

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

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки / специальности)

Электроснабжение

(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Электроснабжение производственного корпуса ООО «СтилМет»

Обучающийся

В.А. Тептерева

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, А.Н. Черненко

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

Тольятти 2023

Аннотация

Бакалаврская работа направлена на разработку технических мероприятий по реконструкции системы электроснабжения предприятия по выпуску заготовок и металлоконструкций с целью обеспечения электроприемников предприятия электроэнергией надлежащего качества и с требуемыми показателями надежности.

При выполнении работы было дано краткое описание направлений развития электроэнергетического комплекса, что позволило сформулировать цель работы и основные, решаемые в ней задачи.

Выполнены расчеты ожидаемых расчетных нагрузок в главном производственном корпусе предприятия.

Произведен выбор светильников для системы внутреннего освещения производственного корпуса и их количества, позволяющего обеспечить требуемые нормы освещенности на рабочих поверхностях.

При разработке мероприятий произведен выбор числа и номинальной мощности силовых трансформаторов на цеховой КТП, снабжающей электроэнергией главный корпус, решены вопросы компенсации реактивной мощности.

Произведен выбор коммутационно-защитной аппаратуры и проводников для внутрицеховой системы электроснабжения.

Выполнен расчет максимальных значений токов короткого замыкания в сети предприятия.

Произведено определение параметров системы защитного заземления на территории главного корпуса.

Выпускная квалификационная работа состоит из пояснительной записки объемом в 55 листов формата А4, включающей 2 рисунка и 9 таблиц с результатами расчетов и характеристиками выбранного оборудования. Графическая часть бакалаврской работы включает в себя шесть листов А1.

Содержание

Введение.....	4
1 Краткое описание объекта проектирования и выпускаемой им продукции..	5
1.1 Металлоконструкции различного назначения	6
1.2 Металлические заготовки.....	6
2 Определение расчетных электрических нагрузок в производственном корпусе	8
3 Определение электрической нагрузки системы искусственного освещения корпуса	21
4 Определение необходимой мощности СТ и КУ в цеховой подстанции	27
5 Определение значений токов КЗ	37
5.1 Расчет токов короткого замыкания в расчетной точке №1	39
5.2 Расчет токов короткого замыкания в расчетной точке №2	42
5.3 Расчет токов короткого замыкания в расчетной точке №3	43
6 Выбор и проверка коммутационно-защитных аппаратов и проводников в системе внутрицехового электроснабжения	45
7 Определение параметров системы заземления производственного корпуса	49
Заключение	51
Список используемых источников.....	53

Введение

Система электроснабжения является подсистемой системы энергоснабжения и включает в себя электрооборудование и электрические сети для передачи электрической энергии ко всем объектам городской и промышленной инфраструктуры, таким как жилые многоквартирные и индивидуальные дома, объекты коммунального хозяйства, административные и торговые предприятия и здания, объекты растениеводства и животноводства в агропромышленном комплексе, промышленные предприятия различных отраслей. Кроме того, система электроснабжения является неотъемлемой частью производственного процесса и от ее функционирования зависит не только качество выпускаемой продукции, но и в общем возможность ее производства.

На любом предприятии идет непрерывный процесс изменения технологического процесса, меняется оборудование, добавляются новые и убираются старые производства, что приводит к необходимости подстройки под технологический процесс и системы электроснабжения предприятия, поэтому данная система должна обладать определенной гибкостью и способностью к трансформации без производства капитальных строительных работ и замены большого числа оборудования. Особую актуальность приобретает вопрос проектирования системы электроснабжения не только под текущие потребности, но и с учетом перспектив развития предприятия и изменения состава, мощности и расположения электрических нагрузок в будущем.

Цель работы заключается в обеспечении выполнения требований к надежности электроснабжения потребителей производственного корпуса ООО «СтилМет». Одной из составных частей проектирования системы электроснабжения является выбор современного электрооборудования, обладающего лучшими технико-экономическими показателями по сравнению с аналогами отечественного и зарубежного производства.

1 Краткое описание объекта проектирования и выпускаемой им продукции

Объект проектирования, рассматриваемый в данной работе, размещается в городе Самара. Основная деятельность предприятия приходится на изготовление металлических изделий и их обработку: производство металлоконструкций как типового назначения, так и специального, по чертежам, предоставленным заказчиками работ.

«Изделий из металла существует огромное множество, а возможности применения металлов поистине безграничны. Современное строительство и любые виды производства просто невозможно представить без металлов. Изготовление изделий из металла зависит от свойств, которые этим изделиям нужно предать. И вот как этого добиваются:

Для начала же металл формируют; при этом различают несколько методов формирования:

- ковка;
- литье;
- штамповка;
- волочение;
- прессование;
- методы порошковой металлургии;
- другие методы.

После формирования изделия подвергаются термической или химической обработке для придания металлу нужных свойств. Последний шаг – это отделка изделия.

Процесс изготовления изделий из металла очень трудоемкий, и такое производство требует значительных инвестиций.

Оборудование для формирования изделий специфическое, громоздкое и дорогостоящее. Кроме того, для производства металла требуются

значительные производственные площади, доступ к энергоресурсам и квалифицированная рабочая сила.

Тем не менее, зачастую инвестиции в производство по изготовлению изделий из металлов быстро окупаются, и такой бизнес приносит значительный доход своему собственнику. Всё дело в том, что будь то обычный металлопрокат или сложные специфические металлоконструкции – спрос на такие изделия есть всегда. Если где-то ведется строительство, почти наверняка там требуются и металлоизделия самой широкой номенклатуры» [2]. В дальнейших подразделах приводится краткая характеристика номенклатуры выпускаемых предприятием металлоизделий.

1.1 Металлоконструкции различного назначения

«Под металлоконструкциями понимают специальные металлические конструкции, которые применяют в строительстве. Этот вид стройматериалов достаточно новый – впервые данную технологию начали применять только в конце 19-го века. С тех пор металлоконструкции получили широчайшее распространение.

Изготовление изделий из металла этого типа достаточно специфично. Металлоконструкции сооружают из первичных стальных прокатных элементов, которые могут быть различного профиля. Первичные элементы соединяют при помощи сварки, пайки, клепания или болтов для получения более сложных типовых конструктивных элементов, которые затем используются по назначению» [2].

1.2 Металлические заготовки

Металлические заготовки можно условно разделить на несколько укрупненных групп:

- а) «Заготовки из проката. Прут горячекатаного проката, по сути, является непрерывной заготовкой. Нарезанный прут также является

заготовкой, но уже мерной;

- б) Заготовки, получаемые методом литья, широко распространены. Различают несколько групп отливок в зависимости от сложности их получения. Наиболее простые отливки – это литье простой геометрической формы;
- в) Заготовки, которые получают обработкой давлением. Ковка используется в процессе получения заготовок сравнительно редко. Заготовки повышенной точности получают методом штамповки (в том числе штамповкой в закрытых штампах). Именно этот метод позволяет получать заготовки, наиболее приближенные по качеству и конфигурации к готовому изделию. Кроме того, обработка давлением в закрытых штампах является наиболее экономичной с точки зрения расхода металла.
- г) Сварные заготовки;
- д) Комбинированные заготовки;
- е) Заготовки, которые формируют при помощи методов порошковой металлургии» [2].

Выводы по разделу: в данном разделе приводится краткая характеристика предприятия, его месторасположение, виды выпускаемой продукции, ее применение в различных отраслях промышленности и строительства и направления перспективного развития на ближайшие годы.

2 Определение расчетных электрических нагрузок в производственном корпусе

«Расчетная активная P_p и реактивная Q_p мощность - это мощность, соответствующая такой неизменной токовой нагрузке I_p , которая эквивалентна фактической изменяющейся во времени нагрузке по наибольшему возможному тепловому воздействию на элемент системы электроснабжения. Вероятность превышения фактической нагрузки над расчетной не более 0,05 на интервале осреднения, длительность которого принята равной трем постоянным времени нагрева элемента системы электроснабжения $3T_0$, через который передается ток нагрузки (кабеля, провода, шинпровода, трансформатора и т.д.).

Для одиночных ЭП расчетная мощность принимается равной номинальной, для одиночных ЭП повторно-кратковременного режима - равной номинальной, приведенной к длительному режиму.

Метод определения расчетной электрической нагрузки зависит от стадии проектирования системы электроснабжения, то есть от располагаемого объема исходной информации» [3-5].

Расчетная нагрузка, которую необходимо определить это такое постоянное во времени значение мощности, которое оказывает тот же тепловой эффект на проводники и аппараты, что и реальное изменяющееся во времени значение мощности.

При работе одиночного ЭП в продолжительном режиме работы его паспортная мощность принимается равной номинальной и в таком виде используется в дальнейших расчетах:

$$P_n = P_{пасп}, \quad (1)$$

где $P_{пасп}$ – паспортная мощность одного ЭП.

Во всех других режимах, отличных от продолжительного, предварительно значение нагрузки ЭП необходимо привести к продолжительному режиму или к ПВ 100%.

Мощность электроприемников, работающих в режиме ПКР приводится к продолжительному режиму путем пересчета паспортной мощности, умноженной на корень из процента включения ЭП:

$$P_n = P_{насч} \cdot \sqrt{ПВ}, \quad (2)$$

где ПВ – продолжительность включения в относительных единицах.

У сварочных машин и трансформаторов, задаваемых полной мощностью предварительно определяется значение активной мощности путем умножения на коэффициент мощности, определяемый по справочным или паспортным данным:

$$P_n = S_{насч} \cdot \cos \varphi, \quad (3)$$

где $S_{насч}$ – полное значение паспортной мощности;

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности.

при работе этих же ЭП в режиме ПКР в произведение добавляется корень из ПВ:

$$P_n = S_{насч} \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{ПВ}, \quad (4)$$

При наличии в схеме однофазных электроприемников их мощность перед заполнением итоговой таблицы необходимо привести к условному трехфазному значению. Расчетные формулы зависят от напряжения, на котором работают однофазные электроприемники, это может быть фазное значение или линейное. В любом случае предварительно однофазные ЭП

распределяются по фазам таким образом, чтобы получилась максимальная равномерность распределения нагрузки по фазам. Далее при включении ЭП на линейное напряжение определяется мощность каждой фазы путем сложения мощностей ЭП в смежных фазах и деления ее пополам:

$$P_A = \frac{P_{AB} + P_{AC}}{2}, \quad (5)$$

$$P_B = \frac{P_{AB} + P_{BC}}{2}, \quad (6)$$

$$P_C = \frac{P_{AC} + P_{BC}}{2}. \quad (7)$$

На следующем этапе проверяется величина неравномерности, с которой распределена нагрузка по каждой из фаз:

$$H = \frac{P_{\Phi_{\text{наиб}}} - P_{\Phi_{\text{наим}}}}{P_{\Phi_{\text{наим}}}} \cdot 100\%. \quad (8)$$

При превышении найденным значением порогового значения в 15% условное значение мощности во всех трех фазах определяется путем умножения мощности одной фазы с наибольшей нагрузкой на 3:

$$P_y = 3 \cdot P_{\Phi_{\text{наиб}}}, \quad (9)$$

где P_y – условная трехфазная активная мощность группы однофазных ЭП.

При неравномерности распределения нагрузки по фазам не превышающей значения в 15% условное значение мощности во всех трех фазах определяется путем сложения номинальных однофазных мощностей во всех трех фазах.

После этого переходят к заполнению таблицы с расчетами нагрузок. Групповое значение мощности определяется как произведение мощности одного ЭП из группы на их количество:

$$P_{n\Sigma} = P_n \cdot n, \quad (10)$$

где $P_{n\Sigma}$ – активная мощность группы одинаковых ЭП;

P_n – номинальная мощность одного ЭП;

n – число ЭП в группе.

Средняя активная мощность, потребляемая ЭП рассчитывается для наиболее загруженной смены и определяется как произведение групповой активной мощности на справочное значение коэффициента использования [1]:

$$P_{cm} = P_{n\Sigma} \cdot K_u, \quad (11)$$

где P_{cm} – среднесменная мощность группы ЭП;

K_u – коэффициент использования для данной группы ЭП.

Средняя реактивная мощность, потребляемая ЭП рассчитывается для наиболее загруженной смены и определяется как произведение среднесменной активной мощности на коэффициент реактивной мощности:

$$Q_{cm} = P_{cm} \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (12)$$

где Q_{cm} – реактивная средняя за наиболее загруженную смену мощность группы ЭП;

$\operatorname{tg} \varphi$ – отношение реактивной мощности к активной мощности ЭП (определяется по справочным таблицам).

Для итоговой строки по узлу питания от которого получают электроэнергию несколько групп электроприемников определяются значения

группового коэффициента использования как результат деления суммы среднесменных групповых активных мощностей на сумму номинальных групповых активных мощностей,

$$K_{изр} = \frac{\sum P_{см}}{P_{н\Sigma}}, \quad (13)$$

где $K_{изр}$ – групповой коэффициент использования;

$\sum P_{см}$ – суммарная среднесменная мощность;

$P_{н\Sigma}$ – суммарная номинальная мощность группы ЭП.

А значение группового коэффициента реактивной мощности как результат деления суммы среднесменных групповых реактивных мощностей на сумму среднесменных групповых активных мощностей:

$$tg\varphi_{гр} = \frac{\sum Q_{см}}{\sum P_{см}}, \quad (14)$$

где $tg\varphi_{гр}$ – групповой коэффициент реактивной мощности;

$\sum Q_{см}$ – сумма среднесменных реактивных мощностей групп ЭП;

$\sum P_{см}$ – сумма среднесменных активных мощностей групп ЭП.

Определяем показатель силовой сборки как отношение мощности самого мощного одного электроприемника к единичной мощности самого маленького по мощности из электроприемников, подключенных к узлу питания [13]:

$$m = \frac{P_{н.\max}}{P_{н.\min}}, \quad (15)$$

где m – показатель силовой сборки, характеризующий во сколько раз различаются мощности одиночных ЭП в группе.

В итоговой строке определяем эффективное число электроприемников путем деления квадрата суммы номинальных мощностей отдельных ЭП на сумму квадратов:

$$n_э = \frac{\sum (P_i)^2}{\sum (P_i^2 \cdot n)}, \quad (16)$$

где $n_э$ – эффективное число ЭП;

n – число ЭП в группе фактическое.

Поскольку вычисления по формуле 16 могут быть достаточно громоздкими при большом числе различных групп электроприемников, то была выведена формула, позволяющая с достаточной точностью определить эффективное число электроприемников на шинах низкого напряжения трансформаторных подстанций или для магистральных шинопроводов, то есть в местах с достаточно большой постоянной времени нагрева [18]:

$$n_э = 2 \cdot \frac{\sum P_{н\Sigma}}{P_{н.наиб}}, \quad (17)$$

где $P_{н.наиб}$ – номинальная мощность одного самого мощного ЭП.

Далее переходим к определению расчетных значений мощностей. Расчетное значение активной мощности определяем как произведение среднесменного значения нагрузки на коэффициент максимума, определяемый по справочным таблицам либо графикам в зависимости от расположения узла нагрузки:

$$P_p = K_m \cdot \sum P_{cm}, \quad (18)$$

где P_p – расчётная активная мощность силовых ЭП;

K_m – табличное значение коэффициента максимума.

Затем производим расчет реактивной расчетной мощности, выбор расчетной формулы зависит от полученного ранее эффективного количества электроприемников:

- при их числе, не превышающем 10 используется формула [20]:

$$Q_p = 1,1 \cdot \sum Q_{cm}, \quad (19)$$

где Q_p – расчётная реактивная мощность силовых ЭП.

- если их по расчетам оказывается больше 10, то расчетное значение мощности просто принимается равным среднесменному групповому значению:

$$Q_p = \sum Q_{cm}, \quad (20)$$

Полная расчетная мощность как и в любом другом случае может быть найдена как корень из суммы квадратов активной и реактивной расчетных мощностей, определенных по предыдущим формулам:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}, \quad (21)$$

где S_p – полная расчётная мощность силовых ЭП.

Расчетный ток определяется путем деления полной расчетной мощности на корень из трех и номинальное значение напряжения в узле питания:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_n}, \quad (22)$$

где I_p – расчётное значение тока;

U_n – номинальное значение напряжение, при расчетах низковольтных ЭП принимается равным 0,4 кВ.

В качестве примера производим расчет нагрузок для точношлифовальной установки и распределительного пункта в целом от которого она получает питание.

Групповое значение мощности определяется как произведение мощности одного ЭП, которое составляет 4,5 кВт из группы на их количество, которое равно 4:

$$P_{n\Sigma} = 4,5 \cdot 4 = 18 \text{ кВт}.$$

Коэффициент использования и коэффициент мощности для данного тапа электроприемников определяется по справочным таблицам или их оцифрованным копиям, доступным в сети Интернет в зависимости от отрасли и производства, в котором расположена данная группа электроприемников.

Средняя активная мощность, потребляемая ЭП рассчитывается для наиболее загруженной смены и определяется как произведение групповой активной мощности на справочное значение коэффициента использования:

$$P_{cm} = 18 \cdot 0,65 = 3,1 \text{ кВт}.$$

Средняя реактивная мощность, потребляемая ЭП рассчитывается для наиболее загруженной смены и определяется как произведение среднесменной активной мощности на коэффициент реактивной мощности:

$$Q_{см} = 3,1 \cdot 1,17 = 3,6 \text{ квар.}$$

Определяем эффективное число электроприемников на шинах низкого напряжения трансформаторных подстанций или для магистральных шинопроводов, а также в распредпунктах по упрощенной формуле [17]:

$$n_э = 2 \cdot \frac{230}{35} \approx 13.$$

Расчетное значение активной мощности определяем как произведение среднесменного значения нагрузки на коэффициент максимума, определяемый по справочным таблицам либо графикам в зависимости от расположения узла нагрузки и равный для распредпункта и данного количества эффективных электроприемников и группового коэффициента использования 1,05:

$$P_p = 1,05 \cdot 87,9 = 92,3 \text{ кВт.}$$

Поскольку эффективное число электроприемников превышает 10 штук, то расчетное значение мощности просто принимается равным среднесменному групповому значению:

$$Q_p = 116,4 \text{ квар.}$$

Полная расчетная мощность как и в любом другом случае может быть найдена как корень из суммы квадратов активной и реактивной расчетных мощностей, определенных по предыдущим формулам [16]:

$$S_p = \sqrt{92,3^2 + 116,4^2} = 148,5 \text{ кВА.}$$

Расчетный ток определяется путем деления полной расчетной мощности на корень из трех и номинальное значение напряжения в узле питания:

$$I_p = \frac{148,5}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 214,7 \text{ А.}$$

Все расчеты для каждой группы электроприемников и по каждому из распределительных пунктов выполняем по формулам, приведенным выше и в соответствии с разобранным примером, а полученные результаты расчетов заносим в таблицы 1-5.

Выводы по разделу: в результате проведенных расчетов были определены значения расчетных нагрузок как от системы внутреннего освещения производственного корпуса, которые составили 11,7 кВт активной расчетной мощности и 1,9 квар реактивной расчетной мощности. Кроме главного производственного корпуса от данной ТП получают питание и другие производственные объекты суммарные расчетные нагрузки, по которым составляют 488 кВт активной мощности и 532 квар реактивной мощности. Суммируя полученные расчетные значения для силовых электроприемников по всем пяти распределительным пунктам главного корпуса, а также значения осветительной и нагрузки других производственных корпусов было установлено суммарное значение расчетной мощности на шинах низкого напряжения цеховой трансформаторной подстанции, которое составило 678 кВт активной мощности и 746 квар реактивной без учета компенсирующих устройств.

Таблица 1 – Расчеты по определению среднесменных групповых нагрузок и итоговой расчетной и суммарной среднесменной нагрузки по РП№1

Наименование группы электроприемников	P_n , кВт	n , шт	$P_{n\Sigma}$, кВт	$K_{Игр}$	$tg\phi$	m	$P_{CM\Sigma}$, кВт	$Q_{CM\Sigma}$, квар	$n_{Э}$, шт	K_M	P_p , кВт	Q_p , квар	S_p , кВА	I_p , А
Горизонтальные токарно шлифовальные станки R-200 INDEX-WERKE	4,5	4	18	0,17	0,65/1,17	-	3,06	3,58	-	-	-	-	-	-
Станки газоплазменной резки Voltmash	35	4	140	0,4	0,6/1,33	-	56	74,48	-	-	-	-	-	-
Электрохимические гальванические ванны СтанкоСаратов	18	4	72	0,4	0,6/1,33	-	28,8	38,3	-	-	-	-	-	-
Итого по узлу РП№1	35/4,5	12	230	0,38	1,32	>3	87,9	116,4	13	1,05	92,3	116,4	148,5	214,7

Таблица 2 – Расчеты по определению среднесменных групповых нагрузок и итоговой расчетной и суммарной среднесменной нагрузки по РП№2

Наименование группы электроприемников	P_n , кВт	n , шт	$P_{n\Sigma}$, кВт	$K_{Игр}$	$tg\phi$	m	$P_{CM\Sigma}$, кВт	$Q_{CM\Sigma}$, квар	$n_{Э}$, шт	K_M	P_p , кВт	Q_p , квар	S_p , кВА	I_p , А
Машины контактной точечной сварки ТСС МТР-10	42	5	210	0,2	0,65/1,17	-	42	49,14	-	-	-	-	-	-
Машины стыковой сварки проволоки СЕА с пневматическим приводом серии SRT и SQ/A	14	3	42	0,2	0,65/1,17	-	8,4	9,83	-	-	-	-	-	-
Итого по узлу РП№2	42/14	8	252	0,2	1,17	>3	50,4	59	8	1,5	74,6	64,9	98,8	142,8

Таблица 3 – Расчеты по определению среднесменных групповых нагрузок и итоговой расчетной и суммарной среднесменной нагрузки по РП№3

Наименование группы электроприемников	P_n , кВт	n , шт	$P_{n\Sigma}$, кВт	$K_{Игр}$	$tg\phi$	m	$P_{CM\Sigma}$, кВт	$Q_{CM\Sigma}$, квар	$n_{Э}$, шт	K_M	P_p , кВт	Q_p , квар	S_p , кВА	I_p , А
JET BD-8VS Настольные токарные станки по металлу	1,5	3	4,5	0,14	0,4/2,29	-	0,84	1,92	-	-	-	-	-	-
Прессы кривошипные КД2124 для холодно-штамповочных работ	3,8	1	3,8	0,17	0,65/1,17	-	1,29	1,51	-	-	-	-	-	-
Станки фрезерные вертикальные консольные модели WM5042 с УЦИ	11	2	22	0,14	0,4/2,29	-	3,08	7,05	-	-	-	-	-	-
JET GH-1640 ZX DRO Токарно-винторезные станки серии ZX индустриального класса	7,5	2	15	0,14	0,4/2,29	-	2,1	4,8	-	-	-	-	-	-
Итого по узлу РП№3	11/1,5	8	45,3	0,14	2,17	>3	6,45	14	5	2,1	13,5	15,4	20,5	29,6

Таблица 4 – Расчеты по определению среднесменных групповых нагрузок и итоговой расчетной и суммарной среднесменной нагрузки по РП№4

Наименование группы электроприемников	P_n , кВт	n , шт	$P_{n\Sigma}$, кВт	$K_{Игр}$	$tg\phi$	m	$P_{CM\Sigma}$, кВт	$Q_{CM\Sigma}$, квар	$n_{Э}$, шт	K_M	P_p , кВт	Q_p , квар	S_p , кВА	I_p , А
Автоматический бухторазмотчик Элинтек 300	5,5	1	5,5	0,14	0,5/1,73	-	0,77	1,33	-	-	-	-	-	-
Гидравлические гильотинные ножницы НГ3418.01	6,5	2	13	0,14	0,5/1,73	-	1,82	3,15	-	-	-	-	-	-
Правильно гибочные станки для арматуры БАЗИСМАШ БПВ 4-14	5	2	10	0,14	0,4/2,29	-	1,4	3,2	-	-	-	-	-	-
Консольные краны РОЛТЭК	3,6	1	3,6	0,2	0,65/1,17	-	0,72	0,84	-	-	-	-	-	-
Малотоннажные электромеханические листогибы SafanDarley E-Brake ECO	15	2	30	0,17	0,65/1,17	-	5,10	5,97	-	-	-	-	-	-

Продолжение таблицы 4

Наименование группы электроприемников	P_n , кВт	n , шт	$P_{n\Sigma}$, кВт	$K_{пер}$	$tg\phi$	m	$P_{CM\Sigma}$, кВт	$Q_{CM\Sigma}$, квар	$n_{Э}$, шт	K_M	P_p , кВт	Q_p , квар	S_p , кВА	I_p , А
Станки для 3D гибки проволоки YSM серии CNC-BW100	14,5	2	29	0,14	0,4/2,29	-	4,06	9,30	-	-	-	-	-	-
Итого по узлу РП№4	15/5	10	91,1	0,15	1,74	>3	13,9	24,4	6	1,96	27,3	26,8	38,3	55,3

Таблица 5 – Расчеты по определению среднесменных групповых нагрузок и итоговой расчетной и суммарной среднесменной нагрузки по РП№5

Наименование группы электроприемников	P_n , кВт	n , шт	$P_{n\Sigma}$, кВт	$K_{пер}$	$tg\phi$	m	$P_{CM\Sigma}$, кВт	$Q_{CM\Sigma}$, квар	$n_{Э}$, шт	K_M	P_p , кВт	Q_p , квар	S_p , кВА	I_p , А
JET BD-8VS Настольные токарные станки по металлу	1,5	1	1,5	0,14	0,4/2,29	-	0,21	0,48	-	-	-	-	-	-
Правильно гибочные станки для арматуры БАЗИСМАШ БПВ 4-14	5	1	5	0,14	0,4/2,29	-	0,7	1,6	-	-	-	-	-	-
Машины контактной точечной сварки ТСС МТР-10	42	1	42	0,2	0,65/1,17	-	8,4	9,82	-	-	-	-	-	-
Прессы кривошипные КД2124 для холодноштамповочных работ	3,8	1	3,8	0,17	0,65/1,17	-	0,64	0,74	-	-	-	-	-	-
JET GH-1640 ZX DRO Токарно-винторезные станки серии ZX индустриального класса	7,5	1	7,5	0,14	0,4/2,29	-	1,05	2,4	-	-	-	-	-	-
Итого по узлу РП№5	42/1,5	5	59,8	0,18	1,36	>3	11	15	2	3,4	37,3	16,5	40,8	58,9
Всего без ОУ	42/1,5	43	678,2	0,25	1,35	>3	169,6	228,3	32	1,05	178,1	228,3	289,6	418,4

3 Определение электрической нагрузки системы искусственного освещения корпуса

Правильный выбор источников света важен не только с точки зрения обеспечения возможности проведения работ в условиях закрытого помещения, но еще необходим для поддержания здоровья и исключения зрительного дискомфорта у работающего персонала предприятия. «Правильно спроектированное и рационально выполненное освещение оказывает положительное психофизиологическое воздействие на работающих, способствует повышению безопасности и эффективности труда (качества выпускаемой продукции), снижает утомление, сохраняет высокую работоспособность.

Освещение характеризуется количественными и качественными показателями. Количественные показатели: световой поток, сила света, освещенность, яркость. Качественные показатели, фон, контраст объекта с фоном, коэффициент пульсации освещенности, спектральный состав света» [6] - [9].

Для определения нагрузок системы электрического освещения, выбора числа и типа светильников используется либо точечный метод, либо метод коэффициента использования светового потока, который и применим в данной работе.

Для обеспечения эффекта естественного освещения с высоким уровнем индекса цветопередачи в помещениях в которых выполняются полировочные работы по металлу используем светильники ЛПП-07В с установкой 2 люминесцентных ламп по 58 Вт каждая, с ЭлПРА, что позволяет избежать пульсаций светового потока и благоприятно сказывается на самочувствии и работоспособности персонала предприятия.

Определяем номинальную потребляемую мощность одним светильником как произведение количества размещаемых в нем ламп на мощность одной лампы:

$$P = P_{\text{лампы}} \cdot n, \quad (23)$$

где $P_{\text{лампы}}$ – номинальная мощность одной лампы в осветительной установке;

n – число ламп в осветительной установке.

$$P = 58 \cdot 2 = 116 \text{ Вт}.$$

Определяем по справочным данным производителя ламп паспортный световой поток для одной лампы необходимой цветовой температуры:

$$\Phi_l = 8000 \text{ лм},$$

По данным производителя светильника в месте ЭлПРА он позволяет обеспечить коэффициент мощности не хуже [12]:

$$\cos \phi = 0,92.$$

Для выполнения последующего расчета используются следующие исходные данные по нормируемой освещенности и геометрическим размерам помещения, и условиям эксплуатации системы освещения.

В расчетах в соответствии с требованиями СНиП и СанПин принимаем нормативное значение освещенности на горизонтальной рабочей поверхности равным [14]:

$$E = 300 \text{ лк}.$$

Поскольку в помещениях принимаются дополнительные меры по обеспыливанию воздуха, то по условиям окружающей среды их можно

отнести к чистым и в расчетах принять коэффициент запаса по световому потоку равным 1,5.

Расстояние от светильника до потолка при его непосредственном креплении к потолочным конструкциям принимается равным:

$$h_1 = 0 \text{ м} .$$

Высота рабочей поверхности от уровня чистового пола, на которой производится большая часть технологических операций принимается равной:

$$h_2 = 1 \text{ м} .$$

Общая высота производственных помещений составляет:

$$H = 3,3 \text{ м} .$$

Так как цвет пола является темным, то для расчетов принимаем коэффициент отражения полового покрытия [11]:

$$K_{отр.пол} = 20\% .$$

Так как стены и ограждающие конструкции выполнены в светло-серых цветах то для расчетов принимаем коэффициент отражения:

$$K_{отр.стен} = 50\% .$$

Так как потолок помещения выполнен светлым и отсутствуют устойчивые загрязняющие факторы, то в расчетах можно принять коэффициент отражения потолка и перекрытий:

$$K_{отр.потолка} = 70\% .$$

Число ламп, устанавливаемых в одном стандартном светильнике, выбранном для применения в системе искусственного освещения производственного корпуса, составляет:

$$n = 2 \text{ шт.}$$

Определение коэффициента использования светового потока начинается с расчета индекса помещения, который зависит от геометрических размеров рассматриваемого помещения [10]:

$$i = \frac{S}{(H - h_1 - h_2) \cdot (A + B)}, \quad (24)$$

где $A = 36 \text{ м}$ - это общая длина помещения,

$B = 12 \text{ м}$ - общая ширина помещения, тогда значение индекса составит

$$i = \frac{36 \cdot 12}{(3,3 - 0 - 1) \cdot (36 + 12)} = 3,9.$$

Исходя из коэффициентов отражения поверхностей внутри помещения и его индекса определяем по справочным таблицам производителя светильника коэффициент использования светового потока, зависящий от конструкции и параметров выбранного светильника:

$$\eta = 0,45.$$

Подставляя определенные коэффициенты и другие исходные данные в формулу для определения необходимого числа светильников для создания требуемого уровня освещенности на рабочей поверхности получаем [8]:

$$N = \frac{E \cdot S \cdot K_3}{\eta \cdot n \cdot \Phi_l}, \quad (25)$$

где S – полная площадь пола, рассматриваемого помещения за вычетом колонн и других строительных особенностей, m^2 .

$$N = \frac{300 \cdot 432 \cdot 1,5}{0,45 \cdot 2 \cdot 8000} = 27 \text{ шт.}$$

Для определения мощности системы освещения используются следующая информация.

Потребление мощности одной лампой светильника в нормальном режиме составляет:

$$P = 58 \text{ Вт.}$$

Каждый светильник комплектуется двумя лампами, при этом коэффициент реактивной мощности при использовании ЭлПРА достигает:

$$\text{tg} \phi = 0,16.$$

Активная мощность, потребляемая системой искусственного освещения равна:

$$P_{\text{осн.осв}} = N \cdot n \cdot P_{\text{лампы}}, \quad (26)$$
$$P_{\text{осн.осв}} = 27 \cdot 2 \cdot 58 = 3,13 \text{ кВт.}$$

Реактивная мощность, потребляемая системой искусственного освещения равна:

$$Q_{осн.осв} = P_{осн.осв} \cdot \operatorname{tg}\phi, \quad (27)$$
$$Q_{осн.осв} = 3,13 \cdot 0,16 = 0,5 \text{ квар.}$$

Определение числа светильников и потребления мощности системой освещения в других производственных помещениях выполняем аналогичным образом.

Выводы по разделу: для обеспечения эффекта естественного освещения с высоким уровнем индекса цветопередачи в помещениях в которых выполняются полировочные работы по металлу используем светильники ЛПП-07В с установкой 2 люминесцентных ламп по 58 Вт каждая, с ЭлПРА, что позволяет избежать пульсаций светового потока и благоприятно сказывается на самочувствии и работоспособности персонала предприятия. В качестве примера приведен пример определения необходимого количества светильников в помещении для выполнения полировки.

4 Определение необходимой мощности СТ и КУ в цеховой подстанции

«При выборе цеховых трансформаторов руководствуются следующими положениями:

- число трансформаторов на подстанции определяется из условия надежности питания с учетом категории потребителей электроэнергии;
- намечаются возможные варианты мощности трансформаторов с учетом допустимой их перегрузки в рабочем и послеаварийном режимах, и на основании технико-экономического сопоставления выбирается приемлемый вариант с учетом возможного увеличения нагрузок.

Трансформаторные подстанции должны размещаться как можно ближе к центру электрических нагрузок. Для этого должны применяться внутрицеховые ТП, а также встроенные в здание цеха или пристроенные к нему ТП, питающие отдельные цеха или части их.

ТП должны размещаться вне цеха только при невозможности размещения внутри его или при расположении части нагрузок вне цеха.

Применение внешних отдельно стоящих цеховых ТП целесообразно:

- при питании от одной ТП нескольких цехов;
- при наличии в цехах взрывоопасных производств;
- при невозможности расположения ТП внутри цеха по соображениям производственного характера.

Однотрансформаторные цеховые ТП применяются при ЭП, допускающих перерыв в электроснабжении на время доставки «складского» резерва, или при резервировании, осуществляемом по перемычкам на вторичном напряжении.

Двухтрансформаторные цеховые ТП применяются при преобладании потребителей I и II категорий, а также при наличии неравномерного суточного или годового графика нагрузок» [10-12].

Используя данные о расчетной нагрузке производственного корпуса включая сторонних потребителей и мощность системы освещения находим номинальную мощность одного трансформатора КТП при условии установки на ней двух одинаковых трансформаторов [7]:

$$S_{ном} > \frac{P_{p\Sigma}}{K_3 \cdot N_T}, \quad (28)$$

где « $S_{ном}$ – полная номинальная мощность трансформатора;

$P_{p\Sigma}$ – суммарная активная мощность равная 678,2 кВт с учётом дополнительных нагрузок, не входящих в рассматриваемый объект электроснабжения;

K_3 – коэффициент запаса, взятый 0,7;

N_T – количество трансформаторов» [6].

$$S_{ном} > \frac{678,2}{0,7 \cdot 2} > 484,4 \text{ кВА.}$$

Полученное расчётное значение округляется до ближайшего большего значения номинальной мощности трансформатора стандартно выпускаемого отечественными производителями, таким образом выбираем мощность трансформаторов по 630 кВА у каждого из установленных на подстанции.

Данные о потерях в трансформаторе, напряжении короткого замыкания и токе холостого хода, определяемые из технических характеристик выбранного трансформатора, а также коэффициент загрузки в его нормальном режиме работы заносим в справочную в таблицу 6.

Определение потерь в трансформаторе, а также целесообразность применения на КТП устройств компенсации реактивной мощности производим по материалам, опубликованным в пособии [10].

Таблица 6 – Данные о потерях в трансформаторе, напряжении короткого замыкания и токе холостого хода, определяемые из технических характеристик выбранного трансформатора ТМ – 630/6/0,4, а также коэффициент загрузки

$P_{x.x}, \text{кВт}$	$P_{к.з}, \text{кВт}$	$U_{к.з}, \%$	$i_{0(x.x)}, \%$	K_3	$N_T, \text{шт}$	$S_H, \text{кВА}$
1,05	7,6	5,5	2	0,7	2	630

«Величина потерь в трансформаторах КТП» [10]:

$$\Delta P_T = N_T \cdot (P_{x.x} + K_3^2 \cdot P_{к.з}), \quad (29)$$

$$\Delta P_T = 2 \cdot (1,05 + 0,7^2 \cdot 7,6) = 4,8 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_T = N_T \cdot (i_{0(x.x)} + K_3^2 \cdot U_{к.з}) \cdot \frac{S_H}{100}, \quad (30)$$

$$\Delta Q_T = 2 \cdot (2 + 0,7^2 \cdot 5,5) \cdot \frac{630}{100} = 59,2 \text{ квар}.$$

«Расчетная нагрузка корпуса с учетом потерь в трансформаторах» [10]:

$$P_p = P_{P\Sigma} + \Delta P_T, \quad (31)$$

$$P_p = 678,2 + 4,8 = 683 \text{ кВт},$$

$$Q_p = Q_{P\Sigma} + \Delta Q_T, \quad (32)$$

$$Q_p = 746 + 59,2 = 805,2 \text{ квар}.$$

«Величина реактивной мощности в часы минимальных нагрузок» [10]:

$$Q_{\min} = 50\% \cdot Q_p, \quad (33)$$

$$Q_{\min} = 0,5 \cdot 805,2 = 402,6 \text{ квар.}$$

«Экономические значения реактивной мощности в часы максимальных нагрузок» [10]:

$$Q'_{\text{э}1} = Q_p - 0,7 \cdot Q_{\text{сд}}, \quad (34)$$

$$Q'_{\text{э}1} = 805,2 \text{ квар,}$$

$$Q''_{\text{э}1} = \alpha \cdot P_p, \quad (35)$$

где α – расчётный коэффициент, соответствующий установленным предприятию условиям получения от энергосистемы мощностей.

$$Q''_{\text{э}1} = 0,28 \cdot 683 = 191,2 \text{ квар.}$$

«В часы максимальных нагрузок из-за пониженного напряжения принимаем меньшее из двух найденных значений» [10]:

$$Q_{\text{э}1} = 191,2 \text{ квар.}$$

«Экономические значения реактивной мощности в часы наименьших нагрузок» [10]:

$$Q'_{\text{э}2} = Q_{\min} + Q_{\text{к}}, \quad (36)$$

$$Q'_{\text{э}2} = 402,6 \text{ квар,}$$

$$Q''_{\text{э}2} = Q_{\min} - Q_{\text{кд}} = Q_{\min} - (Q_p - Q_{\text{э}1}), \quad (37)$$

$$Q''_{\text{э}2} = 402,6 - (805,2 - 191,2) = -211,4 \text{ квар.}$$

«В часы минимальных нагрузок из-за повышенного напряжения принимаем значение» [10]:

$$Q_{\Sigma 2} = 402,6 \text{ квар} .$$

Определяем общую необходимую реактивную мощность устройств компенсации реактивной мощности:

$$Q_{\text{ку. max}} = 1,1 \cdot Q_P - Q_{\Sigma 1}'' , \quad (38)$$

$$Q_{\text{ку. max}} = 1,1 \cdot 805,2 - 191,2 = 694,5 \text{ квар} ,$$

$$Q_{\text{ку. min}} = Q_{\text{min}} - Q_{\Sigma 2}' , \quad (39)$$

$$Q_{\text{ку. min}} = 402,6 - 402,6 = 0 \text{ квар} .$$

На первом этапе производим расчеты для первоначально выбранных силовых трансформаторов с номинальной мощностью 630 кВА.

«Реактивная мощность, которая должна быть передана из сети 6/10 кВ в сеть напряжением до 1кВ и не должна компенсироваться» [10]:

$$Q_{\Sigma 1} = Q_{\Sigma 1}'' - (Q_P - Q_{P\Sigma}) , \quad (40)$$

$$Q_{\Sigma 1} = 191,2 - (805,2 - 746) = 132,1 \text{ квар} .$$

«Величина реактивной мощности, которая может быть передана из сети 6/10 кВ в сеть напряжением до 1000 В» [10]:

$$Q_T = \sqrt{(N_T \cdot K_3 \cdot S_H)^2 - P_{P\Sigma}^2} , \quad (41)$$

$$Q_T = \sqrt{(2 \cdot 0,7 \cdot 630)^2 - 678,2^2} = 563,9 \text{ квар} .$$

«Номинальная мощность КУ, устанавливаемых на стороне до 1000 В» [5]:

$$Q_{KV.n} = Q_{P\Sigma} - Q_T, \quad (42)$$

$$Q_{KV.n} = 746 - 563,9 = 182 \text{ квар.}$$

При расчетном значении необходимой мощности компенсации на стороне низкого напряжения трансформаторов КТП превышающем 50 квар становится целесообразна установка компенсирующих установок в количестве равном числу трансформаторов на КТП.

Согласно полученному значению реактивной мощности, которую целесообразно скомпенсировать выбираем установки АУКРМ-0,4-100 с ценой по данным сайта производителя равной 43 тыс. руб. за одну единицу, всего на подстанции размещаем 2 таких установки.

«Номинальная мощность КУ, которые могут быть установлены на стороне 6/10 кВ» [10]:

$$Q_{KV.g} = Q_{KV.max} - Q_{KV.n}, \quad (43)$$

$$Q_{KV.g} = 694,5 - 182,1 = 512,4 \text{ квар.}$$

При расчетном значении необходимой мощности компенсации на стороне высокого напряжения трансформаторов КТП менее 800 квар нецелесообразна установка компенсирующих установок напряжением 6-10 кВ.

«Величина приведенных затрат на установку КТП» [10]:

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_M}{10000} \right)^2 \cdot T_P, \quad (44)$$

где « τ – время максимальных потерь;

T_M – время использования максимальной нагрузки предприятия в год;

T_P – рабочее время трансформатора в год» [10].

$$\tau = \left(0,124 + \frac{4500}{10000} \right)^2 \cdot 8760 = 2,886 \cdot 10^3 \text{ ч},$$

$$C_0 = \left(\frac{\alpha}{T_M} + \beta \cdot 10^{-2} \right), \quad (45)$$

где « C_0 – удельная стоимость потерь холостого хода;

β – дополнительная плата за 1кВт·час потребляемой электроэнергии» [10].

$$C_0 = \left(\frac{116,19}{4500} + 0,9 \cdot 10^{-2} \right) \cdot 8760 = 305,02 \text{ руб / кВт} \cdot \text{год},$$

$$C = \left(\frac{\alpha}{T_M} + \beta \cdot 10^{-2} \right) \cdot \tau, \quad (46)$$

$$C = \left(\frac{116,19}{4500} + 0,9 \cdot 10^{-2} \right) \cdot 2,886 \cdot 10^3 = 100,49 \text{ руб / кВт} \cdot \text{год},$$

$$C \cdot \Delta P_T = C_0 \cdot \Delta P_{x.x} + C \cdot K_3^2 \cdot \Delta P_{к.з}, \quad (47)$$

где « $\Delta P_{x.x}$ – потери холостого хода;

$\Delta P_{к.з}$ – потери короткого замыкания» [10].

$$C \cdot \Delta P_T = 305,02 \cdot 1,05 + 100,49 \cdot 0,7^2 \cdot 7,6 = 694,5 \text{ руб},$$

$$Z_{КТП} = E \cdot K_{ТП} + C \cdot \Delta P_T, \quad (48)$$

$$Z_{КТП} = 0,223 \cdot (317,22 \cdot 2) + (0,694 \cdot 2) = 142,9 \text{ тыс.руб.}$$

Определяем приведенные затраты на трансформаторную подстанцию путем сложения затрат на компенсирующие устройства и силовые трансформаторы [4]:

$$Z_{общее} = Z_{КУ.н} + Z_{КТП}, \quad (49)$$

$$Z_{\text{общее}} = 43 \cdot 2 + 142,9 = 228,9 \text{ тыс.руб.}$$

На втором этапе производим расчеты для следующих по шкале номинальных мощностей силовых трансформаторов с номинальной мощностью 1000 кВА.

Данные о потерях в трансформаторе, напряжении короткого замыкания и токе холостого хода, определяемые из технических характеристик выбранного трансформатора, а также коэффициент загрузки в его нормальном режиме работы заносим в справочную в таблицу 7.

«Реактивная мощность, которая должна быть передана из сети 6/10 кВ в сеть напряжением до 1кВ и не должна компенсироваться» [10]:

$$Q_{\text{эн}} = 191,72 - (835,92 - 746,02) = 101,82 \text{ квар.}$$

Таблица 7 – Данные о потерях в трансформаторе, напряжении короткого замыкания и токе холостого хода, определяемые из технических характеристик выбранного трансформатора ТМ – 1000/6/0,4, а также коэффициент загрузки

$P_{\text{х.х}}, \text{кВт}$	$P_{\text{к.з}}, \text{кВт}$	$U_{\text{к.з}}, \%$	$i_{0(\text{х.х})}, \%$	K_z	$N_T, \text{шт}$	$S_H, \text{кВА}$
1,55	10,2	5,5	1,8	0,7	2	1000

«Величина реактивной мощности, которая может быть передана из сети 6/10 кВ в сеть напряжением до 1000 В» [10]:

$$Q_T = \sqrt{(2 \cdot 0,7 \cdot 1000)^2 - 678,2^2} = 1224,8 \text{ квар.}$$

«Номинальная мощность КУ, устанавливаемых на стороне до 1000 В» [10]:

$$Q_{\text{КУ.н}} = 746 - 1224,8 = -478,2 \text{ квар.}$$

При расчетном значении необходимой мощности компенсации на стороне низкого напряжения трансформаторов КТП не превышающем 50 квар нецелесообразна установка компенсирующих установок 0,4 кВ.

«Номинальная мощность КУ, которые могут быть установлены на стороне 6/10 кВ» [10]:

$$Q_{KV.6} = 727,8 - 0 = 727,8 \text{ квар.}$$

При расчетном значении необходимой мощности компенсации на стороне высокого напряжения трансформаторов КТП менее 800 квар нецелесообразна установка компенсирующих установок напряжением 6-10 кВ.

«Величина приведенных затрат на установку КТП» [10]:

$$\tau = \left(0,124 + \frac{4500}{10000} \right)^2 \cdot 8760 = 2,886 \cdot 10^3 \text{ ч,}$$

$$C_0 = \left(\frac{116,19}{4500} + 0,9 \cdot 10^{-2} \right) \cdot 8760 = 305 \text{ руб / кВт} \cdot \text{год,}$$

$$C = \left(\frac{116,19}{4500} + 0,9 \cdot 10^{-2} \right) \cdot 2,886 \cdot 10^3 = 100,5 \text{ руб / кВт} \cdot \text{год,}$$

$$C \cdot \Delta P_T = 305 \cdot 1,55 + 100,5 \cdot 0,7^2 \cdot 10,2 = 975 \text{ руб,}$$

$$Z_{КТП} = 0,223 \cdot (458 \cdot 2) + (0,975 \cdot 2) = 206,2 \text{ тыс.руб.}$$

Определяем приведенные затраты на трансформаторную подстанцию путем сложения затрат на компенсирующие устройства и силовые трансформаторы:

$$Z_{общее} = 0 + 206,2 = 206,2 \text{ тыс.руб.}$$

Выводы по разделу: исходя из минимальной величины, приведенных затрат, которые для варианта с установкой на КТП двух силовых трансформаторов типа ТМГ-1000 составили 206 тыс. руб. против затрат на установку двух силовых трансформаторов типа ТМГ-630, которые с учетом необходимости установки двух автоматизированных компенсирующих устройств составили 229 тыс.руб. выбираем для реализации при реконструкции цеховой КТП, питающей главный производственный корпус вариант с установкой 2 силовых трансформаторов ТМГ-1000 без устройств компенсации.

Питание внутрицеховых потребителей от выбранной КТП предусматриваем по радиальной схеме, которая позволяет обеспечить требуемую надежность всех категорий потребителей и является более экономичной при сосредоточенных нагрузках, а также более гибкой при возможной в будущем модернизации производственного оборудования.

5 Определение значений токов КЗ

«При проектировании СЭС учитываются не только нормальные продолжительные режимы работы электроустановок, но и аварийные режимы. Одним из аварийных режимов является короткое замыкание.

Коротким замыканием (КЗ) называется всякое случайное или преднамеренное, не предусмотренное нормальным режимом работы электрическое соединение различных точек электроустановки между собой или землей, при котором токи в ветвях резко возрастают, превышая наибольший допустимый ток продолжительного режима» [15, 16].

Система электроснабжения промышленного предприятия подвергается воздействию аварийных режимов, связанных с возникновением коротких замыканий, которые могут возникать как из-за износа электрооборудования, старения его изоляции и проводников, то есть по естественным причинам, так и в результате ошибочных действий персонала, которые могут намеренно или непреднамеренно обеспечить соединение токоведущих частей между собой или с заземленными элементами конструкций и аппаратов. Причем согласно статистике, в сетях с глухозаземленной нейтралью самыми распространенными являются как раз замыкания одной из фаз на землю, а самыми редкими трехфазные замыкания, для возникновения которых необходимо повреждение всех трех фаз, такие замыкания вызывают протекание токов КЗ самых высоких значений и могут как привести к повреждению оборудования, так и к возникновению пожара. При этом защитные аппараты, устанавливаемые в системе электроснабжения должны быть чувствительны и к сравнительно небольшим значениям токов однофазных КЗ и способны отключить максимальные токи трехфазного КЗ.

«Сопротивления системы учитывается индуктивным сопротивлением в схеме замещения» [15]:

$$x_c = \frac{U_{н.нн}^2}{S_c} \cdot 10^3, \quad (50)$$

где $U_{н.нн}$ – напряжение на стороне НН;

S_c – мощность КЗ со стороны питающей ПС, принимаемая по данным электроснабжающей организации 125 МВА.

$$x_c = \frac{0,4^2}{100} \cdot 10^3 = 1,6 \text{ мОм.}$$

«Активные и индуктивные сопротивления обмоток трансформатора»
[15]:

$$r_T = \frac{P_{к.з} \cdot U_{н.нн}^2}{S_H^2} \cdot 10^6, \quad (51)$$

где $P_{к.з}$ – потери в режиме КЗ;

S_H – номинальная мощность выбранного СТ.

$$r_T = \frac{10,2 \cdot 0,4^2}{1000^2} \cdot 10^6 = 1,6 \text{ мОм.}$$

$$Z_T = \frac{U_{к.з} \cdot U_{н.нн}^2}{S_H} \cdot 10^4, \quad (52)$$

где $U_{к.з}$ – напряжение КЗ.

$$Z_T = \frac{5,5 \cdot 0,4^2}{1000} \cdot 10^4 = 8,8 \text{ мОм.}$$

$$x_T = \sqrt{Z_T^2 - r_T^2}, \quad (53)$$

$$x_T = \sqrt{8,8^2 - 1,6^2} = 8,6 \text{ мОм.}$$

«Сопротивления линий определяются по известным удельным сопротивлениям кабелей и их длине» [15]:

$$r_{KL} = r_{y\partial} \cdot l, \quad (54)$$

где $r_{y\partial}$ – удельное активное сопротивление КЛ;

l – длина линии.

$$r_{KL1} = 0,1 \cdot 40 = 4 \text{ мОм},$$

$$r_{KL2} = 0,37 \cdot 32 = 11,84 \text{ мОм},$$

$$r_{KL3} = 0,74 \cdot 2 = 1,48 \text{ мОм}.$$

$$x_{KL} = x_{y\partial} \cdot l, \quad (55)$$

где $x_{y\partial}$ – удельное индуктивное КЛ;

$$x_{KL1} = 0,078 \cdot 40 = 3,12 \text{ мОм},$$

$$x_{KL2} = 0,085 \cdot 32 = 2,72 \text{ мОм},$$

$$x_{KL3} = 0,091 \cdot 2 = 0,18 \text{ мОм}.$$

Для наглядности расчетов, учета всех элементов, сопротивления которых войдут в схему для расчета токов КЗ составляют первоначально расчетную схему, которая приведена на рисунке 1, а затем на ее основе уже схему замещения (рисунок 2) в которой все реальные элементы замещают собственными сопротивлениями.

5.1 Расчет токов короткого замыкания в расчетной точке №1

«По схеме замещения прямой последовательности суммарные сопротивления определяем арифметическим суммированием сопротивлений до точки КЗ» [15]:

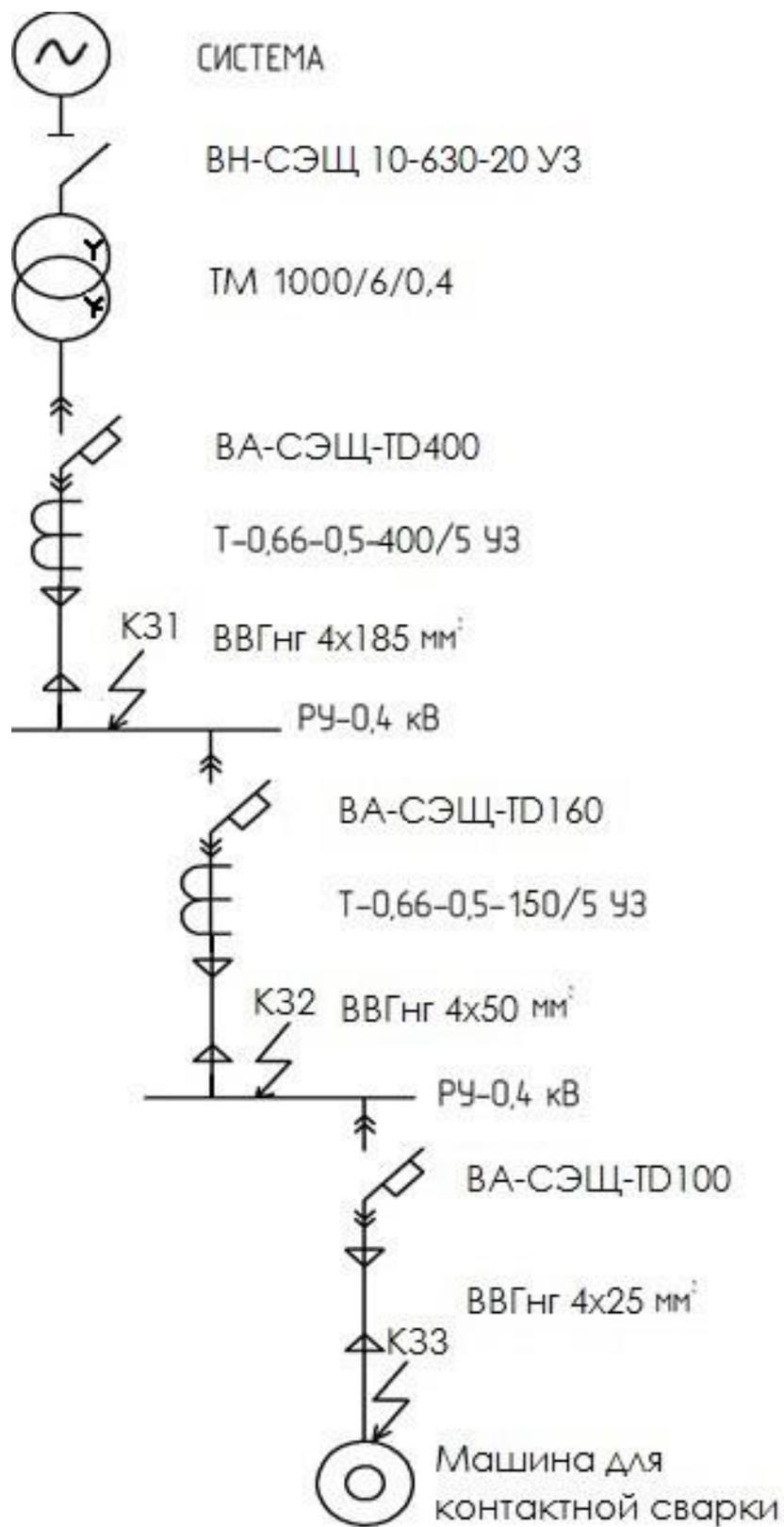


Рисунок 1 – Схема для расчета токов КЗ в сети 0,4 кВ с указанием всех основных элементов и расчетных точек КЗ

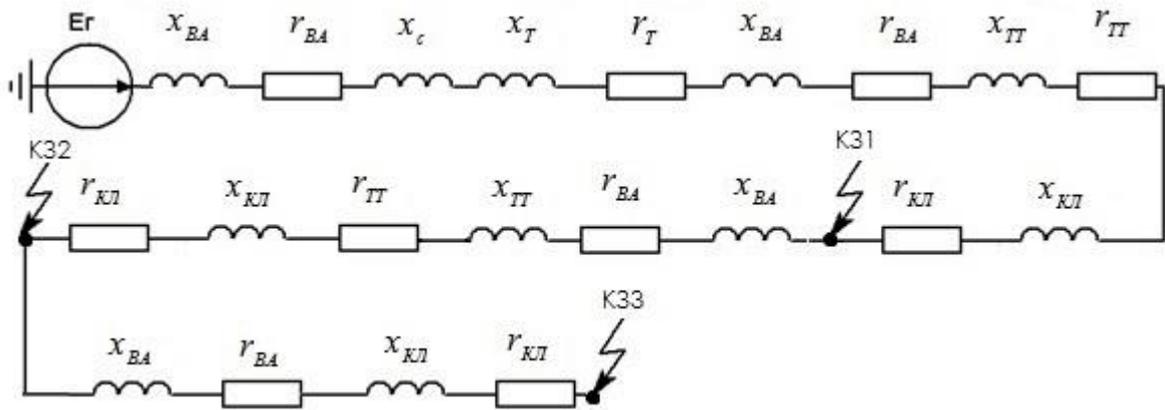


Рисунок 2 – Построенная на основе расчетной схемы ее схема замещения, в которой все реальные элементы системы электроснабжения замещаются собственными сопротивлениями

$$r_{1\Sigma} = \sum r, \quad (56)$$

$$r_{1\Sigma} = 0,14 + 1,6 + 0,65 + 0,2 + 4 = 6,5 \text{ мОм},$$

$$x_{1\Sigma} = \sum x, \quad (57)$$

$$x_{1\Sigma} = 0,08 + 1,6 + 8,6 + 0,17 + 0,3 + 3,12 = 13,8 \text{ мОм}.$$

«Полное суммарное сопротивление до точки К31» [15]:

$$Z_{1\Sigma} = \sqrt{6,5^2 + 13,8^2} = 15,2 \text{ мОм}.$$

«Ток металлического трёхфазного короткого замыкания находится по формуле» [15]:

$$I_{км} = \frac{U_{н.нн}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma}} = \frac{U_{н.нн}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{r_{1\Sigma}^2 + x_{1\Sigma}^2}}, \quad (58)$$

где $I_{км}$ – ток металлического КЗ.

$$I_{км} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 15,2} = 15,19 \text{ кА}.$$

«Ток трехфазного дугового КЗ определяем с использованием снижающего коэффициента K_C .

Расчет дугового трехфазного КЗ выполняется в следующем порядке:

а) Определяются значения снижающего коэффициента для начального момента КЗ (K_{C1}) и для установившегося КЗ (K_{C2}) по справочным кривым.

б) Ток трехфазного дугового КЗ определяется по формуле» [15]:

$$I_{к\delta} = I_{км} \cdot K_C, \quad (59)$$

$$I_{к\delta 1} = 15,19 \cdot 0,7 = 10,6 \text{ кА},$$

$$I_{к\delta 2} = 15,19 \cdot 0,64 = 9,7 \text{ кА}.$$

в) «Ударный коэффициент K_y определяем по характеристике в справочнике» [15]:

$$\frac{x_\Sigma}{r_\Sigma}, \quad (60)$$

$$\frac{x_\Sigma}{r_\Sigma} = \frac{13,8}{6,5} = 2,1, \quad K_y \approx 1,21$$

г) «Ударный ток КЗ определяем по формуле» [15]:

$$i_y = K_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{км}, \quad (61)$$

$$i_y = 1,21 \cdot \sqrt{2} \cdot 15,19 = 25,9 \text{ кА}.$$

5.2 Расчет токов короткого замыкания в расчетной точке №2

«По схеме замещения прямой последовательности суммарные сопротивления определяем арифметическим суммированием сопротивлений до точки КЗ» [15]:

$$r_{1\Sigma} = 0,14 + 1,6 + 0,65 + 0,2 + 4 + 0,65 + 0,42 + 11,84 = 19,4 \text{ мОм},$$

$$x_{1\Sigma} = 0,08 + 1,6 + 8,6 + 0,17 + 0,3 + 3,12 + 0,17 + 0,67 + 2,72 = 17,4 \text{ мОм}.$$

«Полное суммарное сопротивление до точки КЗ» [15]:

$$Z_{1\Sigma} = \sqrt{19,4^2 + 17,4^2} = 26 \text{ мОм},$$

«Ток металлического трёхфазного короткого замыкания находится по формуле» [15]:

$$I_{км} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 26} = 8,9 \text{ кА}.$$

«Ток трехфазного дугового КЗ определяется по формуле» [15]:

$$I_{к\partial 1} = 8,9 \cdot 0,72 = 6,4 \text{ кА},$$

$$I_{к\partial 2} = 8,9 \cdot 0,66 = 5,9 \text{ кА}.$$

«Ударный коэффициент КУ определяем по характеристике в справочнике» [15]:

$$\frac{x_{\Sigma}}{r_{\Sigma}} = \frac{17,4}{19,4} = 0,89, \quad K_y \approx 1,05$$

«Ударный ток КЗ определяем по формуле» [15]:

$$i_y = 1,05 \cdot \sqrt{2} \cdot 8,9 = 13,2 \text{ кА}.$$

5.3 Расчет токов короткого замыкания в расчетной точке №3

«По схеме замещения прямой последовательности суммарные сопротивления определяем арифметическим суммированием сопротивлений до точки КЗ» [15]:

$$r_{1\Sigma} = 0,14 + 1,6 + 0,65 + 0,2 + 4 + 0,65 + 0,42 + 11,84 + 2,15 + 1,48 = 23 \text{ мОм},$$

$$x_{1\Sigma} = 0,08 + 1,6 + 8,6 + 0,17 + 0,3 + 3,12 + 0,17 + 0,67 + 2,72 + 1,2 + 0,18 = 18,7 \text{ мОм},$$

«Полное суммарное сопротивление до точки КЗ2» [15]:

$$Z_{1\Sigma} = \sqrt{23^2 + 18,7^2} = 29,7 \text{ мОм}.$$

«Ток металлического трёхфазного короткого замыкания находится по формуле» [15]:

$$I_{км} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 29,7} = 7,8 \text{ кА},$$

«Ток трехфазного дугового КЗ определяется по формуле» [15]:

$$I_{к\partial 1} = 7,8 \cdot 0,74 = 5,8 \text{ кА},$$

$$I_{к\partial 2} = 7,8 \cdot 0,68 = 5,3 \text{ кА}.$$

«Ударный коэффициент КУ определяем по характеристике в справочнике» [15]:

$$\frac{x_{\Sigma}}{r_{\Sigma}} = \frac{18,7}{23} = 0,81, K_y \approx 1,03$$

«Ударный ток КЗ определяем по формуле» [15]:

$$i_y = 1,03 \cdot \sqrt{2} \cdot 7,8 = 11,2 \text{ кА}.$$

Выводы по разделу: в результате проведенных расчетов были найдены токи КЗ на всех ступенях системы электроснабжения 0,4 кВ, которые в дальнейших разделах будут использованы для выбора и проверки проводников и коммутационных аппаратов.

6 Выбор и проверка коммутационно-защитных аппаратов и проводников в системе внутрицехового электроснабжения

Для каждого из электроприемников, расположенных в главном корпусе находим значение расчетного тока, которое при числе ЭП равному одному принимается равным номинальному:

$$I_p = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot 0,380 \cdot \cos \varphi}, \quad (62)$$

где P_n – номинальная активная мощность одного ЭП,
 $\cos \varphi$ – номинальный коэффициент мощности ЭП.

Полученные результаты вычислений в соответствии с разбивкой ЭП по распределительным пунктам сводим в таблицу 8.

Расчитанные ранее значения расчетных токов по каждому из распределительных пунктов принимаем по данным из раздела 2 данной работы.

Прохождение электрического тока по проводникам приводит к их нагреву и при превышении определенных значений, установленных в нормативных документах и производителями проводников, может вызвать необратимое повреждение изоляции или ухудшить ее свойства, что вызовет сокращение срока службы проводника.

Во внутрицеховых сетях возможно возникновение следующих ненормальных режимов, сопровождающихся ростом тока в сети:

- перегрузка оборудования, что ведет к протеканию тока в сети свыше номинального значения, и может продолжаться длительное время;
- кратковременный, но значительный по величине (до 5-7 раз) рост тока при пуске мощных электрических двигателей;
- резкое и многократное увеличение протекающего по проводникам тока в следствии КЗ, как правило не продолжительное по времени

при правильно функционирующих и верно выбранных защитных аппаратах [17, 18].

Для защиты распределительных линий от ТП до РП предварительно намечаем к использованию автоматические выключатели ВА-СЭЩ-ТД, измерительные трансформаторы тока для установки в РУ 0,4 кВ КТП Т-0,66-0,5, для кабельных линий выбираем кабель 2ВВГнг.

Выбранные в результате расчетов токи расцепителей АВ, номинальных токов ТТ и сечения кабельных линий к РП заносим в таблицу 8.

Таблица 8 – Выбранные в результате расчетов токи расцепителей АВ, номинальных токов ТТ и сечения кабельных линий к РП

№ КЛ на плане корпуса	I_p, A	$I_{расц\ АВ}, A$	$I_{ном\ ТТ}, A$	$N \times F, мм^2$
1	357,5	400	400	4×185
2	142,7	160	150	4×50
3	29,5	32	40	4×4
4	55,3	63	50	4×16
5	58,9	63	150	4×16

Для защиты питающих линий к ЭП предварительно намечаем к использованию автоматические выключатели ВА-СЭЩ-ТД100, для кабельных линий выбираем кабель 2ВВГнг.

Выбранные в результате расчетов токи расцепителей АВ и сечения кабельных линий к ЭП заносим в таблицу 9.

Таблица 9 – Выбранные в результате расчетов токи расцепителей АВ и сечения кабельных линий к ЭП

Наименование отдельных электроприемников	$P_n, кВт$	$\cos\varphi$	I_p, A	$I_{расц\ АВ}, A$	$N \times F, мм^2$
Консольные краны РОЛТЭК	3,6	0,65	8,4	16	4×1,5
JET BD-8VS Настольные токарные станки по металлу	1,5	0,4	5,7	16	4×1,5

Продолжение таблицы 9

Наименование отдельных электроприемников	$P_n, кВт$	$\cos\varphi$	$I_p, А$	$I_{расч\ AB}, А$	$N \times F, мм^2$
Автоматический бухторазмотчик Элинтек 300	5,5	0,5	16,7	20	4×2,5
Гидравлические гильотинные ножницы НГ3418.01	6,5	0,5	19,7	20	4×2,5
Правильно гибочные станки для арматуры БАЗИСМАШ БПВ 4-14	5	0,4	19	20	4×2,5
Малотоннажные электромеханические листогибы SafanDarley E-Brake ECO	15	0,65	35	40	4×6
Машины стыковой сварки проволоки СЕА с пневматическим приводом серии SRT и SQ/A	14	0,65	32,7	40	4×6
Машины контактной точечной сварки ТСС МТР-10	42	0,65	98,3	100	4×25
Прессы кривошипные КД2124 для холодноштамповочных работ	3,8	0,65	8,9	16	4×1,5
Станки для 3D гибки проволоки YSM серии CNC-BW100	14,5	0,4	55,1	63	4×16
Станки фрезерные вертикальные консольные модели WM5042 с УЦИ	11	0,4	41,8	63	4×10
JET GH-1640 ZX DRO Токарно-винторезные станки серии ZX индустриального класса	7,5	0,4	28,5	32	4×4

Продолжение таблицы 9

Наименование отдельных электроприемников	$P_n, \text{ кВт}$	$\cos\varphi$	$I_p, \text{ А}$	$I_{расч\ AB}, \text{ А}$	$N \times F, \text{ мм}^2$
Станки газоплазменной резки Voltmash	35	0,6	88,7	100	4×25
Горизонтальные токарно шлифовальные станки R-200 INDEX-WERKE	4,5	0,65	10,5	16	4×1,5
Электрохимические гальванические ванны СтанкоСаратов	18	0,6	45,6	50	4×10

Выводы по разделу: для защиты распределительных линий от ТП до РП выбраны к использованию автоматические выключатели ВА-СЭЩ-ТД, измерительные трансформаторы тока для установки в РУ 0,4 кВ КТП Т-0,66-0,5, для кабельных линий выбран кабель 2ВВГнг. Для защиты питающих линий к ЭП выбраны к использованию автоматические выключатели ВА-СЭЩ-ТД100, для кабельных линий выбран кабель 2ВВГнг. Все АВ проверены на коммутационную способность и устойчивость к электродинамическому воздействию токов КЗ.

7 Определение параметров системы заземления производственного корпуса

«Защитным соединением называется преднамеренное соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетоковедущих частей установки с целью электробезопасности. Его назначение - предотвратить возможность поражения людей электрическим током при соприкосновении с корпусами оборудования и другими нетоковедущими металлическими частями электроустановки, оказавшимися под напряжением вследствие различных неисправностей.

В сетях с глухозаземленной нейтралью задача защитного заземления состоит в обеспечении через нулевой провод (зануление) быстрого автоматического отключения поврежденного участка. В связи с этим по отношению к установкам напряжением до 1 кВ используется термин «зануление». Под занулением в электроустановках (ЭУ) понимается преднамеренное соединение металлических частей ЭУ, нормально не находящихся под напряжением, с глухозаземленной нейтралью трансформатора (через нулевой провод)» [10, 19, 20].

Предельно допустимое значение сопротивления по ПУЭ составляет 4 Ом.

Для одного вертикального заземлителя собственное сопротивление в грунте составит:

$$R_{\epsilon} = \frac{\rho_{\epsilon}}{2\pi \cdot L} \left(\lg \frac{2L}{d} + 0,5 \cdot \lg \frac{4T + L}{4T - L} \right), \quad (63)$$

где « R_{ϵ} – сопротивление вертикального электрода;

ρ – эквивалентное удельное сопротивление грунта;

L – длина электрода;

d – диаметр электрода;

T – расстояние от середины электрода до поверхности земли» [19].

$$R_g = \frac{50}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \left(\lg \frac{2 \cdot 3}{0,02} + 0,5 \cdot \lg \frac{4 \cdot 2,2 + 3}{4 \cdot 2,2 - 3} \right) = 16,03 \text{ Ом.}$$

Для соединительной полосы, объединяющей отдельные вертикальные заземлители в систему, сопротивление составит:

$$R_2 = 0,366 \frac{\rho_2}{L_2} \lg \frac{L_2^2}{d}, \quad (64)$$

где « R_2 – сопротивление горизонтального электрода;

ρ_2 – эквивалентное удельное сопротивление грунта для горизонтального электрода;

L_2 – длина электрода;

d – размер электрода» [19];

$$R_2 = 0,366 \frac{50}{15} \lg \frac{15^2}{0,5 \cdot 0,04} = 17,05 \text{ Ом.}$$

Общее значение сложного заземлителя находим из выражения:

$$R_3 = \frac{R_g \cdot R_2}{R_g \cdot \eta_2 + R_2 \cdot \eta_g \cdot n}, \quad (65)$$

$$R_3 = \frac{16,03 \cdot 17,05}{16,03 \cdot 0,74 + 17,05 \cdot 0,78 \cdot 5} = 3,5 \text{ Ом.}$$

Выводы по разделу: определено сопротивление сложного заземлителя, состоящего из вертикальных заземлителей и соединительной полосы, объединяющей отдельные вертикальные заземлители в систему, которое по результатам расчетов не превышает установленного в ПУЭ порогового значения.

Заключение

Цель работы заключалась в обеспечении выполнения требований к надежности электроснабжения потребителей производственного корпуса ООО «СтилМет». В работе приведена краткая характеристика предприятия, его месторасположение, виды выпускаемой продукции, ее применение в различных отраслях промышленности и строительства и направления перспективного развития на ближайшие годы.

В результате проведенных расчетов были определены значения расчетных нагрузок как от системы внутреннего освещения производственного корпуса, которые составили 11,7 кВт активной расчетной мощности и 1,9 квар реактивной расчетной мощности. Кроме главного производственного корпуса от данной ТП получают питание и другие производственные объекты суммарные расчетные нагрузки, по которым составляют 488 кВт активной мощности и 532 квар реактивной мощности. Суммируя полученные расчетные значения для силовых электроприемников по всем пяти распределительным пунктам главного корпуса, а также значения осветительной и нагрузки других производственных корпусов было установлено суммарное значение расчетной мощности на шинах низкого напряжения цеховой трансформаторной подстанции, которое составило 678 кВт активной мощности и 746 квар реактивной без учета компенсирующих устройств.

Для обеспечения эффекта естественного освещения с высоким уровнем индекса цветопередачи в помещениях в которых выполняются полировочные работы по металлу используем светильники ЛПП-07В с установкой 2 люминесцентных ламп по 58 Вт каждая, с ЭлПРА, что позволяет избежать пульсаций светового потока и благоприятно сказывается на самочувствии и работоспособности персонала предприятия. В качестве примера приведен пример определения необходимого количества светильников в помещении для выполнения полировки.

Исходя из минимальной величины, приведенных затрат, которые для варианта с установкой на КТП двух силовых трансформаторов типа ТМГ-1000 составили 206 тыс. руб. против затрат на установку двух силовых трансформаторов типа ТМГ-630, которые с учетом необходимости установки двух автоматизированных компенсирующих устройств составили 229 тыс. руб. выбран для реализации при реконструкции цеховой КТП, питающей главный производственный корпус вариант с установкой 2 силовых трансформаторов ТМГ-1000 без устройств компенсации.

Питание внутрицеховых потребителей от выбранной КТП предусматриваем по радиальной схеме, которая позволяет обеспечить требуемую надежность всех категорий потребителей и является более экономичной при сосредоточенных нагрузках, а также более гибкой при возможной в будущем модернизации производственного оборудования.

В результате проведенных расчетов были найдены токи КЗ на всех ступенях системы электроснабжения 0,4 кВ, которые в дальнейших разделах будут использованы для выбора и проверки проводников и коммутационных аппаратов.

Для защиты распределительных линий от ТП до РП выбраны к использованию автоматические выключатели ВА-СЭЩ-ТД, измерительные трансформаторы тока для установки в РУ 0,4 кВ КТП Т-0,66-0,5, для кабельных линий выбран кабель 2ВВГнг. Для защиты питающих линий к ЭП выбраны к использованию автоматические выключатели ВА-СЭЩ-ТД100, для кабельных линий выбран кабель 2ВВГнг. Все АВ проверены на коммутационную способность и устойчивость к электродинамическому воздействию токов КЗ.

Определено сопротивление сложного заземлителя, состоящего из вертикальных заземлителей и соединительной полосы, объединяющей отдельные вертикальные заземлители в систему, которое по результатам расчетов не превышает установленного в ПУЭ порогового значения.

Список используемых источников

1. Абрамова Е. Я. Курсовое проектирование по электроснабжению промышленных предприятий: учебное пособие. Оренбургский гос. ун-т. Оренбург: ОГУ, 2012. 106 с.
2. Анчарова Т. В., Рашевская М.А., Стебунова. Е.Д. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений [Электронный ресурс]: учебник , 2-е изд., перераб. и доп. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2018. 415 с. URL: <http://znanium.com/catalog/product/982211> (дата обращения 15.12.2022).
3. Вахнина В.В., Черненко А.Н., Самолина О.В., Рыбалко Т.А. Проектирование осветительных установок [Электронный ресурс]: электронное учеб.-метод. пособие. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2015. 107 с. URL: https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/3383/1/Vahnina%20Chernenko%20Samolina%20Ribalko_%20EUI_Z.pdf (дата обращения: 09.01.2023).
4. Грунтович Н.В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования : учебное пособие. Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2017. 271 с.
5. Комков В.А., Тимахова Н.С. Энергосбережение в жилищно-коммунальном хозяйстве: учебное пособие, 2-е изд. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. 204 с.
6. Мельников М.А. Внутризаводское электроснабжение: учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2014. 180 с.
7. Савоськин В.С. Электроснабжение. Электроснабжение промышленных предприятий: учеб. пособие. Пенза : Изд-во Пенз. ун-та, 2018. 256 с.
8. Сибикин Ю.Д. Пособие к курсовому и дипломному проектированию электроснабжения промышленных, сельскохозяйственных и городских объектов: учебное пособие. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2015. 384 с.

9. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю., Яшков В.А. Электроснабжение промышленных предприятий и установок: учебное пособие. М.: Форум, 2015. 368 с.
10. Сивков А.А., Герасимов Д.Ю., Сайгаш А.С. Основы электроснабжения. Учебное пособие. Томск: Изд-во Томского пол-го ун-та, 2012. 173 с.
11. Старкова Л.Е. Справочник цехового энергетика : учебно-практическое пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2013. 352 с.
12. Ушаков В.Я. Современные проблемы электроэнергетики [Электронный ресурс] : учебное пособие. Томск: Томский политехнический университет, 2014. 447 с. URL: <http://www.iprbookshop.ru/34715.html> (дата обращения: 16.12.2022).
13. Хорольский В.Я., Таранов М.А., Жданов В.Г. Организация и управление деятельностью электросетевых предприятий: учебное пособие. М.: Форум, НИЦ ИНФРА-М, 2016. 144 с.
14. Шеховцов В.П. Расчет и проектирование ОУ и электроустановок промышленных механизмов [Электронный ресурс]: Учебное пособие. 2-е изд. М.:Форум, НИЦ ИНФРА-М, 2015. 352 с. URL: <http://znanium.com/catalog/product/494251> (дата обращения 17.01.2023).
15. Щербаков Е. Ф., Александров Д. С. Электрические аппараты: учебник. - М.: Форум, НИЦ ИНФРА-М, 2015. 304 с.
16. Beaty H.W. Handbook of electric power calculations. USA: McGraw-Hill Companies, 2011. 608 p.
17. Hossain M.A., Pota H.R., Hossain M.J., Blaabjerg F. Evolution of microgrids with converter-interfaced generations: Challenges and opportunities // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2019. № 109, pp. 160-186.
18. Maria Louis M. Elements of electrical engineering. PHI Learning Pvt. Ltd., 2014. 992 p.

19. Nadaraju F.J., Maddocks A.R., Zanganeh J., Moghtaderi B. Simulation of power and cooling generation via heat recovery from a ventilation air methane abatement unit // Fuel. 2019. № 249, pp. 27-35.

20. Whitaker J.C. AC power systems. 4rd ed. California: CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, 2014. 428 p.