

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 цементного завода

Обучающийся

С.В. Антонкин

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, Ю.В. Черненко

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

Тольятти 2023

## Аннотация

Цель работы – разработка проекта системы электроснабжения цементного завода.

Для решения поставленных задач, в работе осуществлена разработка и обоснование следующих мероприятий: приведена краткая характеристика электрического хозяйства предприятия, произведён расчет электрических нагрузок и токов короткого замыкания, выбор числа и мощности трансформаторов для установки на ГПП и цеховых ТП, выбраны установки для компенсации реактивной мощности, произведён выбор сечений проводов и кабелей, осуществлена разработка схемы внешнего электроснабжения цементного завода, а также выбор и проверка электрических проводников и аппаратов для установки в схеме электроснабжения.

Результатом работы является обоснование технических решений для внедрения в систему электроснабжения цементного завода, которые позволяют повысить надёжность, безотказность работы, экономичность передачи и распределения электроэнергии, а также условия электробезопасности.

Работа представлена расчётно-пояснительной запиской, состоящей из 62 страниц, с использованием пяти рисунков и десяти таблиц, а также графической частью, представленной шестью чертежами формата А1.

## Содержание

Введение.....	4
1 Краткая характеристика предприятия.....	7
1.1 Анализ исходных данных на проектирование цементного завода.....	7
2 Определение расчетных нагрузок по цехам и в целом по предприятию.....	14
3 Выбор количества, типа и номинальной мощности трансформаторов.....	22
3.1 Выбор трансформаторов ГПП системы электроснабжения цементного завода.....	22
3.2 Выбор трансформаторов цеховых ТП системы электроснабжения цементного завода.....	26
3.3 Выбор конденсаторных установок на цеховых ТП системы электроснабжения цементного завода.....	30
4 Анализ и выбор схемы для распределения электроэнергии по территории цементного завода.....	34
5 Расчёт токов коротких замыканий.....	37
6 Выбор электрических аппаратов и проводников на ГПП предприятия.....	48
6.1 Выбор и проверка проводников на ГПП цементного завода.....	48
6.2 Выбор и проверка электрических аппаратов на ГПП цементного завода.....	52
Заключение.....	59
Список используемых источников.....	62

## Введение

В работе рассмотрено проектирование системы электроснабжение цементного завода.

Промышленность производства строительных материалов, к которой относится проектируемый в работе цементный завод, является одной из наиболее динамично развивающихся отраслей страны, ежегодно поставляя в него определённую часть дохода [12].

В условиях санкционной политики, а также ограничением цен на основные комплектующие и материалы, а также инновационные технологии, со стороны западных стран (США и ЕС), остро встаёт вопрос о перевооружении и модернизации цементного производства.

Однако Российская Федерация имеет огромный потенциал для развития промышленности по производству строительных материалов. Существует ряд факторов, которые могут оказать влияние на ее развитие в будущем:

- увеличение строительной активности в стране. Россия активно развивается, и в ближайшие годы ожидается рост строительства жилья и коммерческих объектов;
- увеличение потребления строительных материалов. Россия – это огромный рынок для строительных материалов, и в будущем он будет только расти;
- внедрение новых технологий и материалов. С развитием технологий и научных исследований, будут создаваться новые материалы и технологии производства, что повысит эффективность производства и улучшит качество материалов;
- развитие экспорта. Россия имеет потенциал для экспорта строительных материалов, что может стать одним из главных источников дохода для российской экономики;
- государственная поддержка. Правительство Российской Федерации

активно поддерживает развитие промышленности строительных материалов, предоставляя финансовую и техническую помощь, а также стимулируя инвестиции.

С учетом этих факторов можно сделать вывод, что перспективы развития промышленности по производству строительных материалов в России являются очень благоприятными.

Если правительство будет продолжать поддерживать эту отрасль, то она сможет стать одним из ключевых секторов экономики Российской Федерации.

Для достижения необходимого результата важно гарантировать высокое качество проектирования современных систем электроснабжения для новых производственных объектов заводов-изготовителей строительных материалов всех типов, а также проводить модернизацию и реконструкцию систем электроснабжения существующих предприятий, что обуславливает актуальность и практическую ценность данной работы.

Цель работы и основная задача проводимых исследований – «разработка качественного проекта системы электроснабжения цементного завода» [7].

«Объектом исследования в данной работе является электрическая часть системы электроснабжения цементного завода» [7].

«Предметом исследования в работе выступает электрическая принципиальная схема электроснабжения объекта исследования, а также её составные части – питающая и распределительная сеть (силовые трансформаторы ГПП и цеховых ТП, электрические сети высокого и низкого напряжения, аппаратура распределительных устройств)» [16].

Для решения поставленных задач, в работе осуществлена разработка и обоснование следующих мероприятий:

- приведена краткая характеристика электрического хозяйства предприятия;
- произведён расчет электрических нагрузок;

- осуществлён выбор числа и мощности трансформаторов для установки на ГПП и ЦТП;
- выбраны установки для компенсации реактивной мощности;
- выбрана схема для применения на ГПП завода;
- произведён выбор сечений проводов и кабелей;
- осуществлена разработка схемы внешнего электроснабжения цементного завода;
- произведён выбор и проверка электрических аппаратов для установки в схеме электроснабжения.

Для достижения поставленной цели, в работе применяются следующие методы исследования: аналитические методы, численные методы, методы сравнения и аналогий, методы расчёта электрических цепей

Результатом работы является обоснование технических решений для внедрения в систему электроснабжения цементного завода, позволяющие повысить надёжность, безотказность работы, экономичность передачи и распределения электроэнергии, а также условия электробезопасности.

## **Краткая характеристика предприятия**

### **Анализ исходных данных на проектирование цементного завода**

Известно, что ввод в эксплуатацию качественно новых объектов производства строительных материалов, на которых основной производственный цикл и оборудование были бы современными и сконцентрированными на одной общей территории, технически и экономически выгодными, и рентабельными.

В связи с расширением производства и сопутствующим дефицитом мощностей, принято решение о сооружении нового цементного завода, который будет укомплектован современным оборудованием с использованием передового научно-технического прогресса.

Одним из таких предприятий должен стать рассматриваемый в работе цементный завод универсального типа, основная задача которого – производство высококачественного цемента, а также сопутствующих товаров народного потребления.

На основании перечисленных аспектов можно сделать вывод, что современные промышленные предприятия, производящие строительные материалы, требуют комплексного и квалифицированного подхода к проектированию всех систем обеспечения жизнедеятельности, в особенности систем электроснабжения.

Поэтому разработка качественного проекта системы электроснабжения объекта исследования, является важнейшей задачей работы.

Увеличение спроса на строительные материалы и изделия из них, а также близость логистических цепей и наличие необходимых мощностей, обуславливает целесообразность ввода в эксплуатацию системы электроснабжения данного объекта.

Рассматриваемый в работе объект проектирования (цементный завод), выполняет роль предприятия, обеспечивающего производство и реализацию

потребителям различных сортов и марок цемента, а также производство изделий из него.

Исходя из технологических требований, рассматриваемое в работе цементное производство, включает совокупность цехов и участков для выполнения технологических операций по полному производственному циклу готовой продукции.

На проектируемом цементный заводе выпускается широкий ассортимент продукции.

Технология производства продукции на цементном заводе напрямую зависит от вида и типа получаемого продукта.

Технологическая схема производства основных видов продукции цементного завода очень разнообразна, поэтому ниже рассматривается основная из них. Технологическая схема производственного процесса производства цемента и изделий из него, на цементных заводах, представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Технологическая схема производственного процесса при изготовлении цемента



Таким образом, исходя из технологической схемы производственного процесса производства цемента на цементных заводах, на объекте проектирования можно выделить следующие основные этапы производства:

- подготовительный этап – включает доставку, хранение и транспортирование исходных материалов, применяемых в технологическом процессе изготовления цемента, а также подготовку первичного материала и сырья для производства;
- основной производственный этап – предусматривает непосредственное изготовление цемента в зависимости от их вида и типа, с последующей упаковкой и маркировкой готовой продукции;
- заключительный этап – включает контроль качества готовой продукции, взвешивание, фасовку в тару, а также хранение и доставку потребителю.

Согласно исходному заданию на выполнение работы, в рассматриваемой системе электроснабжения цементного завода, имеется три «основных производственных корпуса, которые вносят основной вклад в технологический процесс производства готовой продукции» [10].

Исходя из технологического процесса производства, с учётом исходных данных на выполнение задания, к основным производственным корпусам цементного завода относятся:

- известегасильный цех;
- завод изделий из ячеистых бетонов;
- бетонорастворный цех.

Перечисленные производственные цеха и корпуса являются основными в системе электроснабжения цементного завода.

Помимо них, «на объекте проектирования также есть необходимые неосновные цеха и участки, выполняющие производственную вспомогательную функцию (основную и неосновную)» [14].

К таким подразделениям относятся:

- технический комплекс обеспечения основного производства. «Это – одни из наиболее энергоёмких комплексных подразделений предприятия, включает в себя оборудование насосных» [17] (насосная перекачки сточных вод и насосная водопровода), котельной и компрессорной с мощными высоковольтными электродвигателями напряжением 10 кВ;
- «ремонтно-эксплуатационные службы – состоят из цехов и служб, обеспечивающих ремонт, монтаж и эксплуатацию всего оборудования и сетей предприятия. В данную структуру входит электроцех, ремонтно-механический цех» [19], кузнечный цех, арматурный цех;
- «складской комплекс – состоит из совокупности складских помещений и служит для хранения первичного сырья и запасных материалов, а также готовой продукции и сопутствующих материалов» [10], включает складские помещения (склад заполнителей, склад металла и готовой продукции, склад цемента с разгрузочным устройством, склад готовой продукции завода, склад);
- прочие объекты – не является непосредственным звеном основного технологического процесса, к ним относятся: административное помещение и столовая.

Таким образом, установлено, что в структуре проектируемого цементного завода присутствует восемнадцать структурных комплексов (подразделений), из них три являются основными производственными подразделениями, остальные – вспомогательными производственными и непроизводственными.

По номинальному напряжению потребителей основных подразделений проектируемой системы электроснабжения цехов и участков цементного завода, можно сделать вывод, что все потребители, за исключением мощных высоковольтных электродвигателей номинальным напряжением 10 кВ компрессорной, относятся к электроприёмникам низкого номинального

напряжения (0,38/0,22 кВ). В форме таблицы 1, приведены основные данные цехов и участков проектируемой системы электроснабжения цементного завода, с указанием установленной мощности каждого подразделения.

Таблица 1 – Основные данные и систематизация подразделений цементного завода по категориям надёжности

№ цеха (участка) по плану	Наименование цеха	Установленная мощность, $P_{уст}$ , кВт	Тип подразделения/ категория надёжности
1	Административное помещение	90	Неосновной вспомогательный/ III
2	Столовая	1100	Неосновной вспомогательный/ III
3	Известегасильный цех	780	Основной производственный/ I
4	Электроцех	800	Основной вспомогательный/ II
5	Склад заполнителей	1000	Неосновной вспомогательный/ III
6	Завод изделий из ячеистых бетонов	1600	Основной производственный/ I
7	Склад металла и готовой продукции	200	Неосновной вспомогательный/ III
8	Компрессорная (10 кВ)	1800	Основной вспомогательный/ II
	Компрессорная (0,38 кВ)	250	
9	Склад цемента с разгрузочным устройством	380	Неосновной вспомогательный/ III
10	Бетонорастворный цех	600	Основной производственный/ I
11	Ремонтно-механический цех	355	Основной вспомогательный/ II
12	Склад готовой продукции завода	150	Неосновной вспомогательный/ III
13	Кузнечный	100	Основной вспомогательный/ II
14	Склад	90	Неосновной вспомогательный/ III
15	Арматурный цех	380	Основной вспомогательный/ II
16	Насосная перекачки сточных вод	1500	Основной вспомогательный/ II
17	Насосная водопровода	800	Основной вспомогательный/ II
18	Котельная	150	Основной вспомогательный/ II
Всего по цементному заводу		12125	-

«План расположения основных подразделений на территории цементного завода представлен на рисунке 2» [15].

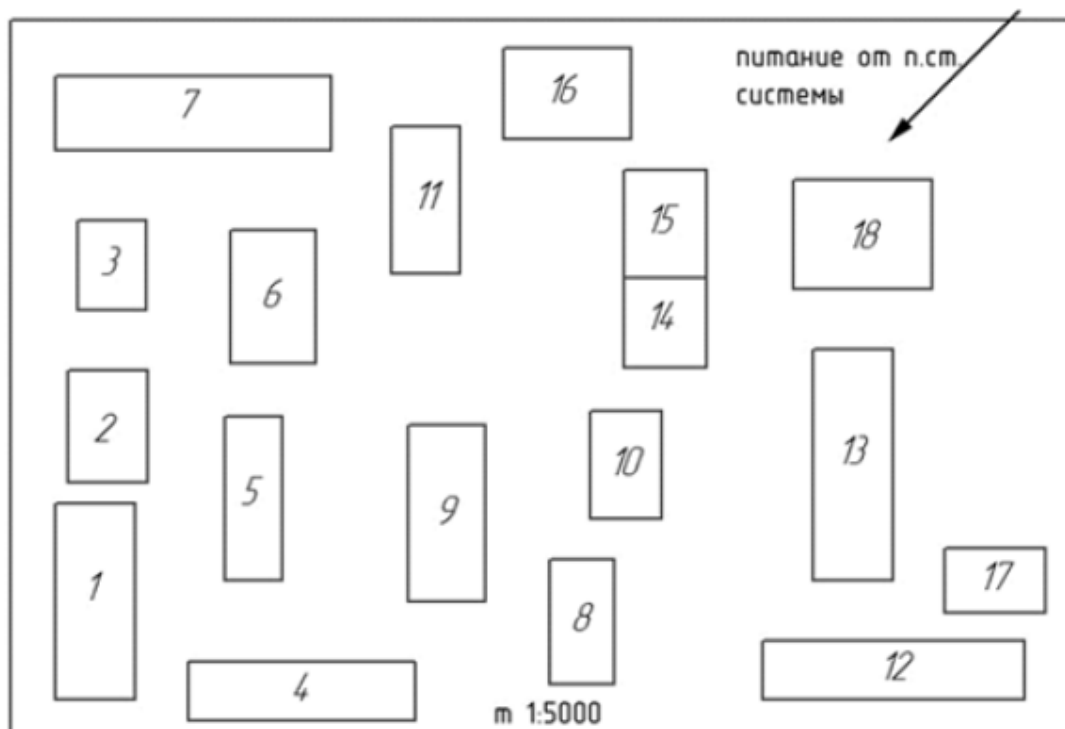


Рисунок 2 – План расположения основных подразделений на территории цементного завода

«В работе используются следующие данные» [6]:

- проектируемое предприятие промышленности производства строительных материалов (новый цементный завод универсального типа), по категории надёжности районных потребителей, относится ко II категории;
- питание проектируемого цементного завода от энергетической системы предполагается осуществить от узловой районной подстанции с классами напряжения 110/35/6 кВ, на которой находятся два силовых трансформатора, расстояние до данной питающей ПС составляет 6 км;
- возможны два варианта питания проектируемой системы электроснабжения цементного завода: от шин 35 кВ

(распределительное питание отходящими линиями от ОРУ-35 кВ районной подстанции) или от шин 110 кВ (транзитное питание от ввода 110 кВ ОРУ-110 кВ районной подстанции);

- прокладка воздушной линии электропередачи от питающей районной ПС-110/35/10 кВ энергосистемы возможна как на напряжении 110 кВ, так и на напряжении 35 кВ;
- все потребители цехов получают питание от источников на номинальном напряжении 0,38/0,22 кВ, за исключением компрессорных установок с приводными высоковольтными двигателями 10 кВ, находящимися в здании компрессорной завода.

Дальнейшее проектирование системы электроснабжения цементного завода осуществляется согласно исходным данным на выполнение работы с применением принятых расчётных и аналитических методик.

Выводы по разделу.

Обусловлена актуальность выбора темы, с последующим анализом технических данных нагрузки потребителей. Приведён перечень основных задач, который требуется решить в работе для достижения поставленной цели. Исходя из приведённой информации, установлено, что среди потребителей проектируемой системы электроснабжения цехов и участков цементного завода, на территории предприятия расположено восемнадцать основных подразделений, из которых три относятся к I категории надёжности, восемь подразделений – ко II категории и семь подразделений – к III категории надёжности. Показано, что разработка качественного проекта системы электроснабжения цементного завода, с внедрением основных групп мероприятий, будет способствовать значительному повышению параметров надёжности, бесперебойности, качества, электробезопасности и экономичности на объекте исследования. Приведённая информация является основой для проектирования системы электроснабжения цементного завода, которое осуществляется в работе далее.

## Определение расчетных нагрузок по цехам и в целом по предприятию

Далее в работе, для достижения поставленной цели, необходимо провести расчёт электрических нагрузок потребителей системы электроснабжения цементного завода, результаты которых далее будут использованы для расчёта максимальных рабочих токов с последующими выбором и проверкой силовых трансформаторов, проводников линий, сборных шин, а также нового основного оборудования распределительных устройств электрической части ГПП и цеховых ТП объекта проектирования.

На основании рассчитанных значений электрических нагрузок потребителей системы электроснабжения цементного завода, далее в работе будет рассчитано значение следующих токов, по которым необходимо провести выбор основного оборудования ГПП-110/10 кВ объекта проектирования:

- токов нормального режима;
- максимальных рабочих токов (токов послеаварийного режима).

Также на основе расчётных данных суммарной нагрузки узлов, необходимо выбрать трансформаторы для установки на ГПП и цеховых ТП.

Наиболее оптимальным и рациональным «методом при расчёте значений электрических нагрузок, является метод коэффициента спроса, который учитывает, насколько загружены производственные мощности предприятия в зависимости от его группы принадлежности» [8].

«Основой для расчёта электрических нагрузок системы электроснабжения цементного завода является установленная номинальная нагрузка потребителей,  $P_{уст}$ , которая принимается равной расчётной активной нагрузке» [8] с учётом коэффициента спроса, показывающий, насколько рационально используется электроэнергия в системе электроснабжения объекта [8].

По известному числу и мощности потребителей на заданном напряжении, определяется значения активной нагрузки потребителей электрической части системы электроснабжения цементного завода в максимальном режиме работы системы (по фактическим данным нагрузок объекта проектирования):

$$P_{p.} = K_c P_n, \quad (1)$$

где  $P_n$  – «значение суммарной номинальной активной мощности цеха (участка) проектируемого цементного завода, кВт» [8];

$K_c$  – «справочное значение коэффициента спроса цеха» [8] (участка) проектируемого цементного завода.

«Расчетная реактивная нагрузка силовых электроприёмников соответствующего цеха (участка) проектируемого цементного завода, квар» [6]:

$$Q_{p.} = P_{p.} \cdot \operatorname{tg}\varphi, \quad (2)$$

где  $\operatorname{tg}\varphi$  – «значение коэффициента реактивной мощности, о.е.» [8].

«Принимается по справочным данным» [16].

«Расчетная полная нагрузка силовых электроприёмников соответствующего цеха (участка) проектируемого цементного завода, кВА» [6]:

$$S_{p.} = \sqrt{P_{p.}^2 + Q_{p.}^2}. \quad (3)$$

«В работе, помимо силовой расчётной нагрузки объекта, также необходимо провести расчёты осветительной нагрузки цементного завода, исходя из площади, которая подлежит освещению» [10].

«Расчётная нагрузка осветительных приёмников цеха (участка) проектируемого цементного завода, кВт» [1]:

$$P_{p.o} = K_{c.o} P_{н.o}, \quad (4)$$

где « $K_{c.o}$  – справочный коэффициент спроса освещения цеха (участка) проектируемого цементного завода» [4];

« $P_{н.o}$  – суммарная номинальная мощность приемников освещения цеха (участка) проектируемого цементного завода, кВт» [1].

«При этом» [1]:

$$P_{н.o} = P_{уд.o} F, \quad (5)$$

где  $P_{уд.o}$  – «нормируемая удельная мощность освещения цеха (участка) проектируемого цементного завода, кВт/м<sup>2</sup>» [4];

$F$  – «площадь соответствующего цеха (участка) проектируемого цементного завода согласно генплану, м<sup>2</sup>» [1].

«Реактивная нагрузка освещения определяется по условию (2)» [10].

«Полная нагрузка силовых и осветительных приёмников соответствующего цеха (участка) проектируемого цементного завода» [1]:

$$S_p = \sqrt{(P_n + P_{н.o})^2 + Q_p^2}. \quad (6)$$

«Предварительные потери мощности в цеховых» [16] трансформаторах ЦТП системы электроснабжения цементного завода [16]:

$$\Delta P_{ТЦ} = 0,02 S_{p.n}, \text{ кВт}; \quad (7)$$

$$\Delta Q_{ТЦ} = 0,1 S_{p.n}, \text{ квар}. \quad (8)$$



Потери активной мощности в трансформаторах ГПП системы электроснабжения цементного завода [16]:

$$\Delta P_{T.ГПП} = 0,02 S_{p.\Sigma}, \text{ кВт}; \quad (9)$$

$$\Delta Q_{T.ГПП} = 0,1 S_{p.\Sigma}, \text{ квар}. \quad (10)$$

Расчёт электрических нагрузок в работе проводится на примере известегасильного цеха системы электроснабжения цементного завода по условиям (1) – (3).

Расчётная активная нагрузка силовых потребителей известегасильного цеха системы электроснабжения цементного завода по условию (1):

$$P_{p.} = 780 \cdot 0,4 = 312 \text{ кВт}.$$

Расчётная реактивная нагрузка силовых потребителей известегасильного цеха системы электроснабжения цементного завода по условию (2):

$$Q_{p.} = 312 \cdot 1,17 = 365,04 \text{ квар}.$$

Расчётная полная расчётная нагрузка силовых потребителей известегасильного цеха системы электроснабжения цементного завода по условию (3):

$$S_{p.} = \sqrt{(312 + 365,04)^2} = 480,21 \text{ кВА}.$$

Результаты расчёта электрических нагрузок остальных цехов системы электроснабжения цементного завода рассчитаны аналогично.

В работе проводится отдельные расчёты для силовой, осветительной и суммарной нагрузки при проектировании системы электроснабжения цементного завода (таблицы 2-4).

Результаты расчёта электрических нагрузок силовой сети системы электроснабжения цементного завода представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчёта электрических нагрузок силовой сети системы электроснабжения цементного завода

№ цеха (участка) по плану	Наименование цеха	$\sum P_{уст},$ кВт	$K_c$	$\cos\varphi$	$tg\varphi$	$P_p,$ кВт	$Q_p,$ квар	$S_p,$ кВА
1	Административное помещение	90	0,35	0,60	1,33	31,50	41,90	52,42
2	Столовая	1100	0,40	0,65	1,17	440,00	514,80	677,21
3	Известегасильный цех	780	0,40	0,65	1,17	312,00	365,04	480,21
4	Электроцех	800	0,65	0,65	1,17	520,00	608,40	800,34
5	Склад заполнителей	1000	0,80	0,80	0,75	800,00	600,00	1000,00
6	Завод изделий из ячеистых бетонов	1600	0,65	0,65	1,17	1040,00	1216,80	1600,69
7	Склад металла и готовой продукции	200	0,80	0,80	0,75	160,00	120,00	200,00
8	Компрессорная (0,38 кВ)	250	0,65	0,65	1,17	162,50	190,13	250,11
9	Склад цемента с разгрузочным устройством	380	0,80	0,80	0,75	304,00	228,00	380,00
10	Бетонорастворный цех	600	0,65	0,65	1,17	390,00	456,30	600,26
11	Ремонтно-механический цех	355	0,80	0,80	0,75	284,00	213,00	355,00
12	Склад готовой продукции завода	150	0,65	0,65	1,17	97,50	114,08	150,06
13	Кузнечный	100	0,80	0,80	0,75	80,00	60,00	100,00
14	Склад	90	0,65	0,65	1,17	58,50	68,45	90,04
15	Арматурный цех	380	0,80	0,80	0,75	304,00	228,00	380,00
16	Насосная перекачки сточных вод	1500	0,65	0,65	1,17	975,00	1140,75	1500,65
17	Насосная водопровода	800	0,80	0,80	0,75	640,00	480,00	800,00
18	Котельная	150	0,65	0,65	1,17	97,50	114,08	150,06
Всего силовой нагрузки 0,38 кВ		-	-	-	-	6696,50	6759,71	9515,08
Компрессорная (10 кВ)		1350	0,65	0,65	1,17	877,50	1026,68	1350,58
Всего силовой нагрузки 10 кВ		-	-	-	-	877,50	1026,68	1350,58
Всего силовой нагрузки		-	-	-	-	7574,00	7786,38	10862,47

Результаты расчёта электрических нагрузок осветительной сети проектируемой системы электроснабжения цементного завода, рассчитанные с учётом площади подразделений завода, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчёта электрических нагрузок осветительной сети системы электроснабжения цементного завода

№ цеха (участка) по плану	Наименование цеха	А, м	В, м	$F_{ц}, м^2$	$P_{уд.о}, Вт/м^2$	$P_{ном.о}, кВт$	тип лампы	$P_{р.о}, кВт$	$Q_{р.о}, квар$
1	Административное помещение	60	20	1200	19	22,8	LED	22,74	9,80
2	Столовая	40	20	800	19	15,2	LED	15,16	6,54
3	Известегасильный цех	30	20	600	20	12	LED	11,97	5,16
4	Электроцех	15	50	750	18	13,5	LED	13,47	5,81
5	Склад заполнителей	15	40	600	19	11,4	LED	11,37	4,90
6	Завод изделий из ячеистых бетонов	50	20	1000	15	15	LED	14,96	6,45
7	Склад металла и готовой продукции	20	60	1200	15	18	LED	17,96	7,74
8	Компрессорная	40	20	800	16	12,8	LED	12,77	5,50
9	Склад цемента с разгрузочным устройством	50	20	1000	19	19	LED	18,95	8,17
10	Бетонорастворный цех	40	20	800	12	9,6	LED	9,58	4,13
11	Ремонтно-механический цех	15	30	450	18	8,1	LED	8,08	3,48
12	Склад готовой продукции завода	15	60	900	20	18	LED	17,96	7,74
13	Кузнечный	60	20	1200	20	24	LED	23,94	10,32
14	Склад	30	15	450	15	6,75	LED	6,73	2,90
15	Арматурный цех	40	15	600	15	9	LED	8,98	3,87
16	Насосная перекачки сточных вод	20	40	800	16	12,8	LED	12,77	5,50
17	Насосная водопровода	15	25	375	16	6	LED	5,99	2,58
18	Котельная	30	30	900	14	12,6	LED	12,57	5,42
-	Наружное освещение территории завода	300	200	60000	4	240	LED	239,40	103,20
Всего по заводу		-	-	74425	-	486,55	-	485,33	209,217

Результаты расчёта электрических суммарных нагрузок, с учётом полученных расчётных данных нагрузок по силовой и осветительной сети системы электроснабжения цементного завода, представлены в работе в форме таблицы 4.

Таблица 4 – Результаты расчёта суммарных электрических нагрузок системы электроснабжения цементного завода

Наименование цеха	$P_{p.n.}$ кВт	$P_{p.o.}$ кВт	$Q_{p.n.}$ квар	$Q_{p.o.}$ квар	$P_p$ кВт	$Q_p$ квар	$S_p$ кВА	$\Delta P_m$ кВт	$\Delta Q_m$ квар
Административное помещение	31,5	22,74	41,90	9,80	54,24	51,70	74,93	1,50	7,49
Столовая	440	15,16	514,80	6,54	455,16	521,34	455,16	9,10	45,52
Известегасильный цех	312	11,97	365,04	5,16	323,97	370,20	491,94	9,84	49,19
Электроцех	520	13,47	608,40	5,81	533,47	614,21	813,53	16,27	81,35
Склад заполнителей	800	11,37	600,00	4,90	811,37	604,90	1012,04	20,24	101,20
Завод изделий из ячеистых бетонов	1040	14,96	1216,80	6,45	1054,96	1223,25	1615,33	32,31	161,53
Склад металла и готовой продукции	160	17,96	120,00	7,74	177,96	127,74	177,96	3,56	17,80
Компрессорная	162,5	12,77	190,13	5,50	175,27	195,63	262,66	5,25	26,27
Склад цемента с разгрузочным устройством	304	18,95	228,00	8,17	322,95	236,17	400,09	8,00	40,01
Бетонорастворный цех	390	9,58	456,30	4,13	399,58	460,43	609,64	12,19	60,96
Ремонтно-механический цех	284	8,08	213,00	3,48	292,08	216,48	292,08	5,84	29,21
Склад готовой продукции завода	97,5	17,96	114,08	7,74	115,46	121,82	167,84	3,36	16,78
Кузнечный	80	23,94	60,00	10,32	103,94	70,32	125,49	2,51	12,55
Склад	58,5	6,73	68,45	2,90	65,23	71,35	96,67	1,93	9,67
Арматурный цех	304	8,98	228,00	3,87	312,98	231,87	312,98	6,26	31,30
Насосная перекачки сточных вод	975	12,77	1140,75	5,50	987,77	1146,25	1513,14	30,26	151,31
Насосная водопровода	640	5,99	480,00	2,58	645,99	482,58	806,34	16,13	80,63
Котельная	97,5	12,57	114,08	5,42	110,07	119,49	162,46	3,25	16,25
Наружное освещение территории завода	-	239,40	-	103,20	239,40	103,20	260,70	5,21	26,07
Итого на стороне 10 кВ, без учёта КРМ	6696,5	485,33	6759,71	209,22	7181,83	6968,92	9650,97	193,02	965,10
Потери в трансформаторах ГПП с учётом КРМ	-	-	-	-	336,66	2358,88	2382,78	47,66	238,28
Итого на стороне ВН ГПП завода	-	-	-	-	7518,49	4610,04	8819,31	-	-

Таким образом, в работе рассчитаны нагрузки отдельных цехов и потребителей, а также всей системы электроснабжения цементного завода в целом, исходя из расчётных коэффициентов, установленной мощности нагрузок и режима работы системы электроснабжения объекта проектирования.

Выводы по разделу.

В работе, исходя из выходных технических данных на выполнение работы, с учётом справочных нормативных коэффициентов, проведён расчёт электрической нагрузки системы электроснабжения цементного завода.

Рассчитаны нагрузки отдельных цехов, а также всей системы электроснабжения цементного завода в целом, исходя из расчётных коэффициентов, установленной мощности нагрузок и режима работы системы электроснабжения объекта проектирования.

Полученные результаты электрических нагрузок отдельных цехов и потребителей, а также всей системы электроснабжения цементного завода в целом, будут использованы для расчёта максимальных рабочих токов с последующими выбором и проверкой силовых трансформаторов, проводников линий, сборных шин, а также нового основного оборудования распределительных устройств электрической части ГПП и цеховых ТП объекта проектирования.

## **Выбор количества, типа и номинальной мощности трансформаторов**

### **Выбор трансформаторов ГПП системы электроснабжения цементного завода**

Далее в работе проводится выбор числа и мощности трансформаторов для установки на понизительных подстанциях проектируемой системы электроснабжения цементного завода.

Исходя из принятой схемы электроснабжения объекта проектирования, выбор трансформаторов необходимо провести на таких системных подстанциях завода:

- на главной понизительной подстанции (ГПП-110/10 кВ);
- на всех цеховых трансформаторных подстанциях (в зависимости от их количества).

«Как было указано ранее, на главной понизительной подстанции ГПП-110/10 кВ в системе электроснабжения» [18] цементного завода проектирования, в связи с наличием значительной группы потребителей, относящихся к 1 и 2 категории надёжности, рекомендовано установить два силовых трансформатора 110/10 кВ с системой охлаждения, обладающей принудительным воздушным дутьём и регулировкой напряжения ответвлений НН под нагрузкой (система РПН).

Далее в работе проводится выбор рациональных номинальных напряжений для применения на ГПП схемы внешнего электроснабжения цементного завода.

Рассматриваются номинальные классы напряжения для применения во внешней и внутренней схемах электроснабжения объекта проектирования.

Для определения рационального значения номинального напряжения на ГПП в системе внешнего напряжения, в схеме электроснабжения проектируемого цементного завода, используется формула Стила:

$$U_{рац} = 4,34\sqrt{L + 16 \cdot P}, \quad (11)$$

где  $L$  – «длина питающей линии, км» [10];

$P$  - «суммарная передаваемая мощность в сети, МВт» [12].

«По условию (11) для ГПП внешней СЭС проектируемого цементного завода» [1]:

$$U_{рац} = 4,34\sqrt{7,5 + 16 \cdot 12,125} = 61,6 \text{ кВ.}$$

Принимается ближайшее стандартное значение номинального напряжения внешней системы электроснабжения проектируемого объекта, равного значению 110 кВ (с учётом перспективы развития электрической сети промышленного района, в котором предусматривается сооружение проектируемого цементного завода) [3].

При выборе напряжения внутренней системы и схемы электроснабжения проектируемого цементного завода, исходя из той же шкалы номинальных напряжений, и учитывая рекомендации [7], принимается номинальное напряжение 10 кВ, которое эффективнее напряжения 6 кВ.

Таким образом, окончательно установлено, что питание проектируемой системы электроснабжения цементного завода, целесообразно осуществить от главной понизительной подстанции (ГПП) с номинальными классами напряжения 110/10 кВ.

На основе полученных расчётных данных, далее в работе проводится решение поставленных основных задач по выбору трансформаторов ГПП-110/10 кВ и цеховых ТП-10/0,4 кВ.

Учитывая полученные значения показателей и технических данных, полученных в результате расчёта нагрузки потребителей системе

электроснабжения цементного завода, проводится расчётная проверка мощности новых трансформаторов на ГПП-110/10 кВ предприятия.

С учётом систематических нагрузок, а также вероятности послеаварийных перегрузок в системе электроснабжения цементного завода, расчётная мощность трансформатора на питающей заводской ГПП-110/10 кВ определяется из соотношения [10]:

$$S_{ном.} \geq \frac{S_p}{N \cdot k_{загр}}, \quad (12)$$

где « $k_{загр}$  – рекомендуемый минимальный коэффициент загрузки трансформаторов» [10];

« $n$  – количество трансформаторов, шт.» [11].

Значит:

$$S_{ном} \geq \frac{8819,31}{2 \cdot 0,65} = 6784,1 \text{ кВА.}$$

«Выбираются два силовых трансформатора марки ТДН-10000/110 с высшим напряжением 110 кВ и низшим напряжением 10 кВ» [14].

«Известно, что силовой трансформатор на подстанции в нормальном режиме» [10] должен работать с коэффициентом загрузки, не превышающим значение 0,65-0,7.

Это условие выражается так [15]:

$$K_{з.н.} = \frac{S_p}{n \cdot S_{ном}} \leq 0,65 \div 0,7. \quad (13)$$



Таким образом, коэффициент загрузки трансформатора подстанции ГПП-110/10 кВ в системе электроснабжения цементного завода «в нормальном режиме не превышает предельно установленные значения» [10]:

$$K_{з.н.} = \frac{8819,31}{2 \cdot 10000} = 0,44 \leq 0,65 \div 0,7.$$

В послеаварийном режиме коэффициент загрузки трансформатора не должен быть выше значения 1,4, с учётом нагрузки всей ГПП-110/10 кВ, которая будет приходиться на один трансформатор, оставшийся в работе [11]:

$$K_{з.а.} = \frac{S_p}{S_{ном}} \leq 1,35 \div 1,4. \quad (14)$$

Коэффициент загрузки трансформатора ГПП-110/10 кВ в системе электроснабжения цементного завода, в послеаварийном режиме также удовлетворяет условию:

$$K_{з.а.} = \frac{8819,31}{10000} = 0,88 \leq 1,35 \div 1,4.$$

Таким образом, в работе расчётным путём установлено, что для питания проектируемой внешней системы электроснабжения цементного завода, «на ГПП-110/10 кВ объекта проектирования целесообразно установить два силовых трансформатора номинальной мощностью 10000 кВА каждый (марки ТДН-10000/110). Каждый силовой трансформатор» [20] ГПП-110/10 кВ будет работать на свою секцию сборных шин 10 кВ в РУ-10 кВ, от которой получают питание понизительные цеховые ТП-10/0,4 кВ проектируемой системы электроснабжения цементного завода.

### **3.2 Выбор трансформаторов цеховых ТП системы электроснабжения цементного завода**

Далее в работе необходимо рассчитать суммарную нагрузку цеховых ТП-10/0,4 кВ, так как они являются нагрузкой РУ-10 кВ ГПП-110/10 кВ проектируемой системы внешнего электроснабжения цементного завода.

Выбор трансформаторов цеховых ТП системы электроснабжения цементного завода зависит от нескольких факторов, включая:

- мощность нагрузки цехов системы электроснабжения: трансформаторы должны быть выбраны в соответствии с требуемой мощностью системы электроснабжения цехов и оборудования цементного завода;
- тип и характеристики нагрузки: различные типы оборудования и машин имеют различные требования к электроснабжению. Поэтому важно учитывать тип и характеристики нагрузки при выборе трансформаторов;
- напряжение и частота: трансформаторы должны соответствовать напряжению и частоте сети электроснабжения, а также требованиям оборудования цехов;
- экономические факторы: важно учитывать стоимость трансформаторов, их энергетическую эффективность и долговечность;
- требования по надежности и безопасности: трансформаторы должны соответствовать требованиям по надежности и безопасности, чтобы обеспечить стабильное электроснабжение цехов и предотвратить возможные аварии;
- наличие резервных трансформаторов: необходимо учитывать наличие резервных трансформаторов, которые могут быть использованы в случае аварии или профилактических работ.

В зависимости от этих факторов, выбираются оптимальные трансформаторы для системы электроснабжения цехов цементного завода.

С учётом неравномерности распределения нагрузки на территории предприятия, в работе предлагается:

- выбрать все цеховые ТП-10/0,4 кВ двухтрансформаторными, что значительно упростит подключение всех потребителей и уменьшит количество подстанций и промежуточных звеньев;
- в первую очередь, предусмотреть питание потребителей I и II категорий надёжности от каждой цеховой ТП-10/0,4 кВ двумя линиями от разных трансформаторов, потребители III категории подключать к существующим ТП-10/0,4 кВ с учётом близости и максимальной допустимой нагрузки на трансформаторы подстанций.

Исходя из этого, в системе внутреннего электроснабжения цементного завода, для питания нагрузки цехов и участков предприятия, в работе предусмотрены три двухтрансформаторные подстанции ТП-10/0,4 кВ.

Они устанавливаются на всех трёх производственных объектах, относящихся к I категории надёжности (основные производственные отделения, относящихся к I категории надёжности).

Таким образом, данные цеховые ТП-10/0,4 кВ будут находиться в таких цехах:

- ТП-1 – известегасильный цех;
- ТП-2 – завод изделий из ячеистых бетонов;
- ТП-3 – бетонорастворный цех.

От них получают питание потребители II категорий двумя кабельными линиями (с резервированием), и потребители III категории одной кабельной линией (без резервирования).

При этом основным критерием для присоединения цехов к той или иной цеховой ТП-10/0,4 кВ, являются следующие основные факторы:

- близость расположения цехов к соответствующим цеховым ТП;

- суммарная номинальная мощность группы потребителей, которая регламентируется и ограничивается «потолком» номинальных мощностей силовых трансформаторов 10/0,4 кВ;
- суммарное количество цехов (участков), которые присоединяются к одной ТП (рекомендуется присоединять к одной цеховой ТП не более 10-12 цехов (участков) предприятия), что ограничено количеством присоединений в распределительных устройствах ВН и НН на цеховых ТП.

Минимальная мощность трансформатора ЦТП-10/0,4 кВ цементного завода [12]:

$$S_{\text{ном.т}} \geq S_{\text{ном.т.р}} = \frac{\Sigma P_{\text{р.}}}{N \beta_{\text{т}}}, \quad (15)$$

$S_{\text{ном.т.р}}$  – расчетная мощность силового трансформатора, кВА» [12];

« $\Sigma P_{\text{р.}}$  – активная нагрузка объектов, питающихся от ЦТП, кВт» [12];

« $N$  – количество трансформаторов цеховой ТП, шт.» [12].

При этом, суммарная активная нагрузка, которая приходится на ТП-1, равна сумме активных нагрузок цехов, которые получают от неё питание:

$$\Sigma P_{\text{р.}} = P_{\text{р.1}} + P_{\text{р.2}} + \dots + P_{\text{р.п.}} \quad (16)$$

Суммарная расчётная активная нагрузка цеховой ТП-1 (10/0,4 кВ) по условию (16):

$$\Sigma P_{\text{р.}} = 323,97 + 455,16 + 54,24 + 533,47 + 177,96 + 322,95 = 1867,75 \text{ кВт.}$$

«Расчётная мощность силового трансформатора для установки на цеховой ТП-1» [12]:

$$S_{\text{ном.т}} \geq S_{\text{ном.т.р}} = \frac{1867,75}{2 \cdot 0,8} = 1167,3 \text{ кВА.}$$

«Для установки на цеховой ТП-1 цементного завода, в работе приняты два силовых трансформатора марки ТМГ-1600/10» [12].

«Выбор остальных трансформаторов цеховых ТП-10/0,4 кВ проведён аналогично и результаты приведены в таблице 5» [12].

Таблица 5 – Результаты выбора трансформаторов цеховых ТП-10/0,4 кВ

Номер цеховой ТП	Наименование цеха (участка)	$P_p$ , кВт	$P_{p.ТП}$ , кВт	Категория надёжности	Количество (единиц) и тип силовых трансформаторов
ТП-1	Известегасильный цех	323,97	1867,75	I	2×ТМГ-1600/10У1
	Столовая	455,16		III	
	Административное помещение	54,24		III	
	Электроцех	533,47		II	
	Склад металла и готовой продукции	177,96		III	
	Склад цемента с разгрузочным устройством	322,95		III	
ТП-2	Завод изделий из ячеистых бетонов	1054,96	3146,18	I	2×ТМГ-2000/10У1
	Склад заполнителей	811,37		III	
	Ремонтно-механический цех	292,08		II	
	Насосная перекачки сточных вод	987,77		II	
ТП-3	Бетонорастворный цех	399,58	1928,52	I	2×ТМГ-1600/10У1
	Компрессорная	175,27		III	
	Склад готовой продукции завода	115,46		III	
	Кузнечный	103,94		II	
	Склад	65,23		III	
	Арматурный цех	312,98		II	
	Насосная водопровода	645,99		II	
	Котельная	110,07		II	

Все трансформаторы подходят для установки на ЦТП-10/0,4 кВ системы электроснабжения цементного завода. Таким образом, в результате проведения расчётов и проверок, установлено, что на цеховых ТП-1 и ТП-3

устанавливаются по два силовых трансформатора марки ТМГ-1600/10 У1, а на цеховой ТП-3 – два силовых трансформатора марки ТМГ-2000/10 У1.

Следовательно, вся нагрузка, приходящаяся на цеховые ТП-10/0,4 кВ, на территории предприятия будет распределена относительно равномерно.

### **Выбор конденсаторных установок на цеховых ТП системы электроснабжения цементного завода**

При выборе силовых трансформаторов цеховых ТП-10/0,4 кВ, следует также провести проверку целесообразности компенсации реактивной составляющей мощности в электрической сети, которую питают трансформаторы ЦТП.

Проверка начинается с определения целесообразной реактивной мощности через ЦТП и проводится по следующему условию [9]:

$$Q_{\max,m} = \sqrt{\left(N_{\text{опт}} \beta_{\text{норм.м}} S_{\text{ном}}\right)^2 - P_p^2}. \quad (17)$$

На всех ЦТП-10/0,4 кВ проектируемой системы электроснабжения цементного завода, устанавливаются компенсирующие батареи конденсаторов с напряжением 0,4 кВ.

Их реактивная мощность [9]:

$$Q_{\text{НБК}} = Q_p - Q_{\max,m}. \quad (18)$$

Для трансформаторов, предварительно выбранных на цеховой ТП-1:

$$Q_{\max,m} = \sqrt{(2 \cdot 0,8 \cdot 1600)^2 - 1867,75^2} = 1750,7 \text{ квар.}$$

При этом, суммарная реактивная нагрузка, которая приходится на ТП-1, равна сумме реактивных нагрузок цехов, которые получают от неё питание:

$$Q_p = Q_{p.1} + Q_{p.2} + \dots + Q_{p.n}. \quad (19)$$

Суммарная расчётная реактивная нагрузка цеховой ТП-1 (10/0,4 кВ) по условию (19):

$$Q_p = 51,70 + 521,34 + 370,20 + 614,21 + 127,74 + 236,17 = 1921,35 \text{ квар.}$$

Суммарная реактивная мощность, которая подлежит компенсации на цеховой ТП-1:

$$Q_{\text{НБК}} = 1921,35 - 1750,7 = 170,65 \text{ квар.}$$

Для установки на цеховой ТП-1 системы электроснабжения цементного завода, принимаются две конденсаторные установки марки КРМ-0,4-85-2,5-54У3 с номинальной реактивной мощностью каждой 85 квар.

Выбранные КУ устанавливаются на двух секциях сборных шин ЦТП-10/0,4 кВ.

Их суммарная реактивная мощность составит 170,0 квар.

Таким образом, на ТП-1 реактивная составляющая нагрузки будет скомпенсирована полностью путём установки двух КУ марки КРМ-0,4-85-2,5-54У3.

Аналогично проведены расчёт и выбор КУ-0,4 кВ на остальных цеховых ТП-10/0,4 кВ проектируемой системы электроснабжения цементного завода (таблица б).

Таблица 6 – Выбор компенсации реактивной составляющей нагрузки на шинах 0,4 кВ цеховых ТП-10/0,4 кВ

ТП	EMBED Equation.DSM кВт	$S_{ном.мп}$ , кВА	EMBED Equation.DSMT кВАр	EMBED Equation. кВАр	EMBED Equation. кВАр	Типономинал КУ	Количество × мощность КУ, шт × квар
ТП1	1867,75	2×1600	1750,7	1921,35		КРМ-0,4-85-2,5-54У3	2×85
ТП2	3146,18	2×2000		3190,9		УКРМ-0,4-1300-2,5-54У3	2×1300
ТП3	1928,52	2×1600	1683,6	1753,49		КРМ-0,4-30-2,5-54У3	2×30

Схема КУ-0,4 кВ для применения в СЭС цементного завода показана в графической части работы.

Выводы по разделу.

В результате проведения выбора и проверок силовых трансформаторов для установки в системе электроснабжения цементного завода установлено следующее:

- питание проектируемой системы электроснабжения цементного завода, целесообразно осуществить от главной понизительной подстанции (ГПП) с номинальными классами напряжения 110/10 кВ;
- для питания проектируемой внешней системы электроснабжения цементного завода, на ГПП-110/10 кВ целесообразно установить два силовых трансформатора ТДН-10000/110;
- в системе внутреннего электроснабжения цементного завода, для питания нагрузки цехов и участков предприятия, предусмотрены три двухтрансформаторные подстанции ТП-10/0,4 кВ. Установлено, что на цеховых ТП-1 и ТП-3 устанавливаются по два силовых трансформатора марки ТМГ-1600/10 У1, а на цеховой ТП-3 – два силовых трансформатора марки ТМГ-2000/10 У1.

Проведён выбор компенсации реактивной составляющей нагрузки в сети 0,4 кВ системы электроснабжения, для чего выбраны компенсирующие



устройства в виде конденсаторных установок для их установки на шинах 0,4 кВ цеховых ТП-10/0,4 кВ.

## **Анализ и выбор схемы для распределения электроэнергии по территории цементного завода**

Ранее в работе, в результате проведения технического анализа, расчётным путём было установлено, что для проектируемой системы электроснабжения цементного завода, наиболее рационально подходит высшее напряжение, равное 110 кВ, а для внутренней системы объекта проектирования – напряжение 10 кВ.

Также было установлено, что основным и единственным источником питания во внешней системе электроснабжения проектируемого цементного завода, является двухтрансформаторная питающая ГПП-110/10 кВ.

«В системе электроснабжения цементного завода преобладают потребители II-й категории по надежности электроснабжения, поэтому электроснабжение завода осуществляется по двухцепной ЛЭП с установкой на ГПП двух трансформаторов» [5].

Для схемы внешнего электроснабжения завода, на питающей ГПП-110/10 кВ принимается схема «Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий».

Данная схема ВН ГПП-110/10 кВ выполнена с резервированием при двух силовых трансформаторах, при этом сама ГПП-тупиковая.

Указанная схема подходит по всем критериям и параметрам для установки на стороне ВН ГПП-110/10 кВ цементного завода.

На основании проведённого анализа, в работе составляется «структурная схема ГПП-110/10 кВ внешней системы электроснабжения цементного завода (рисунок 3)» [1].

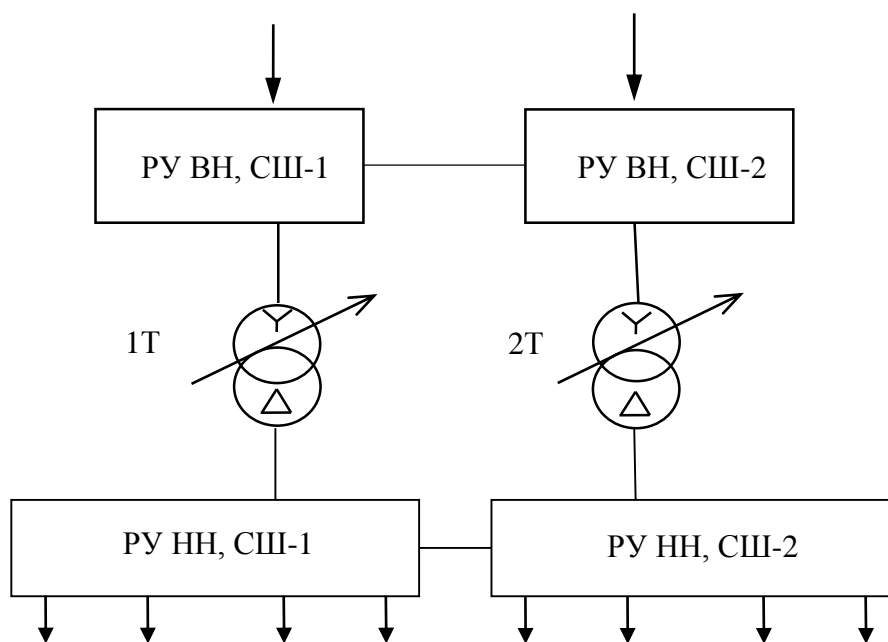


Рисунок 3 – Структурная схема ГПП-110/10 кВ системы электроснабжения цементного завода

Для низшего напряжения структурной схемы внешнего электроснабжения цементного завода, ранее в работе обосновано и принято номинальное напряжение 10 кВ. Для применения в РУ-10 кВ питающей ГПП, принимается наиболее рациональная схема «Одна секционированная система шин» [4,20]. Секционный выключатель в нормальном режиме работы схемы РУ-10 кВ ГПП-110/10 кВ отключён, режим работы – раздельный. От шин РУ-10 кВ ГПП-110/10 кВ схемы внешнего электроснабжения цементного завода, получают питание цеховые трансформаторные подстанции 10/0,4 кВ.

Количество трансформаторных цеховых подстанций 10/0,4 кВ выбрано в работе ранее и составляет три двухтрансформаторных ТП-10/0,4 кВ.

Для их питания от РУ-10 кВ ГПП-110/10 кВ, исходя из заявленной категории надёжности потребителей, применения наиболее рациональная схема «Радиальная схема с резервированием на секции шин источника питания (РУ-10 кВ ГПП-110/10 кВ)» [4,20]. Такая схема наиболее проста в исполнении и обладает наиболее высокой надёжностью, простотой монтажа, отстройки уставок РЗиА и подходит для питания ответственных потребителей. Для непосредственного применения на всех

двухтрансформаторных ЦТП-10/0,4 кВ, питающих потребители 1 и 2 категории надёжности, принимается «Радиальная схема с резервированием на секции шин РУ-10 кВ и РУ-0,4 кВ». Секционные выключатели, установленные на всех ТП-10/0,4 кВ с низкой стороны, в нормальном режиме работы отключены, обеспечивая отдельный режим работы секций сборных шин 0,4 кВ подстанций. Такая схема – надёжна и экономична.

Таким образом, установлено, что все выбранные в работе схемы электрических соединений проектируемой системы электроснабжения цементного завода, отвечают требованиям нормативных документов, поэтому могут быть приняты к использованию на объекте проектирования.

Все принятые в работе схемные решения показаны в графической части работы.

Выводы по разделу.

Исходя из результатов проведённого сравнительного анализа, проведено аргументированное обоснование и выбраны рациональные схемы электрических соединений системы электроснабжения цементного завода:

- для применения в распределительной сети 10 кВ, принимается наиболее рациональная схема «Радиальная схема с резервированием на секции шин источника питания (РУ-10 кВ ГПП)»;
- для применения на всех двухтрансформаторных ЦТП-10/0,4 кВ, питающих потребители 1 и 2 категории надёжности внутренней СЭС, принимается «Радиальная схема с резервированием на секции шин РУ-10 кВ и РУ-0,4 кВ».

Таким образом, на основе проведения анализа литературных источников [8], [12] установлено, что все выбранные в работе схемные решения являются наиболее рациональными для их практического внедрения в системе электроснабжения цементного завода.

## Расчёт токов коротких замыканий

Известно, что устанавливаемое электрооборудование, должно быть проверено по устойчивости к токам короткого замыкания КЗ. Если токи короткого замыкания превышают номинальные данные оборудования, то данное оборудование не должно применяться при построении системы электроснабжения предприятия.

В работе проводится расчёт значения максимального тока трёхфазного короткого замыкания на сборных шинах ГПП-110/10 кВ проектируемой внешней системы электроснабжения цементного завода, по которому будут проверены на термическую и электродинамическую стойкость электрические аппараты и шинные конструкции, выбранные для установки в соответствующих распределительных устройствах ГПП-110/10 кВ и цеховых ТП-10/0,4 кВ.

Кроме того, по минимальным значениям тока КЗ на шинах всех РУ проектируемой внешней системы электроснабжения цементного завода должны быть проверены уставки релейной защиты на надёжность срабатывания.

Также для расчета токов КЗ на шинах проектируемой внешней системы электроснабжения цементного завода в максимальном режиме работы системы, составляется схема замещения (рисунок 4) [14].

В исходной схеме представлены все три класса напряжения, которые применяются в системе электроснабжения цементного завода: 110 кВ, 10 кВ и 0,4 кВ.

Они преобразуются с помощью следующих трансформаторов, показанных на схеме (рисунок 13):

- Т1 – трансформатор ГПП-110/10 кВ;
- Т2 – трансформаторы ЦТП-10/0,4 кВ (принимается для примера трансформатор, установленный на ЦТП-2 мощностью 2000 кВА).

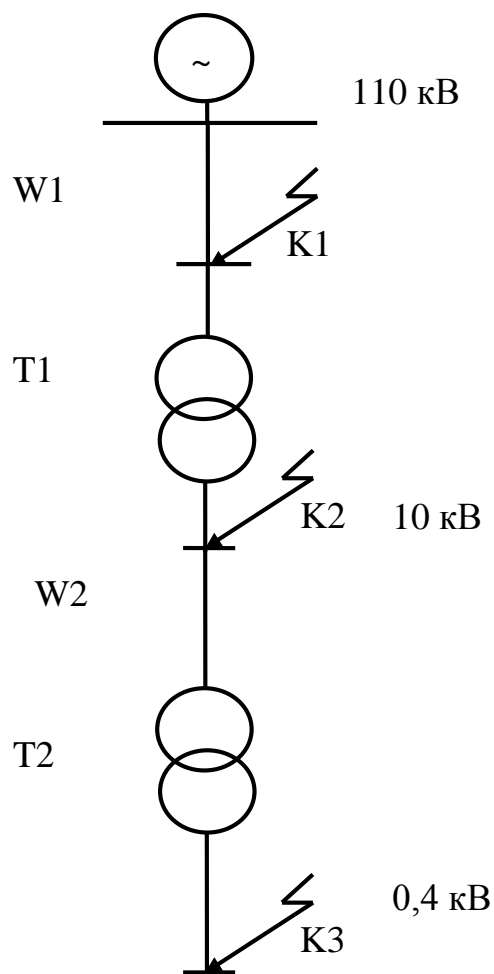


Рисунок 4 – Исходная расчётная схема для расчёта токов КЗ в системе электроснабжения цементного завода

Для составления схемы замещения, каждый элемент замещается эквивалентным сопротивлением. В сети выше 1 кВ, значение тока КЗ нужно рассчитать на выводах силового трансформатора ГПП (напряжения, соответственно, 110 кВ и 10 кВ), в сети 0,4 кВ – на выводах силового трансформатора ЦТП-10/0,4 кВ с низкой стороны.

Как правило, в сети напряжением выше 1 кВ решающее значение имеют индуктивные сопротивления элементов. Значениями активных сопротивлений при расчёте токов КЗ в таком случае можно пренебречь [17].

Составляется исходная «схема замещения по расчётной схеме электрической сети. Исходная схема замещения для расчёта токов КЗ в системе электроснабжения цементного завода в работе представлена на рисунке 5» [12].

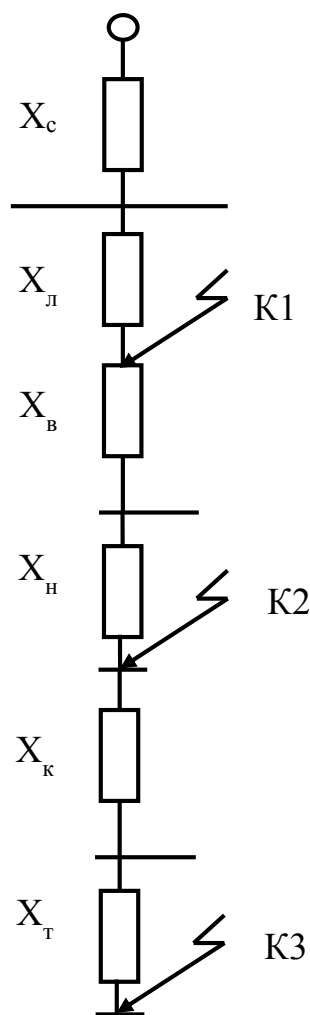


Рисунок 5 – Исходная схема замещения для расчёта токов КЗ в системе электроснабжения цементного завода

В исходной схеме для расчёта токов КЗ необходимо учесть все основные элементы, которые влияют на результаты расчёта своими индуктивными сопротивлениями, которые необходимо учитывать в данных схемах в первую очередь [12]. «В качестве основной базисной ступени для расчёта в работе выбирается ступень высшего напряжения – 110 кВ» [12]. Вторая ступень 10 кВ, а также третья ступень 0,4 кВ, будут неосновными ступенями напряжения.

Базисная мощность принимается равной номинальной мощности силового трансформатора системы электроснабжения цементного завода, оставшегося в работе в послеаварийном режиме (при этом второй

трансформатор подстанции отключён, что отображено в расчётной схеме и схеме замещения, а также учтено при расчётах далее) [12]:

$$S_{\sigma} = 10000 \text{ кВА} = 10 \text{ МВА}.$$

Базисные напряжения для двух ступеней трансформации схемы (110 кВ и 10 кВ) системы электроснабжения цементного завода, принимаются равными напряжениям на шинах ГПП в максимальном режиме работы. Они определены ниже с учётом данного факта. Базисное напряжение для ступени напряжения 110 кВ (основная ступень):

$$U_{\sigma 1} = 115 \text{ кВ}.$$

Базисное напряжение для ступени напряжения 10 кВ (неосновная ступень):

$$U_{\sigma 2} = 10,5 \text{ кВ}.$$

Базисное напряжение для ступени напряжения 0,38/0,22 кВ (неосновная ступень):

$$U_{\sigma 3} = 0,4 \text{ кВ}.$$

Базисный ток на ступенях системы электроснабжения цементного завода рассчитывается по известной формуле:

$$I_{\sigma} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3}U_{\sigma}}. \quad (20)$$



Базисный ток для всех ступеней трансформации схемы (110 кВ, 10 кВ и 0,4 кВ) системы электроснабжения цементного завода определён ниже по условию (20).

Базисный ток для ступени напряжения 110 кВ (основная ступень):

$$I_{\sigma 1} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,08 \text{ кА.}$$

Базисный ток для ступени напряжения 10 кВ (неосновная ступень):

$$I_{\sigma 2} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 0,88 \text{ кА.}$$

Базисный ток для ступени напряжения 0,38 кВ (неосновная ступень):

$$I_{\sigma 3} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 23,1 \text{ кА.}$$

Далее проводится расчёт параметров схемы замещения в системе электроснабжения цементного завода в относительных единицах, с последующим приведением их к именованным. Сопротивление энергетической системы в работе определяется по формуле:

$$x_{c*} = \frac{S_{\sigma}''}{S_{\kappa}}, \text{ о.е.}, \quad (21)$$

где « $S_{\kappa}''$  - полная мощность трёхфазного КЗ на шинах энергосистемы» [12].

$$x_{c*} = \frac{16}{500} = 0,032 \text{ о.е.}$$

«Сопротивление питающей ВЛ-110 кВ системы электроснабжения цементного завода с учётом её длины, в относительных единицах, при приведении к базисным условиям» [12]:

$$x_{*l} = x_0 \cdot L \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}}^2}, \text{ o.e.}, \quad (22)$$

где « $x_0$  - удельное индуктивное сопротивление ВЛ, Ом/км» [10];

« $L$  - суммарная длина ВЛ, км» [15].

Согласно условия (22), индуктивное значение сопротивления для питающей ВЛ-110 кВ:

$$x_{*l} = 0,4 \cdot 6 \cdot \frac{10}{115^2} = 0,006 \text{ o.e.}$$

Аналогично для питающей КЛ-10 кВ (к цеховой ТП-2):

$$x_{*k} = 0,4 \cdot 1 \cdot \frac{10}{10^2} = 0,04 \text{ o.e.}$$

Далее проводится расчёт индуктивных сопротивлений силового трансформатора ГПП системы электроснабжения цементного завода с учётом паспортных данных, в относительных единицах, при приведении к базисным условиям [12].

Для обмотки ВН (110 кВ) трансформатора, оставшегося в работе на ГПП цементного завода:

$$X_{\epsilon} = \frac{0,125 \cdot U_{\text{квн}\%} \cdot S_{\bar{\sigma}}}{100 \cdot S_{\text{н.т.}}} \quad (23)$$

Согласно условия (23):

$$X_{\sigma} = \frac{0,125 \cdot 10,5 \cdot 10}{100 \cdot 10} = 0,01 \text{ о.е.}$$

Для обмотки НН (10 кВ) трансформатора, оставшегося в работе на ГПП цементного завода в результате ПАВ режима:

$$X_n = \frac{1,75 \cdot U_{квн\%} S_{\sigma}}{100 \cdot S_{н.т.}}. \quad (24)$$

Согласно условия (24):

$$X_n = \frac{1,75 \cdot 10,5 \cdot 10}{100 \cdot 10} = 0,18 \text{ о.е.}$$

Для трансформатора цеховой ТП-2 (2000 кВА), при приведении к базисным условиям:

$$X_m = \frac{1,75 \cdot 7,5 \cdot 10}{100 \cdot 2,0} = 0,525 \text{ о.е.}$$

Начальное значение периодической составляющей тока трёхфазного КЗ, при приведении к базисным условиям, в именованных единицах [12]:

$$I'' = \frac{E''}{x_{рез}^*} \cdot I_{\sigma}. \quad (25)$$

Далее, исходя из определённых ранее индуктивных сопротивлений всех основных элементов схемы замещения, определяются результирующие

(эквивалентные) сопротивления к каждой точке КЗ. «Результирующее сопротивление к точке К1 в относительных расчётных единицах» [12]:

$$x_{рез} = x_c + x_l, o.e. \quad (26)$$

«Согласно условия (26)» [12]:

$$x_{рез} = 0,032 + 0,006 = 0,038 o.e.$$

«Начальное значение периодической составляющей тока короткого замыкания в расчётной точке К1, при приведении к базисным условиям, в именованных единицах по (25)» [12]:

$$I''_{к1} = \frac{1}{0,038} \cdot 0,16 = 4,21 \text{ кА.}$$

«Результирующее сопротивление к точке К2 в относительных расчётных единицах» [12]:

$$x_{рез} = x_c + x_l + x_g + x_H, o.e. \quad (27)$$

«Согласно условия (27)» [12]:

$$x_{рез} = 0,032 + 0,006 + 0,01 + 0,18 \approx 0,228 o.e.$$

«Начальное значение периодической составляющей тока короткого замыкания в расчётной точке К2, при приведении к базисным условиям, в именованных единицах по (25)» [12]:

$$I''_{к2} = \frac{1}{0,228} \cdot 0,88 = 3,86 \text{ кА.}$$

«Результирующее сопротивление к точке К3 в относительных расчётных единицах» [12]:

$$x_{рез} = x_c + x_l + x_b + x_n + x_k + x_m, \text{ о.е.} \quad (28)$$

\*   \*   \*   \*   \*   \*   \*

«Согласно условия (28)» [12]:

$$x_{рез} = 0,032 + 0,006 + 0,01 + 0,18 + 0,04 + 0,525 \approx 0,993 \text{ о.е.}$$

\*

«Начальное значение периодической составляющей тока короткого замыкания в расчётной точке К3, при приведении к базисным условиям, в именованных единицах по (25)» [12]:

$$I''_{к3} = \frac{1}{0,993} \cdot 23,1 = 23,24 \text{ кА.}$$

Значение «ударного тока в расчётных точках схемы» [12] или начального значения апериодической составляющей тока К3 в максимальном режиме:

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot \kappa_{уд} \cdot I''_K, \text{ кА,} \quad (29)$$

где  $\kappa_{уд}$  – «ударный коэффициент» [12].

«Для точек схемы К1 и К2, ударные токи в именованных единицах» [12]:

– «в точке К1» [12]:

$$i_{уд1} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 4,21 = 10,72 \text{ кА.}$$

– «в точке К2» [12]:

$$i_{уд2} = \sqrt{2} \cdot 1,4 \cdot 3,86 = 7,64 \text{ кА.}$$

– «в точке К3» [12]:

$$i_{уд3} = \sqrt{2} \cdot 1,1 \cdot 23,24 = 36,15 \text{ кА.}$$

Значение двухфазного тока КЗ, необходимое для определения надёжности РЗиА:

$$I_{no(\min)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_K'', \text{ кА.} \quad (30)$$

Значение двухфазного тока КЗ, необходимое для определения надёжности РЗиА, по условию (30):

– в точке К1:

$$I_{no(\min)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 4,21 = 3,65 \text{ кА.}$$

– в точке К2:

$$I_{no(\min)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 3,86 = 3,34 \text{ кА.}$$

– в точке КЗ:

$$I_{no(\min)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 23,24 = 20,13 \text{ кА.}$$

Все полученные в работе результаты расчёта токов короткого замыкания в максимальном режиме на шинах 110 кВ, 10 кВ и 0,4 кВ в максимальном режиме работы системы электроснабжения цементного завода, представлены в таблице 7.

Таблица 7 – «Результаты расчёта токов короткого замыкания» [12]

Параметр	Расчётная точка КЗ		
	Точка К1	Точка К2	Точка К3
$I_K^{(3)}$ , кА	4,21	3,86	23,24
$I_K^{(2)}$ , кА	3,65	3,34	20,13
$K_{y\delta}$	1,8	1,4	1,1
$i_{y\delta}$ , кА	10,72	7,64	36,15

Полученные в работе результаты расчёта токов КЗ используются для соответствующих проверок современного оборудования ГПП СЭС цементного завода.

Выводы по разделу.

В результате выполнения работы, осуществлён расчёт следующих токов короткого замыкания в проектируемой системе электроснабжения цементного завода:

- максимальных токов трёхфазного КЗ на выводах трансформатора ГПП-110/10 кВ в максимальном режиме работы;
- минимальных токов двухфазного КЗ на выводах трансформатора ГПП-110/10 кВ в максимальном режиме работы;
- ударных токов трёхфазного КЗ на выводах трансформатора ГПП-110/10 кВ в максимальном режиме работы.

## Выбор электрических аппаратов и проводников на ГПП предприятия

### Выбор и проверка проводников на ГПП цементного завода

Все проводники в системе внешнего электроснабжения объекта – класса напряжения выше 1 кВ. Поэтому методика выбора для них будет применена также одинаковая.

Известно, что «выбор сечений проводников напряжением выше 1 кВ (питающей воздушной линии напряжением 110 кВ и распределительных кабельных линий 10 кВ)» [5] СЭС системы внешнего электроснабжения цементного завода, осуществляется по известному условию экономической плотности тока [11]:

$$S_{\text{э}} = \frac{I_{\text{р.}}}{j_{\text{ЭК}}}, \quad (31)$$

где  $I_{\text{н}}$  – расчетное значение тока линии (ток нормального режима), А;  
 $j_{\text{ЭК}}$  – «экономическая плотность тока, А/мм<sup>2</sup>» [10].

«При этом» [19]:

$$I_{\text{н}} = \frac{P_{\text{р}}}{\sqrt{3} \cdot n \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi} = \frac{S_{\text{р}}}{\sqrt{3} \cdot n \cdot U_{\text{НОМ}}}, \quad (32)$$

где « $S_{\text{р}}$  – расчётная полная нагрузка линии, кВА» [2];  
 $n$  – число рабочих цепей линии, шт.

Расчетное значение рабочего тока послеаварийного режима определяется с учётом обеспечения резервного питания от второго источника по второй цепи линии 110 кВ, и обязательном отключении нагрузки потребителей III категории надёжности в СЭС цементного завода [19]:



$$I_a = 1,4 \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot n \cdot U_{ном.}} = 1,4 \cdot I_n. \quad (33)$$

После выбора проводников воздушных и кабельных линий СЭС системы внешнего электроснабжения цементного завода, необходимо провести их проверку на работоспособность в нормальном и послеаварийном режимах работы.

«Проверка проводников воздушных и кабельных линий СЭС объекта проектирования в нормальном режиме работы» [11]:

$$I_{дон} \geq I_p, \quad (34)$$

где  $I_{дон}$  – «предельно – допустимое справочное значение тока выбранного проводника линии, А» [10].

Проверка проводников воздушных и кабельных линий СЭС системы внешнего электроснабжения цементного завода в послеаварийном режиме работы [11]:

$$I_{дон} \geq I_{p,max}, \quad (35)$$

где  $I_{p,max}$  – максимальный ток послеаварийного режима работы линии с учётом условий резервирования в схеме, А.

Кроме того, «по механической прочности проводники воздушных линий должны быть не меньшего сечения чем стандартное минимально-допустимое сечение для условий местности по гололёду и ветру, с учётом типа опор и количества цепей линии, а также» [5] коронирующего разряда (для ВЛ-110 кВ).

Выполнение данного условия проверяется по следующему соотношению:

$$S_{ст} \geq S_{мин}, мм^2. \quad (36)$$

На основе приведённых расчётных формул согласно принятой методики выбора и проверки проводов воздушных линий электропередач, проводится выбор и проверка сечения провода питающей воздушной линии ВЛ-110 кВ ГПП-110/10 кВ СЭС системы внешнего электроснабжения цементного завода.

Установлено ранее, что питание ГПП-110/10 кВ СЭС системы внешнего электроснабжения цементного завода от источника питания, осуществляется двухцепной воздушной линией электропередачи с применением провода марки АС.

В работе, для большей надёжности функционирования воздушных линий, с учетом климатических условий, для установки на новой питающей ВЛ-110 кВ, выбирается провод марки АС (стандартный сталеалюминевый проводник воздушных линий) [7].

Расчётный ток нормального режима ВЛ-110 кВ системы внешнего электроснабжения цементного завода, с учётом того, что на каждую из двух цепей линии приходится половина расчётной нагрузки объекта:

$$I_p = \frac{8819,31}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 110} \approx 23,14 \text{ А.}$$

Ток послеаварийного режима для питающей ВЛ-110 кВ ГПП-110/10 кВ системы внешнего электроснабжения цементного завода, с учётом обеспечения резервного питания от второго источника по второй цепи линии 110 кВ, и обязательном отключении нагрузки потребителей III категории надёжности в СЭС цементного завода [11]:

$$I_{p,max} = 1,4 \cdot 23,14 = 32,4 \text{ А.}$$

«Экономически выгодное сечение провода питающей ВЛ-110 кВ проектируемой системы внешнего электроснабжения цементного завода» [2]:

$$F_9 = \frac{23,14}{1,1} \approx 21 \text{ мм}^2.$$

Согласно результатам расчёта, ближайшее стандартное сечение воздушной линии 110 кВ – 25 мм<sup>2</sup>. Однако, данный результат нельзя применять без «проверки сечения линии по условиям механической прочности и условий коронирующего разряда («короны»)» [2].

Условие проверки по минимальному сечению проводника, с учётом механических и климатических условий:

$$F_{cm} \geq F_{мин}, \text{ мм}^2. \quad (37)$$

Значит:

$$70 \text{ мм}^2 = 70 \text{ мм}^2.$$

«Исходя из результатов расчёта, в работе предварительно принимается сечение провода  $F_{cm} = 70 \text{ мм}^2$  марки АС-70/11 с  $I_{дон} = 265 \text{ А}$ » [4].

«Проверка выбранного сечения провода питающей ВЛ-110 кВ по допустимому перегреву в нормальном режиме выполняется» [2]:

$$265 \text{ А} \geq 23,14 \text{ А}.$$

«Проверка выбранного сечения провода питающей ВЛ-110 кВ по допустимому перегреву в послеаварийном режиме также выполняется» [2]:

$$265 \text{ A} \geq 32,4 \text{ A.}$$

«Результаты выбора кабельных линий 10 кВ системы электроснабжения цементного завода с приведением результатов выбора и проверки, представлены в форме таблицы 8» [2].

Таблица 8 – Результаты выбора кабельных линий 10 кВ системы электроснабжения цементного завода

Линия	Длина КЛ, м	Расчётные значения			Результаты выбора	
		$I_{p \text{ норм}}, \text{ A}$	$F_{\Sigma}, \text{ мм}^2$	$F_{\text{ст.}}, \text{ мм}^2$	Марка КЛ	$I_{\text{дд}}, \text{ A}$
ГПП-ТП-1	110	92,48	57,8	50,0	АСБ-10(3×50)	132
ГПП-ТП-2	140	115,6	72,2	70,0	АСБ-10(3×70)	162
ГПП-ТП-3	120	92,48	57,8	50,0	АСБ-10(3×50)	132
ГПП-АД-10 кВ (компрессорная)	180	78,06	48,79	50,0	АСБ-10(3×50)	132

Все выбранные в работе проводники могут быть приняты для установки на объекте проектирования.

## 6.2 Выбор и проверка электрических аппаратов на ГПП цементного завода

Одним из важнейших мероприятий по проектированию системы электроснабжения цементного завода, является выбор нового оборудования для установки в распределительных устройствах высокого напряжения на ГПП-110/10 кВ.

РУ-10 кВ ЦТП-10/0,4 кВ выполняется по упрощённой схеме и коммутируется с соответствующих ячеек РУ-10 кВ ГПП-110/10 кВ. Такая схеме удобная, надёжная и практичная.

Все выбранные аппараты проверяются на соответствие условиям цепи в максимальном режиме по значениям максимального рабочего тока и тока трёхфазного КЗ.

Выбору и проверке в работе подлежат такие аппараты системы электроснабжения:

- высоковольтные выключатели – устанавливаются во всех распределительных устройствах питающей ГПП-110/10 кВ (110 кВ, 10 кВ);
- разъединители – применяются только в ОРУ-110 кВ на ГПП-110/10 кВ (в РУ-10 кВ они заменяются втычными контактами ячеек типа КРУН);
- ограничители перенапряжения – устанавливаются во всех РУ ГПП-110/10 кВ;
- измерительные трансформаторы тока и напряжения – применяются в ОРУ-110 кВ и КРУ-10 кВ ГПП по мере необходимости (зависит от схемы и мощности вторичных цепей).

Известно, что выключатели высокого напряжения – это основные аппараты для защиты и коммутации электрической сети и единственные аппараты на подстанции, которыми можно отключать сеть под нагрузкой, а также они отключают сеть при возникновении ненормальных режимов (в частности, токов КЗ).

Поэтому к выключателям предъявляются повышенные требования по коммутационной способности, а также по стойкости к сквозным токам КЗ и ударным токам.

Известно, что выбор выключателей высокого напряжения, и электрических высоковольтных аппаратов в целом, производится, исходя из следующих условий двух основных условий [18]:

- по номинальному напряжению:

$$U_{уст} \leq U_n. \quad (38)$$

где  $U_{уст}$ ,  $U_{ном}$  – соответственно напряжения установки и номинальное напряжение выключателя (параметр завода-изготовителя);

– «по максимальному рабочему току» [18]:

$$I_{\text{раб.макс}} \leq I_n. \quad (39)$$

где  $I_{\text{раб.макс}}$ ,  $I_n$  – соответственно максимальный рабочий ток ПАВ режима электроустановки и номинальное значение тока выключателя (параметр завода-изготовителя).

Проверка выключателя предполагает выполнение следующих обязательных условий [18]:

– «проверка выключателя на симметричный ток отключения» [18]:

$$I_{\pi\tau} \leq I_{\text{откн.н}}. \quad (40)$$

где « $I_{\pi\tau}$  – значение периодической составляющей тока короткого замыкания в момент начала расхождения дугогасительных контактов» [18];

« $I_{\text{откн.н}}$  – номинальный ток отключения выбранного выключателя, кА (параметр завода-изготовителя)» [18];

– «проверка выключателя на отключение асимметричного тока КЗ» [7]:

$$(\sqrt{2} \cdot I_{\pi\tau} + i_{a\tau}) \leq \sqrt{2} \cdot I_{\text{откн.н}} (1 + \beta_n), \quad (41)$$

где « $i_{a\tau}$  – значение аperiodической составляющей тока короткого замыкания в момент расхождения контактов» [7];

« $\beta_n$  – номинальное значение относительного содержания аperiodической составляющей в отключаемом токе КЗ» [7];

« $\tau$  – наименьшее время от начала короткого замыкания до момента расхождения дугогасительных контактов, определяется так» [7]:

$$t = t_{з.мин} + t_{с.в}, \quad (42)$$

где « $t_{з.мин}$  – минимальное время действия релейной защиты, с» [7];

« $t_{с.в}$  – собственное время отключения выключателя, с» [7];

– «на электродинамическую устойчивость выбранный выключатель проверяется по значению предельного сквозного тока КЗ» [18]:

$$i_y \leq i_{нр.с}, \quad (43)$$

где « $i_{нр.с}$  – действующее значение предельного сквозного тока КЗ» [18];

« $i_y$  – ударный ток короткого замыкания в цепи выключателя» [18];

– «проверка выключателя на термическую стойкость по значению теплового импульса» [18]:

$$B_k \leq I_T^2 t_T, \quad (44)$$

где « $B_k$  – тепловой импульс по расчёту,  $A^2 \cdot c$ » [18];

« $I_T$  – предельный ток термической устойчивости,  $A^2 \cdot c$ » [18];

« $t_T$  – длительность протекания тока термической устойчивости, с» [18].

«При этом тепловой импульс» [20] в системе ЭС с учётом токов КЗ и отключения цепи:

$$B_k = I_k^2 (t_{отк} + T_a). \quad (45)$$

Исходя из расположения в схеме ГПП-110/10 кВ СЭС цементного завода, высоковольтные выключатели напряжением 110 кВ и 10 кВ подразделяются на следующие типы [20]:

- высоковольтные выключатели ввода (вводные высоковольтные выключатели) – служат для приёма электроэнергии от энергосистемы с последующей её передачей на два силовых трансформатора подстанции (сеть 110 кВ), а также приёма и передачи электроэнергии от силового трансформатора на напряжении 10 кВ, в распределительную сеть РУ-10 кВ (сеть 10 кВ);
- высоковольтный выключатель секционного соединения (секционный выключатель) – необходим для обеспечения резервирования в схеме РУ-10 кВ на ГПП-110/10 кВ, автоматически включая питание оборудования от второй системы сборных шин 10 кВ;
- высоковольтные выключатели отходящих линий (линейные выключатели) – необходимы для обеспечения защиты и коммутации отходящих линий 10 кВ.

Исходя из этого, необходимо учесть расположение выключателей в схеме, так как параметры сети в различных узлах ГПП-110/10 кВ СЭС цементного завода будут также различными.

Выбор и проверка высоковольтных выключателей для установки во всех распределительных устройствах ГПП-110/10 кВ СЭС цементного завода, проводится по приведённым выше условиям (таблица 9).

Выключатели 10 кВ выбраны в таблице 10.

Также проводится выбор разъединителей для установки в РУ-110 кВ ГПП-110/10 кВ СЭС цементного завода.

Разъединитель – это аппарат для обеспечения видимого разрыва с целью безопасного проведения работ в электроустановках.

В работе для установки в сети 110 кВ на ГПП-110/10 кВ СЭС цементного завода выбираются современные разъединители.

Так как разъединители не отключают цепь под нагрузкой, они, в отличие от выключателей высокого напряжения, не проверяются на коммутационную способность при отключении токов КЗ согласно [12].



В ячейках КРУ-10 кВ ГПП-110/10 кВ проектируемой СЭС цементного завода разъединители не устанавливаются, их заменяют втычные контакты ячеек.

Также необходимо выбрать новые трансформаторы тока и напряжения (измерительные трансформаторы) для их непосредственной установки на ГПП-110/10 кВ СЭС цементного завода.

Выбор новых измерительных трансформаторов тока и напряжения в работе чрезвычайно важна, так они питают приборы учёта, контроля и управления электроэнергией, а также цепи релейной защиты, автоматики, сигнализации и телеметрии.

Известно, что выбор и проверка измерительных трансформаторов осуществляются по номинальному напряжению, максимальному рабочему току и допустимой мощности питания вторичных цепей (установленная вторичная мощность).

Результаты выбора и проверки новых трансформаторов напряжения для установки в ОРУ-10 кВ и ЗРУ-10 кВ ГПП-110/10 кВ СЭС цементного завода, представлены, соответственно, в таблицах 9 и 10.

Таблица 9 – Результаты выбора и проверки основного электрооборудования высокого напряжения для установки в РУ-110 кВ ГПП-110/10 кВ СЭС цементного завода

Условия выбора	Расчетные данные сети	Выбранные аппараты			
		Разъединитель РГ-110/1000	Выключатель ВРС-110-31,5	Трансформатор тока ТОГФ-110	Трансформатор напряжения НКФ-110
$U_{\text{сном}} \leq U_{\text{ном}}$	$U_{\text{сном}} = 110 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} = 110 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} = 110 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} = 110 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} = 110 \text{ кВ}$
$I_{\text{расч}} \leq I_{\text{ном}}$	$I_{\text{расч}} = 32,4 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А}$
$I_{\text{к}} \leq I_{\text{откл}}$	$I_{\text{к}} = 4,21 \text{ кА}$	-	$I_{\text{откл}} = 40 \text{ кА}$	-	-
$i_{\text{у}} \leq i_{\text{дин}}$	$i_{\text{уд}} = 10,72 \text{ кА}$	$i_{\text{дин}} = 63 \text{ кА}$	$i_{\text{дин}} = 31,5 \text{ кА}$	$i_{\text{дин}} = 63 \text{ кА}$	$i_{\text{дин}} = 31,5 \text{ кА}$
$B_{\text{к}} \leq I_{\text{нр}}^2 \cdot t_{\text{м}}$	$B_{\text{к}} = 85,8 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$I_{\text{нр}}^2 \cdot t_{\text{м}} = 1875 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$I_{\text{нр}}^2 \cdot t_{\text{м}} = 468,75 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$I_{\text{нр}}^2 \cdot t_{\text{м}} = 1875 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$I_{\text{нр}}^2 \cdot t_{\text{м}} = 468,75 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$
$P_{\text{расч}} \leq P_{\text{ном}}$	$P_{\text{расч}} = 12,0 \text{ кВА}$	-	-	$P_{\text{ном}} = 40 \text{ кВА}$	$P_{\text{ном}} = 64 \text{ кВА}$

Таблица 10 – Результаты выбора и проверки основного электрооборудования высокого напряжения для установки в РУ-10 кВ ГПП-110/10 кВ СЭС цементного завода

Условия выбора	Расчетные данные сети	Выключатель ВВЭ-М-10-20	Выключатель нагрузки ВНА-10/16000	Трансформатор тока ТПЛ-Э-12
$U_{\text{сном}} \leq U_{\text{ном}}$	$U_{\text{сном}} = 10 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$
$I_{\text{расч}} \leq I_{\text{ном}}$	$I_{\text{расч}} = 809,2 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 1600 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 2500 \text{ А}$
$I_{\text{кп}} \leq I_{\text{пр.с}}$	$I_{\text{кп}} = 3,86 \text{ кА}$	$I_{\text{пр.с}} = 20 \text{ кА}$	$I_{\text{пр.с}} = 20 \text{ кА}$	$I_{\text{пр.с}} = 20 \text{ кА}$
$I_{\text{к}} \leq I_{\text{откл}}$	$I_{\text{к}} = 3,86 \text{ кА}$	$I_{\text{откл}} = 40 \text{ кА}$	-	-
$i_{\text{у}} \leq i_{\text{дин}}$	$i_{\text{у}} = 7,64 \text{ кА}$	$i_{\text{дин}} = 52 \text{ кА}$	$i_{\text{дин}} = 30 \text{ кА}$	$i_{\text{дин}} = 50 \text{ кА}$
$I_{\text{пт}} \leq I_{\text{откл.ном}}$	$I_{\text{пт}} = 2,48 \text{ кА}$	$I_{\text{откл.ном}} = 20 \text{ кА}$	$I_{\text{откл.ном}} = 20 \text{ кА}$	$I_{\text{откл.ном}} = 40 \text{ кА}$
$P_{\text{расч}} \leq P_{\text{ном}}$	$P_{\text{расч}} = 12,0 \text{ кВА}$	-	-	$P_{\text{ном}} = 16 \text{ кВА}$

Всё новое выбранное оборудование распределительных устройств ГПП-110/10 кВ СЭС цементного завода удовлетворяет всем требуемым условиям и принимается для установки на объекте.

Выводы по разделу.

В работе, в результате проведения соответствующих расчётов, для питающих ВЛ-110 кВ системы электроснабжения цементного завода, принята марка провода АС-70/11с сечением токоведущей жилы 70 мм<sup>2</sup> и допустимой токовой нагрузкой  $I_{\text{дон}} = 265 \text{ А}$ . Для питания цеховых ТП-10/0,4 кВ от РУ-10 кВ ГПП-110/10 кВ, выбраны и проверены сечения всех кабельных линий с использованием марки кабелей современного типа АСБ-10. «Выбраны аппараты» [2]: «в ОРУ-110 кВ: разъединители РГ-110, выключатели ВРС-110, трансформаторы тока ТОГФ-110, трансформаторы напряжения НКФ-110» [2], в РУ-10 кВ: выключатели ВВЭ-М-10-20, выключатели нагрузки ВНА-10/16000 (для установки в РУ-10 кВ всех цеховых ТП-10/0,4 кВ), трансформаторы тока ТПЛ-Э-12.

Все выбранные и проверенные в работе аппараты соответствуют требуемым техническим нормативам и могут быть окончательно рекомендованы для установки в соответствующих распределительных устройствах СЭС цементного завода. Все принятые технические решения в работе подтверждены соответствующими расчётами.

## Заключение

В результате выполнения работы проведена разработка проекта системы электроснабжения цементного завода.

Исходя из приведённой информации, установлено, что среди потребителей проектируемой системы электроснабжения цехов и участков цементного завода, на территории предприятия расположено восемнадцать основных подразделений, из которых три относятся к I категории надёжности, восемь подразделений – ко II категории и семь подразделений – к III категории надёжности.

Показано, что разработка качественного проекта системы электроснабжения цементного завода, с внедрением основных групп мероприятий, будет способствовать значительному повышению параметров надёжности, бесперебойности, качества, электробезопасности и экономичности на объекте исследования.

Исходя из выходных технических данных на выполнение работы, с учётом справочных нормативных коэффициентов, проведён расчёт электрической нагрузки системы электроснабжения цементного завода. Рассчитаны нагрузки отдельных цехов, а также всей системы электроснабжения цементного завода в целом, исходя из расчётных коэффициентов, установленной мощности нагрузок и режима работы системы электроснабжения объекта проектирования.

В результате проведения выбора и проверок силовых трансформаторов для установки в системе электроснабжения цементного завода установлено следующее:

- питание проектируемой системы электроснабжения цементного завода, целесообразно осуществить от главной понизительной подстанции (ГПП) с номинальными классами напряжения 110/10 кВ;
- для питания проектируемой внешней системы электроснабжения цементного завода, на ГПП-110/10 кВ объекта проектирования

целесообразно установить два силовых трансформатора ТДН-10000/110;

- в системе внутреннего электроснабжения цементного завода, для питания нагрузки цехов и участков предприятия, предусмотрены три двухтрансформаторные подстанции ТП-10/0,4 кВ. Установлено, что на цеховых ТП-1 и ТП-3 устанавливаются по два силовых трансформатора марки ТМГ-1600/10 У1, а на цеховой ТП-3 – два силовых трансформатора марки ТМГ-2000/10 У1.

Проведён выбор компенсации реактивной составляющей нагрузки в сети 0,4 кВ системы электроснабжения, для чего выбраны компенсирующие устройства в виде конденсаторных установок для их установки на шинах 0,4 кВ цеховых ТП-10/0,4 кВ.

Исходя из результатов проведённого сравнительного анализа, проведено аргументированное обоснование и выбраны рациональные схемы электрических соединений системы электроснабжения цементного завода:

- для применения в РУ-110 кВ питающей ГПП, принимается наиболее рациональная схема «Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий»;
- для применения в РУ-10 кВ питающей ГПП, принимается наиболее рациональная схема «Одна секционированная система шин»;
- для применения в распределительной сети 10 кВ, принимается наиболее рациональная схема «Радиальная схема с резервированием на секции шин источника питания (РУ-10 кВ ГПП)»;
- для применения на всех двухтрансформаторных ЦТП-10/0,4 кВ, питающих потребители 1 и 2 категории надёжности внутренней СЭС, принимается «Радиальная схема с резервированием на секции шин РУ-10 кВ и РУ-0,4 кВ».

В результате выполнения работы, осуществлён расчёт следующих токов короткого замыкания в проектируемой системе электроснабжения цементного завода:

- максимальных токов трёхфазного КЗ на выводах трансформатора ГПП-110/10 кВ в максимальном режиме работы;
- минимальных токов двухфазного КЗ на выводах трансформатора ГПП-110/10 кВ в максимальном режиме работы;
- ударных токов трёхфазного КЗ на выводах трансформатора ГПП-110/10 кВ в максимальном режиме работы.

В результате проведения соответствующих расчётов, для питающих ВЛ-110 кВ системы электроснабжения цементного завода, принята марка провода АС-70/11с сечением токоведущей жилы 70 мм<sup>2</sup> и допустимой токовой нагрузкой  $I_{дон} = 265$  А.

Для питания цеховых ТП-10/0,4 кВ от РУ-10 кВ ГПП-110/10 кВ, выбраны и проверены сечения всех кабельных линий с использованием марки кабелей современного типа АСБ-10.

Также в работе выбраны электрические аппараты (для применения в РУ ГПП):

- «в ОРУ-110 кВ: разъединители РГ-110/1000, выключатели ВРС-110-31,5, трансформаторы тока ТОГФ-110, трансформаторы напряжения НКФ-110» [1];
- в РУ-10 кВ: выключатели ВВЭ-М-10-20, выключатели нагрузки ВНА-10/16000 (для установки в РУ-10 кВ всех цеховых ТП-10/0,4 кВ), трансформаторы тока ТПЛ-Э-12.

Все принятые технические решения в работе подтверждены соответствующими расчётами.

## Список используемых источников

1. ГОСТ 32144-2013. «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [Электронный ресурс]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301> (дата обращения: 03.03.2023).
2. ГОСТ Р 59279-2020 «Схемы принципиальные электрические распределительных устройств от 35 до 750 кВ подстанций» [Электронный ресурс]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200177281> (дата обращения: 03.03.2023).
3. Ерошенко С.А. Расчет токов коротких замыканий в энергосистемах: учебное пособие. УрФУ им. Б.Н. Ельцина. Екатеринбург: Изд. УрФу, 2019. 104 с.
4. Кабышев И.П. Выбор схем электроснабжения и практические расчёты по выбору оборудования. М.: Энергоиздат, 2018. 210 с., ил.
5. Кадомская К.П., Лавров Ю.А. Электрооборудование высокого напряжения нового поколения. Вологда: Инфра-Инженерия, 2018. 343 с.
6. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций. Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Учеб. пособие для ВУЗов. 5-е издание, перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2018. 608 с.
7. Описание технологического процесса производства цемента. [Электронный ресурс]: URL: <https://prod.bobrodobro.ru/1556> (дата обращения: 04.03.2023).
8. Постановление Правительства РФ от 16.02.2008 N 87 (ред. от 01.12.2021) «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию» [Электронный ресурс]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/902087949> (дата обращения: 04.03.2023).
9. Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок

потребителей. 6-е изд., перераб. и доп. М: Энергоатомиздат, 2019. 174 с.

10. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. 4-е изд., перераб. и доп. М: Энергоатомиздат, 2018. 392 с.: ил.

11. Правила устройства электроустановок. 7-е изд., перераб. и доп. М.: Главгосэнергонадзор России, 2018. 692 с.

12. РД 153-34.0-20.527-98 «Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования» [Электронный ресурс]: URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294817/4294817179.htm> (дата обращения: 03.03.2023).

13. Рогалев Н.Д. Энергосбережение: учебное пособие для ВУЗов. Москва: МЭИ, 2020. 242 с.

14. Самарин О. Д. Энергосбережение. Энергоэффективность. Москва: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2019. 296 с.

15. Сибикин Ю.Д. Монтаж, эксплуатация и ремонт электрооборудования промышленных предприятий и установок. Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. 464 с.

16. Сибикин Ю.Д. Электроснабжение. Вологда: Инфра-Инженерия, 2017. 328 с.

17. Современные технологии производства цемента. [Электронный ресурс]: URL: <https://cementum.ru/press-center/publications/2020/sovremennye-tekhnologii-proizvodstva-tsementa/> (дата обращения: 03.03.2023).

18. Фризен В.Э. Расчет и выбор электрооборудования низковольтных распределительных сетей промышленных предприятий. Екатеринбург: Издательство УГУ, 2018. 184 с.

19. Фролов Ю. М. Основы электроснабжения. М.: Лань, 2019. 480 с.

20. Щербаков Е.Ф., Александров Д.С. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях. Учебное пособие. М.: Форум, Инфра-М, 2018. 596 с.