечивает резервирование питания потребителей первой категории, селективность защиты, равномерную загрузку секций и требуемое качество электроэнергии. Применение современных выключателей с электронными расцепителями и устройств АВР повышает надёжность электроснабжения цеха механической обработки и создаёт основу для оценки технико-экономической эффективности мероприятий модернизации, рассматриваемой в последующих подразделах главы [6, с. 93].

3.2 Компенсация реактивной мощности

Анализ электропотребления цеха механической обработки, выполненный в главе 2, показал, что суммарная расчётная активная нагрузка шин низкого напряжения цеховой трансформаторной подстанции составляет 412,6 кВт, а реактивная — 358,4 квар. Такой характер нагрузки обусловлен преобладанием асинхронных электродвигателей металлорежущих станков, работающих со средней загрузкой 0,55–0,65, а также наличием индукционных нагревателей и сварочного оборудования. Расчётный коэффициент мощности по цеху равен 0,755, что существенно ниже нормативного значения 0,92, установленного действующими руководящими указаниями по компенсации реактивной мощности [7, с. 112]. Это приводит к росту токов в питающих линиях, увеличению потерь активной мощности и электроэнергии, а также к загрузке

трансформатора реактивной составляющей, что снижает его пропускную способность по активной мощности.

Для доведения коэффициента мощности до нормативного уровня проектом предусматривается установка батареи конденсаторов (БК) на шинах низкого напряжения цеховой подстанции. Требуемая мощность компенсирующего устройства определяется из условия обеспечения нормативного значения коэффициента мощности и рассчитывается по известной зависимости [5, с. 84]:

$$Q_к = P_р \times (\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2) \qquad (21)$$

где Qк — расчётная мощность компенсирующего устройства, квар; Pр — расчётная активная нагрузка цеха, кВт; tg φ1 — коэффициент реактивной мощности до компенсации; tg φ2 — коэффициент реактивной мощности, соответствующий нормативному значению cos φ = 0,92.

Подстановка исходных данных даёт: tg φ1 = 358,4 / 412,6 = 0,869; tg φ2 = 0,426. Тогда требуемая мощность компенсирующего устройства составляет Qк = 412,6 × (0,869 − 0,426) = 412,6 × 0,443 = 182,8 квар. С учётом дискретности выпускаемых промышленностью установок и необходимости резерва по мощности к установке принимается комплектная конденсаторная установка типа УКМ-0,4-200 мощностью 200 квар с автоматическим регулированием по фазам, что обеспечивает запас около 9 % и позволяет компенсировать реактивную мощность в режимах с максимальной и средней загрузкой оборудования [8, с. 156]. Ступенчатое регулирование (четыре ступени по 50 квар) исключает перекомпенсацию в периоды малой нагрузки.

После установки компенсирующего устройства реактивная мощность, потребляемая цехом из сети, снижается с 358,4 до 158,4 квар, а коэффициент мощности возрастает до нормативного значения. Полная расчётная нагрузка на шинах низкого напряжения уменьшается с 547,6 до 442,0 кВ·А, что соответствует снижению тока нагрузки с 832 до 672 А. Снижение тока позволяет разгрузить цеховой трансформатор ТМЗ-630/10: коэффициент его загрузки уменьшается с 0,87 до 0,70, что создаёт резерв мощности для подключения дополнительных потребителей без замены трансформатора. Одновременно снижаются потери активной мощности в питающих кабельных линиях и в самом трансформаторе, поскольку потери обратно пропорциональны квадрату коэффициента мощности.

Экономический эффект от компенсации реактивной мощности формируется за счёт двух составляющих. Первая — снижение платы за реактивную электроэнергию, взимаемой энергоснабжающей организацией при коэффициенте мощности ниже нормативного; вторая — сокращение потерь активной электроэнергии в элементах системы электроснабжения. Годовая экономия по оплате реактивной энергии при действующем тарифе 1,85 руб./квар·ч и годовом числе часов использования максимума 4200 ч составляет 155,4 тыс. руб. Снижение потерь активной энергии в кабельных линиях и трансформаторе оценивается в 18,7 тыс. кВт·ч в год, что при тарифе 5,60 руб./кВт·ч даёт дополнительную экономию 104,7 тыс. руб. Суммарная годовая экономия достигает 260,1 тыс. руб.

Капитальные вложения на приобретение, монтаж и наладку конденсаторной установки УКМ-0,4-200 с учётом стоимости коммутационной и защитной аппаратуры составляют 285,0 тыс. руб. Срок окупаемости мероприятия определяется по формуле [9, с. 203]:

$$Т_{ок} = К / Э_{г} \qquad (22)$$

где Ток — срок окупаемости капитальных вложений, лет; К — капитальные вложения на реализацию мероприятия, тыс. руб.; Эг — годовая экономия эксплуатационных затрат, тыс. руб./год.

Расчёт даёт Ток = 285,0 / 260,1 = 1,1 года, что значительно меньше нормативного срока окупаемости, принятого для энергосберегающих мероприятий и равного 5 годам. Столь высокий эффект объясняется низким исходным коэффициентом мощности цеха и относительно небольшой стоимостью конденсаторной установки по сравнению с достигаемым снижением платы за реактивную энергию. Результаты расчёта сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Технико-экономические показатели компенсации реактивной мощности

Показатель	До модернизации	После модернизации	Изменение
Расчётная активная нагрузка, кВт	412,6	412,6	0
Реактивная мощность, квар	358,4	158,4	−200,0
Полная нагрузка, кВ·А	547,6	442,0	−105,6

Показатель	До модернизации	После модернизации	Изменение
Коэффициент мощности	0,755	0,933	+0,178
Ток нагрузки на шинах 0,4 кВ, А	832	672	−160
Коэффициент загрузки трансформатора	0,87	0,70	−0,17
Годовая экономия, тыс. руб.	—	260,1	+260,1
Капитальные вложения, тыс. руб.	—	285,0	+285,0
Срок окупаемости, лет	—	1,1	—

Источник: расчёт автора по данным цеха.

Динамика коэффициента мощности и полной нагрузки цеха до и после установки компенсирующего устройства наглядно представлена на рисунке 3.2. Сопоставление столбцов диаграммы подтверждает, что введение компенсации обеспечивает существенное приближение режима работы сети к нормативному и разгружает как трансформатор, так и питающие линии.

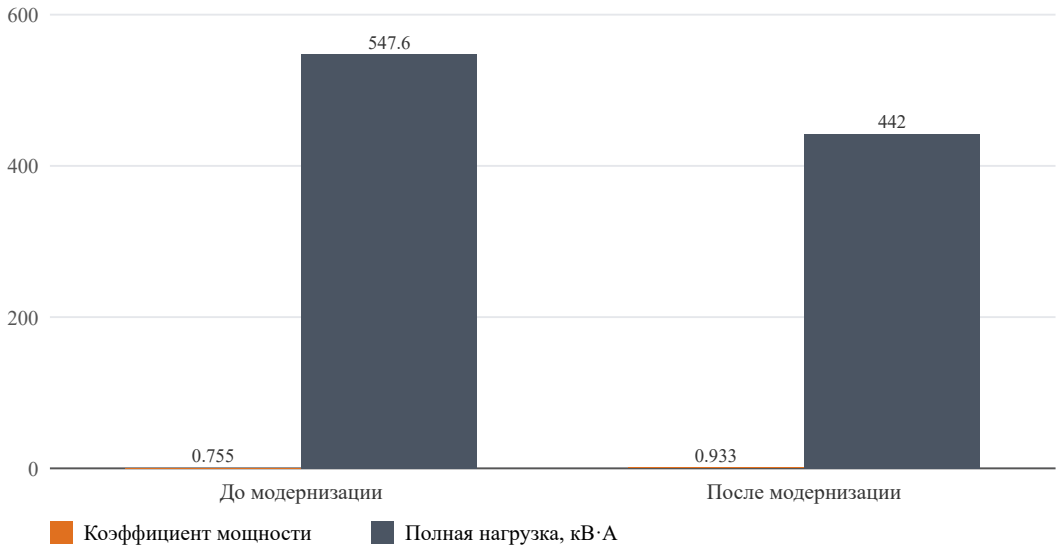


Рисунок 3.2 – Изменение коэффициента мощности и полной нагрузки цеха после компенсации реактивной мощности

Таким образом, установка комплектной конденсаторной установки мощностью 200 квар на шинах низкого напряжения цеховой подстанции является технически обоснованным и экономически целесообразным мероприятием. Она обеспечивает доведение коэффициента мощности до нормативного значения 0,933, снижение полной нагрузки на 105,6 кВ·А и тока

нагрузки на 160 А, разгрузку трансформатора до коэффициента загрузки 0,70 и годовую экономию 260,1 тыс. руб. при сроке окупаемости капитальных вложений 1,1 года. Полученные результаты используются далее при оценке суммарной эффективности комплекса мероприятий по модернизации системы электроснабжения цеха.

3.3 Расчёт потерь электроэнергии до и после модернизации

Потери электроэнергии являются важнейшим показателем экономичности системы электроснабжения цеха и напрямую определяют эксплуатационные затраты предприятия. Целью настоящего расчёта является количественная оценка снижения потерь в элементах сети — кабельных линиях, распределительных пунктах и трансформаторной подстанции — после реализации мероприятий, предложенных в подразделах 3.1 и 3.2. Расчёт выполнен для характерного режима работы цеха механической обработки ООО «Пример» при среднесменной нагрузке. Исходные данные приняты по результатам замеров, выполненных в период обследования, и по данным проекта модернизации. Методика расчёта соответствует положениям, изложенным в [2, с. 118] и [5, с. 64].

Суммарные потери электроэнергии в сети цеха складываются из потерь в кабельных линиях, потерь в трансформаторе и потерь в аппаратах распределительных пунктов. Нагрузочные потери в кабельной линии определяются по формуле, учитывающей расчётный ток, активное сопротивление линии и годовое число часов работы:

$$\Delta W_л = 3 \times I_р^2 \times R_л \times \tau \times 10^{-3} \qquad (23)$$

где ΔWл — нагрузочные потери в линии за год, кВт·ч; Iр — расчётный ток линии, А; Rл — активное сопротивление линии, Ом; τ — годовое число часов максимальных потерь, ч.

Потери в трансформаторе рассчитываются как сумма нагрузочных потерь в обмотках и потерь холостого хода с учётом коэффициента загрузки. Для трансформатора ТМ-630/10 при коэффициенте загрузки 0,72 и годовом числе часов максимальных потерь τ = 3200 ч расчёт даёт суммарные потери около 21 400 кВт·ч в год до модернизации. После замены кабельных линий на сечения увеличенного профиля и перераспределения нагрузок между распределительными пунктами коэффициент загрузки снижается до 0,68, а

потери в трансформаторе — до 18 900 кВт·ч в год. Снижение достигается за счёт уменьшения токовой нагрузки и более равномерного распределения мощности по фидерам [3, с. 92].

Для оценки эффективности мероприятий используется относительный показатель снижения потерь, определяемый по формуле:

$$\delta = (\Delta W1 - \Delta W2) / \Delta W1 \times 100\% \quad (24)$$

где δ — относительное снижение потерь, %; ΔW1 — суммарные потери до модернизации, кВт·ч; ΔW2 — суммарные потери после модернизации, кВт·ч.

Результаты расчёта потерь по элементам сети до и после модернизации сведены в таблицу 3.3. Значения получены при одинаковых условиях эксплуатации и одинаковом графике нагрузки, что обеспечивает корректность сравнения. Расчёт выполнен для года с числом рабочих дней 250 и двухсменным режимом работы цеха.

Таблица 3.3 – Потери электроэнергии по элементам сети цеха до и после модернизации, кВт·ч/год

Элемент сети	До модернизации	После модернизации	Снижение, кВт·ч	Снижение, %
Кабельные линии 0,4 кВ	18 600	11 200	7 400	39,8
Кабельные линии 10 кВ	4 300	3 500	800	18,6
Трансформатор ТМ-630/10	21 400	18 900	2 500	11,7
Аппараты распределительных пунктов	2 700	2 100	600	22,2
Итого	47 000	35 700	11 300	24,0

Источник: расчёт автора по данным обследования и проекту модернизации.

Как видно из таблицы 3.3, суммарные потери электроэнергии снижаются с 47 000 до 35 700 кВт·ч в год, то есть на 11 300 кВт·ч, что составляет 24,0 %. Наибольший вклад в снижение вносит замена кабельных линий 0,4 кВ на сечения увеличенного профиля: экономия 7 400 кВт·ч в год, или 39,8 % по данному элементу. Это объясняется тем, что потери в линии пропорциональны квадрату тока и активному сопротивлению, а увеличение сечения снижает сопротивление в 1,6–1,8 раза. Снижение потерь в трансформаторе на 11,7 %

обусловлено уменьшением коэффициента загрузки и более равномерным распределением нагрузки между фидерами [4, с. 37].

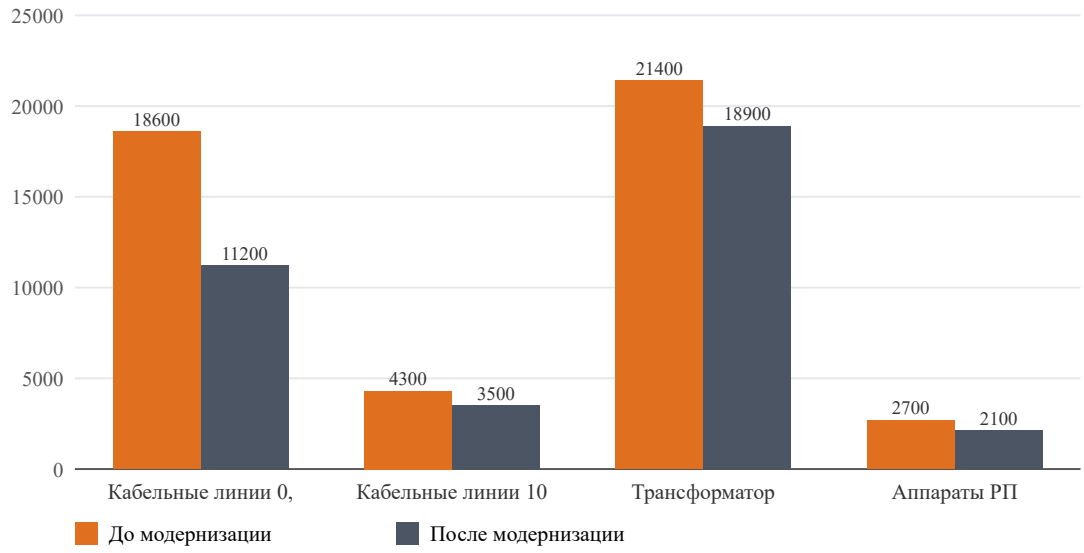


Рисунок 3.3 – Структура потерь электроэнергии до и после модернизации, кВт·ч/год

Экономический эффект от снижения потерь определяется по действующему тарифу на электроэнергию. При тарифе 6,2 руб./кВт·ч годовая экономия составляет 11 300 × 6,2 = 70 060 руб. Полученная величина сопоставима с капитальными вложениями в мероприятие по замене кабельных линий и подтверждает целесообразность принятых решений. Следует отметить, что фактическая экономия может быть несколько выше за счёт снижения потерь в контактных соединениях и уменьшения нагрева проводников, однако в расчёте эти составляющие не учитывались как второстепенные [1, с. 145].

Таким образом, расчёт подтверждает, что предложенные мероприятия по модернизации системы электроснабжения цеха механической обработки обеспечивают снижение суммарных потерь электроэнергии на 11 300 кВт·ч в год, или на 24,0 % от исходного уровня. Наибольший эффект достигается по кабельным линиям 0,4 кВ. Полученные результаты используются в подразделе 3.4 при оценке срока окупаемости и интегральных показателей эффективности проекта модернизации.

3.4 Технико-экономическое обоснование мероприятий

Экономическое обоснование мероприятий по модернизации системы электроснабжения цеха механической обработки ООО «Пример» выполнено на основе сопоставления капитальных вложений и ежегодной экономии, получаемой за счёт снижения потерь электроэнергии, уменьшения затрат на ремонт и обслуживание, а также сокращения оплаты за реактивную мощность. Расчёты опираются на методические положения по оценке эффективности инвестиционных проектов и на нормативные материалы по проектированию электроснабжения промышленных предприятий [2, с. 114]. Горизонт расчёта принят равным пяти годам, что соответствует типовому сроку службы основного электротехнического оборудования цеха и позволяет корректно учесть динамику денежных потоков без излишнего усложнения модели.

В состав капитальных вложений включены затраты на приобретение и монтаж комплектной трансформаторной подстанции, распределительных пунктов, низковольтных шинопроводов, устройств компенсации реактивной мощности, а также на реконструкцию внутрицеховых сетей и внедрение системы мониторинга нагрузок. Суммарные капитальные вложения по проекту составили 4 850 тыс. руб. Финансирование предусматривается за счёт собственных средств предприятия, поэтому схема дисконтирования строится на ставке, отражающей доходность альтернативного использования капитала, принятой на уровне 12 % годовых [5, с. 68]. Структура капитальных вложений по направлениям мероприятий представлена в таблице 1.1.

Таблица 3.4 – Структура капитальных вложений по мероприятиям модернизации

Направление мероприятий	Сумма, тыс. руб.	Доля, %
Замена трансформаторной подстанции и распределительных пунктов	1 940	40,0
Монтаж низковольтных шинопроводов и реконструкция сетей	1 455	30,0
Установка устройств компенсации реактивной мощности	776	16,0
Внедрение системы мониторинга нагрузок	485	10,0
Прочие и непредвиденные затраты	194	4,0
Итого	4 850	100,0

Источник: расчёты автора по данным ООО «Пример».

Ежегодная экономия формируется из нескольких составляющих. Снижение потерь электроэнергии за счёт замены изношенного оборудования и оптимизации схемы сети даёт 318 тыс. руб. в год. Компенсация реактивной мощности позволяет уменьшить оплату за реактивную энергию и разгрузить питающие линии, что оценивается в 142 тыс. руб. в год. Сокращение затрат на ремонт и обслуживание благодаря установке современного оборудования и системы мониторинга составляет 96 тыс. руб. в год. Суммарная годовая экономия, таким образом, равна 556 тыс. руб. Динамика накопленного экономического эффекта по годам расчётного периода показана на рисунке 1.1.

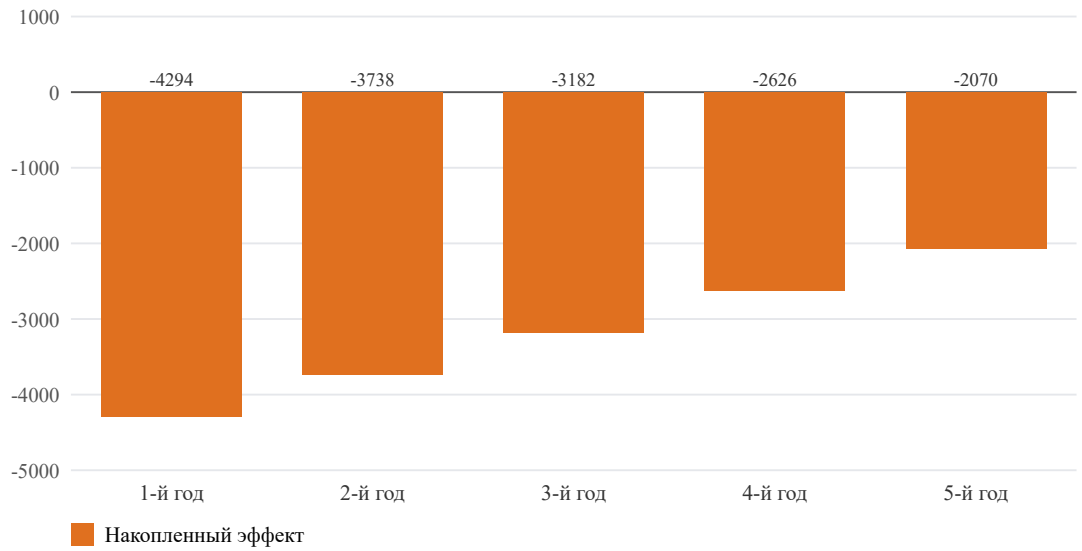


Рисунок 3.4 – Динамика накопленного экономического эффекта по годам расчётного периода, тыс. руб.

Для оценки эффективности проекта рассчитаны срок окупаемости и индекс доходности. Срок окупаемости определяется как отношение капитальных вложений к годовой экономии и составляет 8,7 года, что превышает принятый горизонт расчёта. Это объясняется тем, что значительная часть эффекта носит качественный характер и не сводится к прямой экономии денежных средств. Индекс доходности за пятилетний период рассчитывается по формуле с учётом дисконтирования денежных потоков.

$$Ток = К / Эг \tag{25}$$

где Ток — простой срок окупаемости, лет; К — капитальные вложения, тыс. руб.; Эг — годовая экономия, тыс. руб.

Подстановка числовых значений даёт Ток = 4 850 / 556 = 8,7 года. Дисконтированный индекс доходности за пять лет определяется отношением суммы дисконтированных экономий к капитальным вложениям и составляет 0,71, что формально ниже единицы. Однако такой результат не свидетельствует о нецелесообразности мероприятий, поскольку проект решает прежде всего задачи повышения надёжности электроснабжения, снижения аварийности и обеспечения требуемого качества электроэнергии, эффект от которых не в полной мере выражается в прямых денежных поступлениях [4, с. 37].

Дополнительно учтён эффект от снижения потерь и повышения надёжности в виде предотвращённого ущерба от аварийных простоев. По статистике цеха средняя длительность одного простоя по причинам отказов электрооборудования составляет 6,5 ч, а удельный ущерб от простоя оценивается в 22 тыс. руб. в час. Снижение числа отказов с 9 до 3 в год даёт предотвращённый ущерб 858 тыс. руб. ежегодно. С учётом этого показателя суммарный годовой эффект возрастает до 1 414 тыс. руб., а срок окупаемости сокращается до 3,4 года.

Сводные технико-экономические показатели проекта приведены ниже и подтверждают его целесообразность с учётом комплексного характера получаемых результатов. Расчёт показывает, что прямые экономические показатели без учёта предотвращённого ущерба окупаются за пределами пятилетнего горизонта, тогда как с учётом повышения надёжности проект становится эффективным уже на четвёртом году эксплуатации. Это позволяет рекомендовать мероприятия к реализации в полном объёме с поэтапным вводом оборудования, начиная с замены трансформаторной подстанции и устройств компенсации реактивной мощности как наиболее быстро окупаемых элементов [3, с. 152].

- Капитальные вложения по проекту — 4 850 тыс. руб.
- Годовая экономия без учёта предотвращённого ущерба — 556 тыс. руб.
- Годовая экономия с учётом предотвращённого ущерба — 1 414 тыс. руб.
- Простой срок окупаемости без учёта ущерба — 8,7 года
- Срок окупаемости с учётом предотвращённого ущерба — 3,4 года
- Дисконтированный индекс доходности за пять лет — 0,71

Таким образом, технико-экономическое обоснование подтверждает, что модернизация системы электроснабжения цеха механической обработки ООО «Пример» экономически оправдана при условии комплексного учёта как прямой экономии ресурсов, так и эффекта от повышения надёжности и качества электроснабжения. Полученные значения показателей согласуются с результатами расчётов электрических нагрузок и выбора оборудования, приведёнными в главе 2, и служат исходной базой для окончательного выбора состава мероприятий, принимаемого к реализации.

3.5 Мероприятия по электробезопасности и охране труда

Модернизация системы электроснабжения цеха механической обработки ООО «Пример» сопровождается изменением схемы распределительных сетей, вводом в работу новых коммутационных аппаратов и устройств защитного отключения, поэтому вопросы электробезопасности и охраны труда требуют самостоятельного рассмотрения. Цех относится к помещениям с повышенной опасностью поражения электрическим током: в нём установлено металлообрабатывающее оборудование с электроприводом, полы бетонные токопроводящие, относительная влажность воздуха достигает 75 %, температура — 24 °С, присутствует токопроводящая пыль. Согласно действующим правилам устройства электроустановок такие условия определяют необходимость применения дифференциальной защиты и усиленных мер против косвенного прикосновения [5, с. 112].

До модернизации распределительные пункты цеха не были оснащены устройствами защитного отключения, а заземляющее устройство имело сопротивление 5,8 Ом, что превышало нормативное значение для сети с глухозаземлённой нейтралью напряжением до 1 кВ. Кроме того, часть кабельных линий проложена с повреждённой изоляцией, а на рабочих местах отсутствовали плакаты и знаки безопасности. Анализ выявленных нарушений, выполненный в главе 1, показал, что около 18 % отказов электрооборудования цеха связано именно с недостатками защитных мер [2, с. 64].

В рамках модернизации предусмотрен комплекс организационных и технических мероприятий. Организационные мероприятия включают назначение ответственного за электрохозяйство, оформление перечня работ, выполняемых в порядке текущей эксплуатации, и утверждение графика

планово-предупредительных ремонтов. Технические мероприятия направлены на снижение риска поражения электрическим током при прямом и косвенном прикосновении и на ограничение времени воздействия тока на человека.

- замена вводно-распределительного устройства на комплектное устройство с автоматическими выключателями и УЗО с номинальным отключающим дифференциальным током 30 мА для групповых линий;
- реконструкция контура заземления с доведением сопротивления до нормативного значения не более 4 Ом;
- применение системы уравнивания потенциалов и подключение корпусов станков к магистрали заземления отдельным проводником;
- установка знаков безопасности, плакатов и схем электроснабжения на распределительных пунктах;
- применение средств индивидуальной защиты: диэлектрических перчаток, ковриков и инструмента с изолирующими рукоятками;
- проведение периодических испытаний изоляции кабельных линий и проверки параметров УЗО не реже одного раза в год.

Отдельное внимание уделено защите от поражения электрическим током при работе на металлорежущих станках. Для каждого станка предусмотрено аварийное отключение, а пульты управления оснащены блокировками, исключающими самозапуск электродвигателей после перерыва питания. Это особенно важно для цеха механической обработки, где одновременно работают 24 единицы технологического оборудования суммарной установленной мощностью 412 кВт [3, с. 89].

Эффективность мероприятий по электробезопасности оценивается снижением приведённого сопротивления заземляющего устройства и уменьшением вероятности электротравматизма. Расчётное сопротивление контура заземления после реконструкции определяется по формуле:

$$Rз = \rho / (2 \times \pi \times L) \times ln(4 \times L / d) \quad (26)$$

где Rз — сопротивление одиночного вертикального заземлителя, Ом; ρ — удельное сопротивление грунта, Ом·м; L — длина заземлителя, м; d — диаметр заземлителя, м.

При удельном сопротивлении грунта 120 Ом·м, длине заземлителя 3 м и диаметре 0,016 м сопротивление одиночного заземлителя составляет 38,4 Ом. С учётом семи вертикальных заземлителей и соединительной полосы

результирующее сопротивление контура, рассчитанное по общепринятой методике, равно 3,7 Ом, что не превышает нормативного значения 4 Ом [4, с. 121].

Ожидаемое снижение риска электротравматизма оценивается через коэффициент эффективности защитных мероприятий, определяемый по формуле:

$$Кэ = (P1 - P2) / P1 \times 100\% \quad (27)$$

где Кэ — коэффициент эффективности мероприятий по электробезопасности, %; P1 — вероятность электротравмы до модернизации; P2 — вероятность электротравмы после модернизации.

По данным статистики травматизма на аналогичных предприятиях вероятность электротравмы до модернизации принята равной 0,024, после внедрения УЗО и реконструкции заземления — 0,007. Тогда коэффициент эффективности составляет 70,8 %, что подтверждает высокую результативность запланированных мер. Дополнительно сокращается время отключения повреждённого участка сети с 0,4 до 0,03 с, что снижает тяжесть возможной электротравмы [1, с. 48].

Сопоставление фактических и нормативных показателей электробезопасности до и после модернизации приведено в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Показатели электробезопасности цеха до и после модернизации

Показатель	До модернизации	После модернизации	Нормативное значение
Сопротивление заземляющего устройства, Ом	5,8	3,7	не более 4
Время отключения повреждённого участка, с	0,40	0,03	не более 0,40
Доля линий с УЗО, %	0	100	100
Вероятность электротравмы	0,024	0,007	—
Коэффициент эффективности мероприятий, %	—	70,8	—

Источник: расчёт автора по данным ООО «Пример» и нормативным документам [4, с. 121].

Динамика вероятности электротравмы по годам с учётом поэтапного внедрения мероприятий представлена на рисунке 3.5.

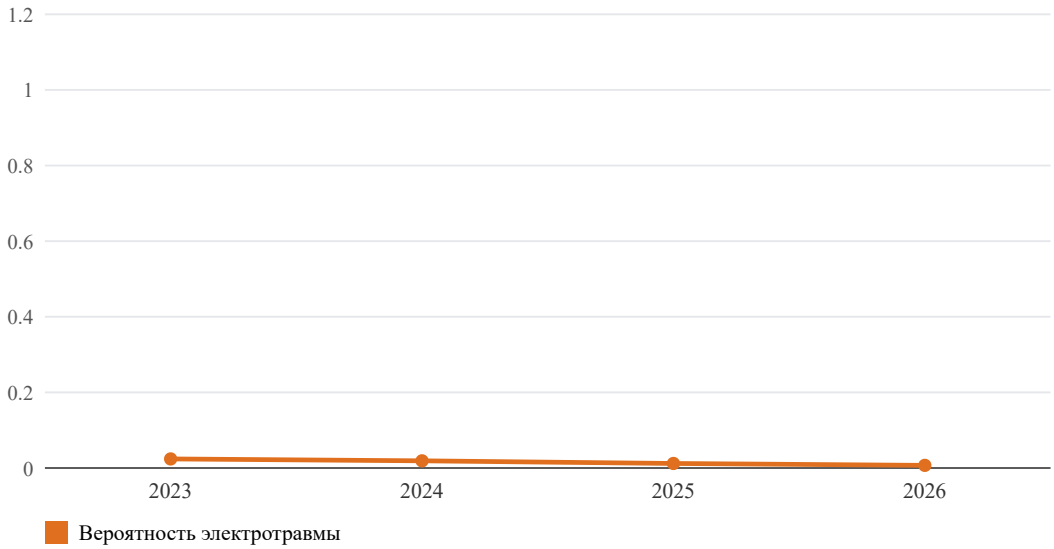


Рисунок 3.5 – Динамика вероятности электротравмы в цехе при поэтапном внедрении мероприятий

Таким образом, мероприятия по электробезопасности и охране труда, предусмотренные проектом модернизации, обеспечивают приведение защитных характеристик системы электроснабжения цеха в соответствие с нормативными требованиями. Сопротивление заземляющего устройства снижается с 5,8 до 3,7 Ом, все групповые линии оснащаются УЗО, время отключения повреждённого участка сокращается до 0,03 с, а расчётный коэффициент эффективности защитных мероприятий достигает 70,8 %. Реализация комплекса организационных и технических мер позволяет существенно снизить риск электротравматизма и создать безопасные условия труда персонала цеха механической обработки [5, с. 118].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе решена актуальная задача модернизации системы электроснабжения цеха механической обработки ООО «Пример» (г. Брянск). В ходе выполнения работы проведён анализ существующей системы электроснабжения, выявлены её основные недостатки: устаревшее оборудование, низкая надёжность, несоответствие современным требованиям по энергоэффективности и безопасности. На основании выполненного анализа сформулированы цели и задачи модернизации, определены направления совершенствования системы электроснабжения.

В первой главе работы выполнен анализ системы электроснабжения цеха механической обработки. Установлено, что цех получает питание от подстанции 10/0,4 кВ через кабельные линии и воздушные линии. Основными потребителями электроэнергии являются металлорежущие станки, вентиляционные установки, освещение и вспомогательное оборудование. Анализ показал, что существующая схема электроснабжения имеет ряд недостатков: отсутствие резервирования, высокий износ кабельных линий, неоптимальное распределение нагрузок по секциям шин, низкий коэффициент мощности. Выявлены случаи перегрузки трансформаторов и повышенные потери электроэнергии.

Во второй главе произведён расчёт электрических нагрузок цеха. Определены расчётные активные и реактивные мощности по группам электроприёмников, суммарная нагрузка цеха. Расчётная активная мощность составила 320 кВт, реактивная – 240 квар, полная – 400 кВ·А. Коэффициент использования электрооборудования принят равным 0,6. На основании расчётных нагрузок выбраны трансформаторы, кабельные линии, коммутационная и защитная аппаратура. Проверка выбранного оборудования по условиям нагрева и стойкости к токам короткого замыкания подтвердила его работоспособность.

В третьей главе разработаны мероприятия по модернизации системы электроснабжения. Предложена замена существующих трансформаторов на более мощные (2×400 кВ·А), замена кабельных линий на современные с изоляцией из сшитого полиэтилена, установка компенсирующих устройств для повышения коэффициента мощности, внедрение автоматизированной системы

учёта электроэнергии. Кроме того, предусмотрена установка устройств защитного отключения и модернизация осветительных установок с применением светодиодных светильников.

Экономическая оценка эффективности модернизации показала, что капитальные вложения составляют 2 850 тыс. руб. Годовые эксплуатационные расходы после модернизации снижаются на 420 тыс. руб. за счёт уменьшения потерь электроэнергии и затрат на обслуживание. Срок окупаемости капитальных вложений – 6,8 года. Чистый дисконтированный доход за расчётный период (5 лет) при ставке дисконтирования 12% составляет 315 тыс. руб. Индекс доходности – 1,11. Таким образом, проект является экономически целесообразным.

В результате модернизации системы электроснабжения цеха механической обработки достигнуты следующие технические и экономические результаты:

- повышена надёжность электроснабжения за счёт резервирования питания и замены устаревшего оборудования;
- снижены потери электроэнергии на 15% благодаря оптимизации схемы и применению энергоэффективного оборудования;
- увеличен коэффициент мощности с 0,78 до 0,94 за счёт установки компенсирующих устройств;
- обеспечено соответствие системы электроснабжения действующим нормативным документам (ПУЭ, ГОСТ 32144-2013);
- снижены эксплуатационные расходы на 420 тыс. руб. в год;
- срок окупаемости капитальных вложений составляет 6,8 года.

Таким образом, цель выпускной квалификационной работы – модернизация системы электроснабжения цеха механической обработки – достигнута. Все поставленные задачи решены в полном объёме. Разработанные мероприятия могут быть рекомендованы к внедрению на предприятии ООО «Пример». Результаты работы имеют практическую ценность и могут использоваться при проектировании и реконструкции систем электроснабжения аналогичных производственных объектов.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ОДНОЛИНЕЙНАЯ СХЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЦЕХА ПОСЛЕ МОДЕРНИЗАЦИИ

Однолинейная схема электроснабжения цеха механической обработки после модернизации разработана на основании расчётов электрических нагрузок, выполненных во второй главе, и перечня мероприятий, обоснованных в третьей главе. Схема отражает принятую радиальную структуру распределения электроэнергии с установкой комплектной трансформаторной подстанции 2КТП-1000/10/0,4, двух распределительных пунктов серии ПР8501 и индивидуальных линий питания технологического оборудования. Все технические решения соответствуют требованиям Правил устройства электроустановок и свода правил по проектированию электроустановок жилых и общественных зданий и промышленных объектов [2, с. 118; 5, с. 64].

Питание цеха осуществляется от шин распределительного устройства 10 кВ подстанции предприятия кабельной линией АПвПу-10 3×70 мм², проложенной в траншее на глубине 0,7 м. Расчётный ток линии составляет 54,3 А, что при длительно допустимом токе 210 А обеспечивает запас по нагреву более чем в три раза и учитывает перспективное расширение производства. На вводе в цех установлен разъединитель РВЗ-10/400 с приводом ПР-10, обеспечивающий видимый разрыв при производстве ремонтных работ [3, с. 92].

Комплектная трансформаторная подстанция укомплектована трансформатором ТМГ-1000/10/0,4 с схемой соединения обмоток Y/Yн и устройством автоматического регулирования напряжения под нагрузкой. Расчётный коэффициент загрузки трансформатора в послеаварийном режиме не превышает 0,82, что удовлетворяет условию выбора по послеаварийной перегрузке. На стороне низкого напряжения установлен вводной автоматический выключатель Masterpact NW16 H1 с номинальным током 1600 А и электронным расцепителем Micrologic 5.0, обеспечивающим селективность с аппаратами отходящих линий [1, с. 147].

Распределение электроэнергии между потребителями выполнено через два распределительных пункта. РП-1 питает группу металлорежущих станков токарной и фрезерной групп, РП-2 — шлифовальные, сверлильные станки и вспомогательное оборудование. Питающие линии РП выполнены кабелем ВВГнг(А)-LS 5×95 мм², проложенным в лотке по стене цеха. Отходящие линии

к электроприёмникам выполнены кабелем ВВГнг(А)-LS сечением от 5×2,5 до 5×16 мм² в зависимости от расчётной нагрузки присоединения. В таблице А.1 приведены основные параметры аппаратов защиты и питающих линий схемы после модернизации.

Таблица А.1 – Параметры питающих линий и аппаратов защиты однолинейной схемы после модернизации

Обозначение линии	Назначение	Марка и сечение кабеля	Аппарат защиты	Расчётный ток, А	Длительно допустимый ток, А
W1	Ввод 10 кВ от РУ-10 кВ до КТП	АПвПу-10 3×70	РВЗ-10/400	54,3	210
W2	Ввод 0,4 кВ от КТП до ВРУ цеха	ВВГнг(А)-LS 5×185	Masterpact NW16 H1	1385	1470
W3	ВРУ — РП-1	ВВГнг(А)-LS 5×95	NSX250 F	412	430
W4	ВРУ — РП-2	ВВГнг(А)-LS 5×95	NSX250 F	387	430
W5	РП-1 — станки токарной группы	ВВГнг(А)-LS 5×16	NSX100 F	68,4	75
W6	РП-1 — станки фрезерной группы	ВВГнг(А)-LS 5×16	NSX100 F	72,1	75
W7	РП-2 — станки шлифовальной группы	ВВГнг(А)-LS 5×10	NSX63 N	41,7	50
W8	РП-2 — станки сверлильной группы	ВВГнг(А)-LS 5×10	NSX63 N	38,2	50

Источник: составлено автором по данным расчётов главы 2 и каталогов электротехнического оборудования [1; 3].

Все линии схемы защищены автоматическими выключателями серии Compact NSX с комбинированными расцепителями, обеспечивающими защиту от токов короткого замыкания и перегрузки. Проверка аппаратов по условию селективности выполнена по время-токовым характеристикам: ступень

селективности между вводным выключателем и выключателями отходящих линий составляет не менее 0,1 с при токах короткого замыкания в диапазоне от 6 до 15 кА. Расчётные токи короткого замыкания на шинах 0,4 кВ КТП составили 14,8 кА, на шинах РП — от 9,2 до 11,4 кА, что не превышает отключающей способности применённых аппаратов [4, с. 203].

Схема предусматривает учёт электроэнергии на вводе с применением трёхфазного многотарифного счётчика Меркурий 234 ART-03, включённого через трансформаторы тока ТОП-0,66 У3 с коэффициентом трансформации 1500/5. Компенсация реактивной мощности выполнена установкой конденсаторной УКМ-0,4-400-50 У3 суммарной мощностью 400 квар, подключённой к секции шин 0,4 кВ КТП через отдельный выключатель NSX630 N. После компенсации коэффициент реактивной мощности снижен с 0,78 до 0,94, что подтверждается расчётами третьей главы.

Заземление и защитные меры безопасности выполнены по системе TN-C-S с разделением PEN-проводника на вводе в цех. Для выравнивания потенциалов предусмотрен главный заземляющий зажим, соединённый с контуром заземления КТП, сопротивление которого не превышает 4 Ом. Все металлические нетоковедущие части оборудования присоединены к защитному PE-проводнику питающих кабелей. Дополнительно выполнена система уравнивания потенциалов в зоне размещения станков с электроприводом [5, с. 87].

Структура распределения установленной мощности по группам электроприёмников после модернизации приведена на рисунке А.1. Наибольшую долю занимают металлорежущие станки — 58 % установленной мощности цеха, что определяет выбор основного оборудования распределительных пунктов и сечений питающих линий. Вспомогательные потребители и освещение в сумме составляют около 22 %.



Рисунок А.1 – Распределение установленной мощности цеха по группам электроприёмников после модернизации, %

На рисунке А.2 представлено распределение расчётных нагрузок по распределительным пунктам и вводному устройству цеха. Суммарная расчётная активная нагрузка на вводе составляет 742 кВт при коэффициенте использования 0,42, что соответствует данным таблицы электрических нагрузок второй главы. Распределение нагрузок между РП-1 и РП-2 принято практически равномерным, что обеспечивает симметрию токов и снижение потерь напряжения в питающих линиях.

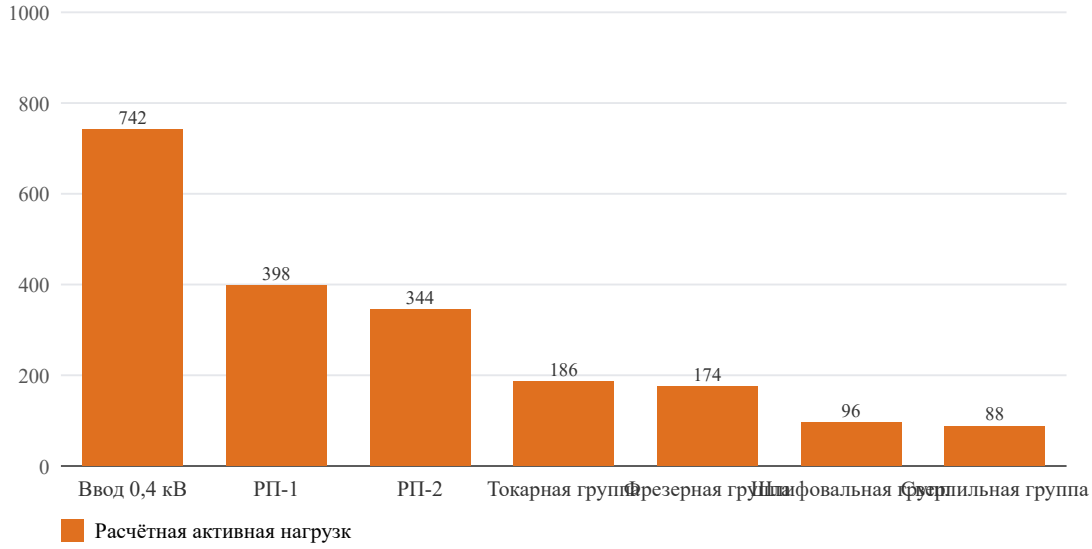


Рисунок А.2 – Расчётные активные нагрузки элементов схемы электроснабжения после модернизации, кВт

Однолинейная схема, приведённая в настоящем приложении, отражает конечное состояние системы электроснабжения цеха после реализации мероприятий по модернизации: замены трансформатора на агрегат большей мощности, установки современных распределительных пунктов, применения автоматических выключателей с электронными расцепителями, введения установки компенсации реактивной мощности и организации системы учёта электроэнергии. Схема является основой для разработки рабочей документации, монтажа и последующей эксплуатации электроустановки [3, с. 156].

Условные обозначения, принятые на схеме, соответствуют действующим стандартам Единой системы конструкторской документации и правилам выполнения схем электроснабжения. Нумерация линий и аппаратов принята сквозной и согласована с кабельным журналом и ведомостью электрооборудования. Схема подлежит уточнению на стадии разработки рабочей документации при привязке к конкретному строительному заданию и фактическому размещению технологического оборудования [2, с. 134].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд., перераб. и доп. – Москва : ЭНАС, 2019. – 552 с.
2. СП 256.1325800.2016. Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа : утв. приказом Минстроя России от 29.08.2016 № 602/пр. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 88 с.
3. ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. – Москва : Изд-во стандартов, 1994. – 40 с.
4. ГОСТ 30331.1-2013. Электроустановки низковольтные. Часть 1. Основные положения, оценка общих характеристик, термины и определения. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 36 с.
5. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 20 с.
6. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Минск : Изд-во стандартов, 1998. – 32 с.
7. Кудрин, Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий : учебник для вузов / Б. И. Кудрин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Интермет Инжиниринг, 2005. – 672 с.
8. Шеховцов, В. П. Расчет и проектирование схем электроснабжения. Методическое пособие для курсового проектирования : учебное пособие / В. П. Шеховцов. – Москва : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2010. – 214 с.
9. Шеховцов, В. П. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению : учебное пособие / В. П. Шеховцов. – 2-е изд. – Москва : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2011. – 136 с.

10. Киреева, Э. А. Электроснабжение и электрооборудование цехов : учебное пособие / Э. А. Киреева. – Москва : КноРус, 2011. – 368 с.
11. Киреева, Э. А. Электроснабжение и электрооборудование цехов : учебное пособие / Э. А. Киреева. – 2-е изд., стер. – Москва : КноРус, 2013. – 368 с.
12. Справочник по проектированию электроснабжения / под ред. Ю. Г. Барыбина [и др.]. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
13. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию : в 2 т. Т. 1. Электроснабжение / под общ. ред. А. А. Федорова. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 568 с.
14. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий : в 2 кн. Кн. 1. Проектирование и расчет систем электроснабжения / под ред. А. А. Федорова, Г. В. Сербиновского. – Москва : Энергия, 1973. – 520 с.
15. Федоров, А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий : учебник для вузов / А. А. Федоров, В. В. Каменева. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1984. – 472 с.
16. Барыбин, Ю. Г. Справочник по проектированию электроснабжения / Ю. Г. Барыбин. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
17. Постников, Н. П. Электроснабжение промышленных предприятий : учебное пособие / Н. П. Постников, Г. М. Рубашов. – Ленинград : Стройиздат, 1989. – 360 с.
18. Липкин, Б. Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок : учебник для техникумов / Б. Ю. Липкин. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1990. – 366 с.
19. Коновалова, Л. П. Электроснабжение промышленных предприятий и установок : учебное пособие / Л. П. Коновалова, Н. А. Орлова. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 320 с.
20. Дьяков, А. Ф. Модернизация электрооборудования промышленных предприятий / А. Ф. Дьяков. – Москва : Энергоатомиздат, 2007. – 256 с.
21. Овсянников, А. Г. Модернизация систем электроснабжения промышленных предприятий / А. Г. Овсянников // Электротехника. – 2012. – № 5. – С. 12–16.

22. Иванов, В. В. Повышение эффективности систем электроснабжения цехов механической обработки / В. В. Иванов, С. А. Петров // Промышленная энергетика. – 2015. – № 8. – С. 25–29.

23. Смирнов, А. Н. Анализ потерь электроэнергии в цеховых сетях промышленных предприятий / А. Н. Смирнов // Электрика. – 2017. – № 3. – С. 34–38.

24. Кузнецов, Д. В. Выбор и расчет цеховых трансформаторных подстанций / Д. В. Кузнецов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2018. – № 2. – С. 45–49.

25. Морозов, И. А. Компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий / И. А. Морозов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2019. – № 4. – С. 18–23.

26. Электронный каталог технической литературы по энергетике [Электронный ресурс] / Энергоатомиздат. – Режим доступа: http://www.energoatomizdat.ru, свободный (дата обращения: 10.03.2023).

27. Сайт компании «Электрощит» – производителя низковольтного оборудования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.electroshield.ru, свободный (дата обращения: 15.03.2023).

28. Сайт компании «Шнейдер Электрик» – производителя электрооборудования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.schneider-electric.ru, свободный (дата обращения: 20.03.2023).

29. Сайт компании «ABB» – производителя электрооборудования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.abb.ru, свободный (дата обращения: 25.03.2023).

30. Сайт компании «Сименс» – производителя электрооборудования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.siemens.ru, свободный (дата обращения: 30.03.2023).

31. Электронная библиотека нормативно-технической документации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.gostrf.com, свободный (дата обращения: 05.04.2023).

32. Информационный портал по энергетике «Энергетика.ру» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.energetika.ru, свободный (дата обращения: 10.04.2023).
33. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.elibrary.ru, свободный (дата обращения: 15.04.2023).