

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 Проектирование системы электроснабжения лесохимического завода

Обучающийся

С.В. Скворцов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

А.А. Андреев

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

Консультант

О.Н. Головач

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

Тольятти 2023

## Аннотация

Цель работы – разработка проекта системы электроснабжения лесохимического завода.

Для качественной реализации основной цели работы решены следующие поставленные задачи:

- анализ исходных данных по объекту исследования с рассмотрением основных теоретических положений для решения поставленных задач;
- выбор схемы электроснабжения лесохимического завода;
- расчет и выбор силовых трансформаторов ГПП лесохимического завода;
- выбор основного электрооборудования в системе электроснабжения объекта проектирования;
- расчёт системы собственных нужд ГПП в системе электроснабжения лесохимического завода АО «Сибирский лесохимический завод».

Данная ВКР содержит пояснительную записку объемом 68 страниц, дополняемой 16 таблицами, 9 рисунками, а также 6 чертежами формата А1.

## **Abstract**

The purpose of the work is to develop a project for the power supply system of a wood-chemical plant.

For the qualitative implementation of the main goal of the work, the following tasks were solved:

- analysis of initial data on the object of study with consideration of the main theoretical provisions for solving the tasks;
- choice of power supply scheme for wood chemical plant;
- calculation and selection of power transformers of the GPP timber chemical plant;
- selection of the main electrical equipment in the power supply system of the design object;
- calculation of the system of own needs of the GPP in the power supply system of the timber chemical plant JSC Siberian Wood Chemical Plant.

This work contains an explanatory note of 68 pages, supplemented by 16 tables, 9 figures, and 6 drawings of A1 format.

## Содержание

Введение.....	5
1 Анализ исходных данных.....	7
1.1 Техническая характеристика лесохимического завода.....	7
1.2 Анализ исходных данных на проектирование .....	10
1.3 Нормы и требования к проектированию систем электроснабжения лесоперерабатывающих предприятий .....	12
2 Проектирование системы электроснабжения лесохимического завода.....	21
2.1 Выбор рациональных номинальных напряжений схемы электроснабжения лесохимического завода .....	21
2.2 Выбор схемы электроснабжения лесохимического завода .....	22
2.3 Расчёт электрических нагрузок системы электроснабжения лесохимического завода .....	28
2.4 Выбор и проверка мощности силовых трансформаторов ГПП .....	35
2.5 Расчёт токов коротких замыканий .....	37
2.6 Выбор и проверка трансформаторов цеховых ТП внутренней системы электроснабжения .....	44
2.7 Выбор и проверка проводников системы электроснабжения .....	45
2.8 Выбор и проверка электрических аппаратов подстанции .....	51
3 Расчёт системы собственных нужд ГПП лесохимического завода .....	59
Заключение .....	63
Список используемых источников.....	66

## Введение

Российская лесоперерабатывающая промышленность имеет хорошие перспективы развития в будущем благодаря многочисленным аспектам.

Во-первых, Россия является одним из крупнейших производителей леса в мире, и это дает большое преимущество в развитии лесоперерабатывающей отрасли промышленности. Большая часть лесов России находится в северных регионах страны.

Во-вторых, российская лесоперерабатывающая промышленность активно модернизируется и использует новые технологии, что повышает ее эффективность. Внедрение новых технологий повышает показатели энергоэффективности, снижает энергопотребление и улучшает экологическую безопасность.

В-третьих, Россия активно развивает экспорт лесопродукции. В настоящее время Россия является главным экспортером древесных материалов в мире, и этот сегмент рынка продолжает увеличиваться.

Однако в России есть и некоторые проблемы, которые ограничивают развитие лесоперерабатывающей промышленности. Одна из основных проблем – недостаточно развитая инфраструктура в некоторых регионах, которая ограничивает транспортировку леса и готовой продукции. Также важно уделить внимание заботам о лесах и охране природы, чтобы не допустить и не усугубить опасности для экосистемы.

В целом, Российская лесоперерабатывающая промышленность имеет хорошие перспективы для развития и может стать ведущей страной в мировой лесоперерабатывающей промышленности.

«Основной целью работы является разработка проекта системы электроснабжения» [5] объекта лесоперерабатывающей промышленности на примере лесохимического завода АО «Сибирский лесохимический завод».

«Объектом исследования в данной работе является лесохимический завод АО «Сибирский лесохимический завод»» [7].

«Предметом исследования в работе выступает электрическая часть системы электроснабжения лесохимического завода» [5].

«Для качественной реализации цели работы решаются следующие поставленные задачи» [5]:

- «анализ исходных данных по объекту исследования с рассмотрением основных теоретических положений для решения» [8] поставленных задач;
- выбор схемы электроснабжения лесохимического завода;
- расчет и выбор силовых трансформаторов ГПП лесохимического завода;
- выбор основного электрооборудования в системе электроснабжения объекта проектирования;
- расчёт системы собственных нужд ГПП в системе электроснабжения лесохимического завода АО «Сибирский лесохимический завод».

«В результате выполнения работы, выбраны, обоснованы и предложены для практического применения мероприятия, позволяющие выполнить качественное проектирование схемы электрических соединений системы электроснабжения» [18] лесохимического завода АО «Сибирский лесохимический завод», с высокими показателями надёжности, бесперебойности электроснабжения, экономичности и электробезопасности принятых решений.

## **1 Анализ исходных данных**

### **1.1 Техническая характеристика лесохимического завода**

Рассматриваемое в работе проектируемое лесоперерабатывающее предприятие АО «Сибирский лесохимический завод» входит в десятку крупнейших лесоперерабатывающих предприятий Российской Федерации.

АО «Сибирский лесохимический завод» территориально расположено в Красноярском крае, г. Лесосибирске, ул. Южный промышленный узел, 12/56.

Компания зарегистрирована 31.03.2009 г. в городе Лесосибирск. На сегодняшний день АО «Сибирский лесохимический завод» является одним из крупнейших лесохимических предприятий страны. Уставной капитал АО «Сибирский лесохимический завод» по состоянию на 1 января 2022 года составлял более 12 млрд. руб. По состоянию на конец 2021 года, стоимость активов АО «Сибирский лесохимический завод» составляла более 200 млрд. руб. По состоянию на конец 2021 года, согласно данным из открытых источников, на предприятии АО «Сибирский лесохимический завод» работало около 100 человек. Персонал АО «Сибирский лесохимический завод» с 2019 года сократился в 1,73 раза, однако, благодаря этому, заработная плата работников выросла с 30000 р. до 43000 р. (в среднем по предприятию АО «Сибирский лесохимический завод»).

Финансовая отчётность АО «Сибирский лесохимический завод», согласно данным ФНС и Росстата за 2011–2021 годы, представлен на рисунках 1-3.

График финансовой выручки предприятия АО «Сибирский лесохимический завод», находящийся в свободном доступе, за период 2011 – 2021 гг., приведён на рисунке 1.

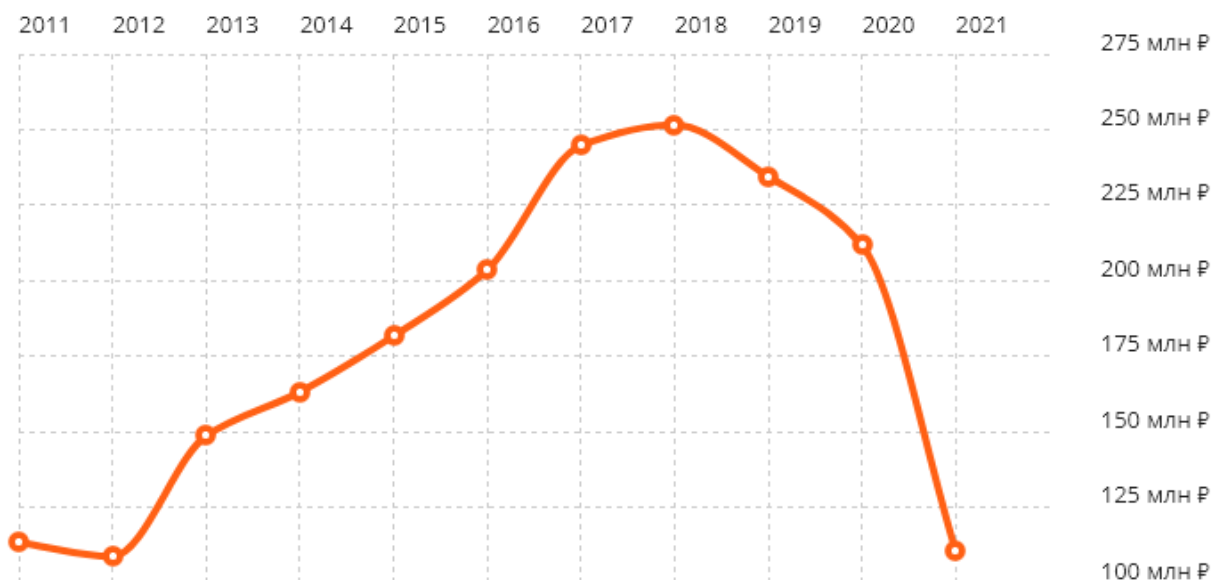


Рисунок 1 – График финансовой выручки предприятия АО «Сибирский лесохимический завод», находящийся в свободном доступе, за период 2011 – 2021 гг.

График чистой прибыли предприятия АО «Сибирский лесохимический завод», находящийся в свободном доступе, за период 2011 – 2021 гг., приведён на рисунке 2.

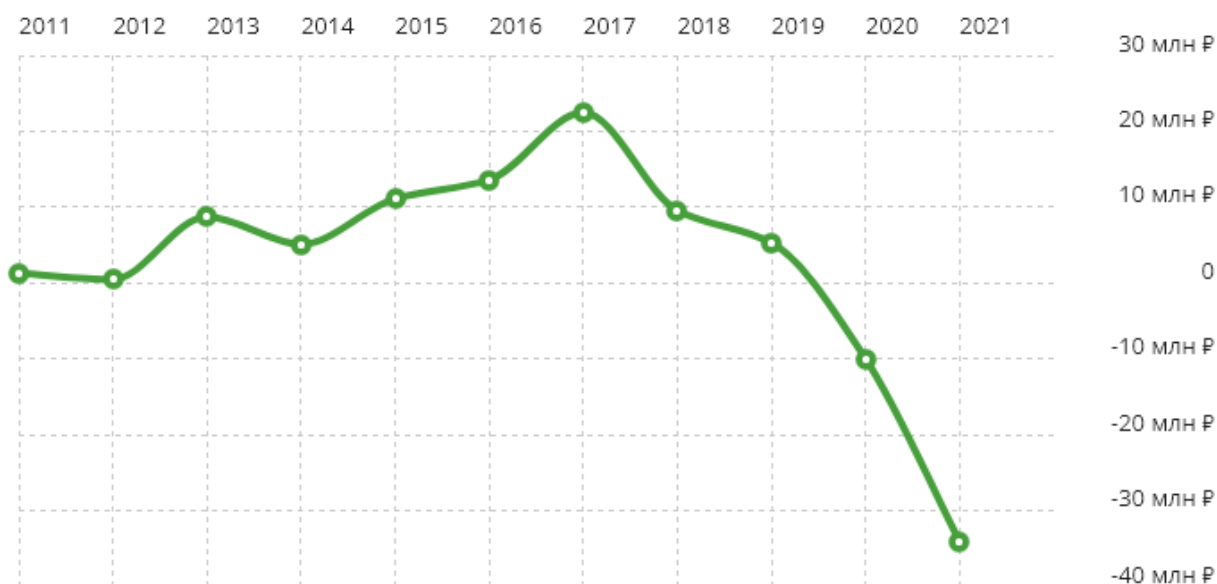


Рисунок 2 – График чистой прибыли предприятия АО «Сибирский лесохимический завод», находящийся в свободном доступе, за период 2011 – 2021 гг.



График капитала предприятия АО «Сибирский лесохимический завод», находящийся в свободном доступе, за период 2011 – 2021 гг., приведён на рисунке 3.

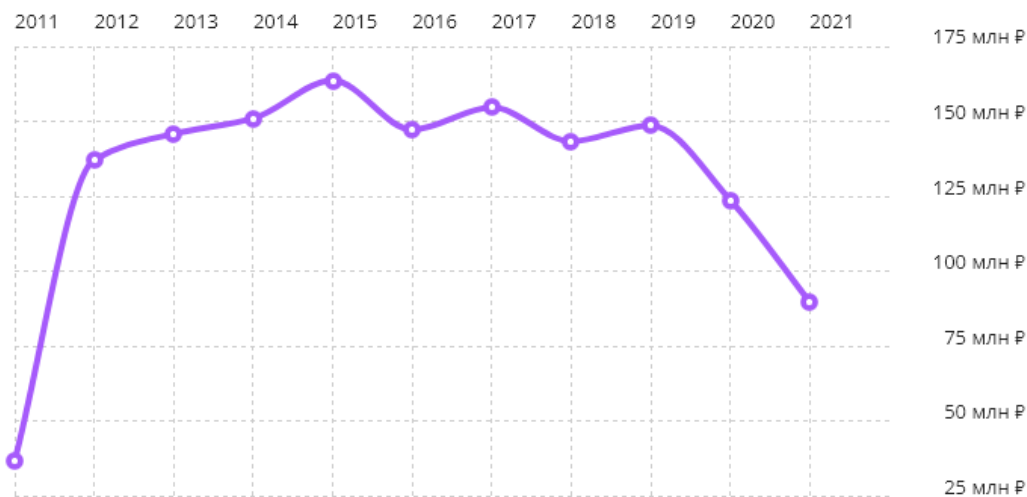


Рисунок 3 – График капитала предприятия АО «Сибирский лесохимический завод», находящийся в свободном доступе, за период 2011 – 2021 гг.

Таким образом, учитывая результаты финансовой отчётности предприятия АО «Сибирский лесохимический завод», находящейся в свободном доступе, за период 2012 – 2021 гг., можно сделать вывод, что данное предприятие характеризуется надёжностью, что в долгосрочной перспективе позволяет привлечь многочисленных инвесторов. Однако на АО «Сибирский лесохимический завод» в последние годы наблюдается стойкое снижение основных финансовых показателей, что связано с падением спроса на продукцию, жёсткой конкуренцией со стороны иностранных компаний, а также вводом санкций. Таким образом, финансовая и организационная отчётность предприятия АО «Сибирский лесохимический завод», находящаяся в свободном доступе, позволяет сделать предположение о значительной перспективе развития данного предприятия в условиях современности, при условии расширения рынков, увеличения спроса на производимую продукцию, а также налаживания и восстановлении логистических связей предприятия.

## 1.2 Анализ исходных данных на проектирование

Как было указано ранее, компания АО «Сибирский лесохимический завод» специализируется на производстве изделий из древесины: лесоматериалы, строганный погонаж, пиломатериалы, топливные пилеты и щепа, а также прочие изделия из них.

Продукция, которая планируется к производству на лесохимическом предприятии, не может быть технологически изготовлена в одном технологическом корпусе.

«Исходя из технологического процесса производства готовой продукции, к основным производственным цехам и участкам лесохимического завода относятся» [8]:

- «цех производства пиломатериалов – в нём изготавливаются» [8] пиломатериалы и прочие продукты деревообработки различных видов и типов;
- цех строганного погонажа – в нём производятся и упаковываются различные изделия, относящиеся к строганному погонажу (брус, балки, рейки, стропила) и прочие аналогичные продукты;
- «цех топливных пилетов и щепы» [8].

Также есть совокупность вспомогательных цехов и участков, которые вносят весомый вклад в развитие производства.

«Кроме того, в проекте предусмотрена также перспективная нагрузка мощностью 1500 кВт, которая планируется в связи с возможностью дальнейшего расширения производства и увеличения производственных мощностей» [5].

«В таблице 1 указана проектная мощность для каждого участка (цеха), исходя из совокупности оборудования, которое в них должно быть установлено согласно технологическому процессу производства готовой продукции лесохимического завода, проектирование которого осуществляется в работе» [3].

Таблица 1 – Исходные технические данные цехов и участков лесохимического завода

Наименование цеха (участка)	Назначение цеха (участка)	Проектная мощность, $P_{np}$ , кВт
Цех производства пиломатериалов	Основной производственный	590
Цех строганного погонажа	Основной производственный	1000
Цех топливных пилетов и щепы	Основной производственный	390
Компрессорная	Основной вспомогательный	190
Лаборатория контроля качества	Неосновной вспомогательный	660
Участок ремонта и обслуживания оборудования	Неосновной вспомогательный	930
Пункт приёма и обработки первичного сырья	Неосновной вспомогательный	200
Административное здание	Неосновной вспомогательный	150
Торгово-выставочный комплекс	Неосновной вспомогательный	83
Склады	Неосновной вспомогательный	70
Насосная: а) 0,4 кВ б) АД 10 кВ	Основной вспомогательный	40 2×400=800
Итого по лесоперерабатывающему предприятию		5103

«Далее в работе необходимо провести детальный анализ исходных технических данных цехов и участков лесоперерабатывающем предприятии АО «Сибирский лесохимический завод»» [8].

«Анализ предусматривает их классификацию по следующим направлениям» [6]:

- «по принадлежности к категории надёжности» [6];
- «по особенностям производственной среды» [6].

«Систематизация цехов и участков проектируемого лесохимического завода по категориям надёжности и условиям производственной среды представлена в форме таблицы 2» [11].

Таблица 2 – Систематизация цехов и участков проектируемого лесохимического завода по категориям надёжности и условиям производственной среды

Наименование объекта	Категория надёжности объекта	Характеристика производственной среды
Цех производства пиломатериалов	I категория	Пыльная, сухая
Цех строганного погонажа	I категория	Пыльная, сухая
Цех топливных пилетов и щепы	I категория	Пыльная, сухая
Компрессорная	I категория	Жаркая, сухая
Лаборатория контроля качества	II категория	Нормальная
Участок ремонта и обслуживания оборудования	II категория	Пыльная, сухая
Пункт приёма и обработки первичного сырья	II категория	Пыльная, сухая
Административное здание	III категория	Нормальная
Торгово-выставочный комплекс	III категория	Нормальная
Склады	III категория	Нормальная
Насосная	I категория	Влажная

«С учётом приведённых норм и характеристики технологического процесса, а также классификации производственных и вспомогательных цехов и участков проектируемой системы электроснабжения лесохимического завода, далее в работе проводится решение поставленных основных задач по разработке проекта системы электроснабжения и оборудования объекта исследования» [12].

### **1.3 Нормы и требования к проектированию систем электроснабжения лесоперерабатывающих предприятий**

«Известно, что к системам электроснабжения лесоперерабатывающих предприятий применяются следующие основные требования и нормы, обусловленные их природой» [11]:

- обеспечение питания потребителей систем электроснабжения согласно принятым и утверждённым схемам электроснабжения;
- высокое качество поставляемой электроэнергии потребителям, недопущение поступления в сеть электроэнергии с предельно-

допустимыми параметрами и недопустимыми отклонениями;

- надёжность электроснабжения потребителей, отсутствие значительных аварийных режимов в системе электроснабжения;
- бесперебойность систем электроснабжения, недопущение значительного перерыва в снабжении потребителей электроэнергией (допустимый перерыв определяется категорией надёжности и детально рассмотрен в работе далее);
- применение защит, блокировок и прочих автоматических сигнализаторов для недопущения аварийного режима на всех звеньях электрической сети систем электроснабжения;
- автоматизация всех участков и звеньев электрической сети систем электроснабжения;
- обеспечение достаточного резервирования в схеме в случае потери электроснабжения, путём применения совокупности схемных решений, автоматики и новейшего быстродействующего коммутационно-защитного оборудования.

Известно, что система электроснабжения делится на части: внешнюю и внутреннюю.

При этом питание внешней части схемы системы электроснабжения может осуществляться от следующих источников:

- главная понизительная подстанция (ГПП) – как правило, это подстанции глубокого ввода классами напряжения 330(220,110,35)/35,10(6) кВ, в основе которых находится один или два понижающих трансформатора;
- центральный распределительный пункт (ЦРП) – применяется на тех же классах напряжения, что и ГПП, однако не имеет трансформаторов в своём составе, сооружается при наличии большого числа распределительных линий к цехам предприятия;
- распределительный пункт – сооружается при небольшом количестве распределительных линий к цехам предприятия.

Во внутренней части идёт распределение электроэнергии по цехам (внутризаводская часть системы электроснабжения) и далее по конечным потребителям (внутрицеховая часть системы электроснабжения).

При этом питание внутренней части схемы системы электроснабжения может осуществляться от следующих источников:

- цеховая понизительная подстанция (ЦТП) – как правило, это подстанции с классами напряжения 6(10)/0,4 кВ, в основе которых находится один или два понижающих трансформатора;
- центральный распределительный пункт (ЦРП) применяется на тех же классах напряжения, что и ЦТП, однако не имеет трансформаторов в своём составе, сооружается при наличии большого числа распределительных линий к цехам предприятия;
- распределительный пункт (РП) сооружается при небольшом количестве распределительных линий к цехам предприятия;
- вводное распределительное устройство служит для приёма и распределения электроэнергии на конкретном объекте или участке предприятия;
- распределительные устройства (РУ) распределяют полученную электроэнергию от ВРУ к конечным потребителям, для силовой нагрузки применяются силовые распределительные шкафы (СРШ), для осветительной – щитки рабочего (ЩРО) и аварийного (ЩАО) освещения.

В системах электроснабжения применяются известные принципы резервирования с целью обеспечения надёжного и бесперебойного электроснабжения.

Все перечисленные принципы распределения электроэнергии в системах электроснабжения классического типа, приведённые выше, представлены на рисунке 4.

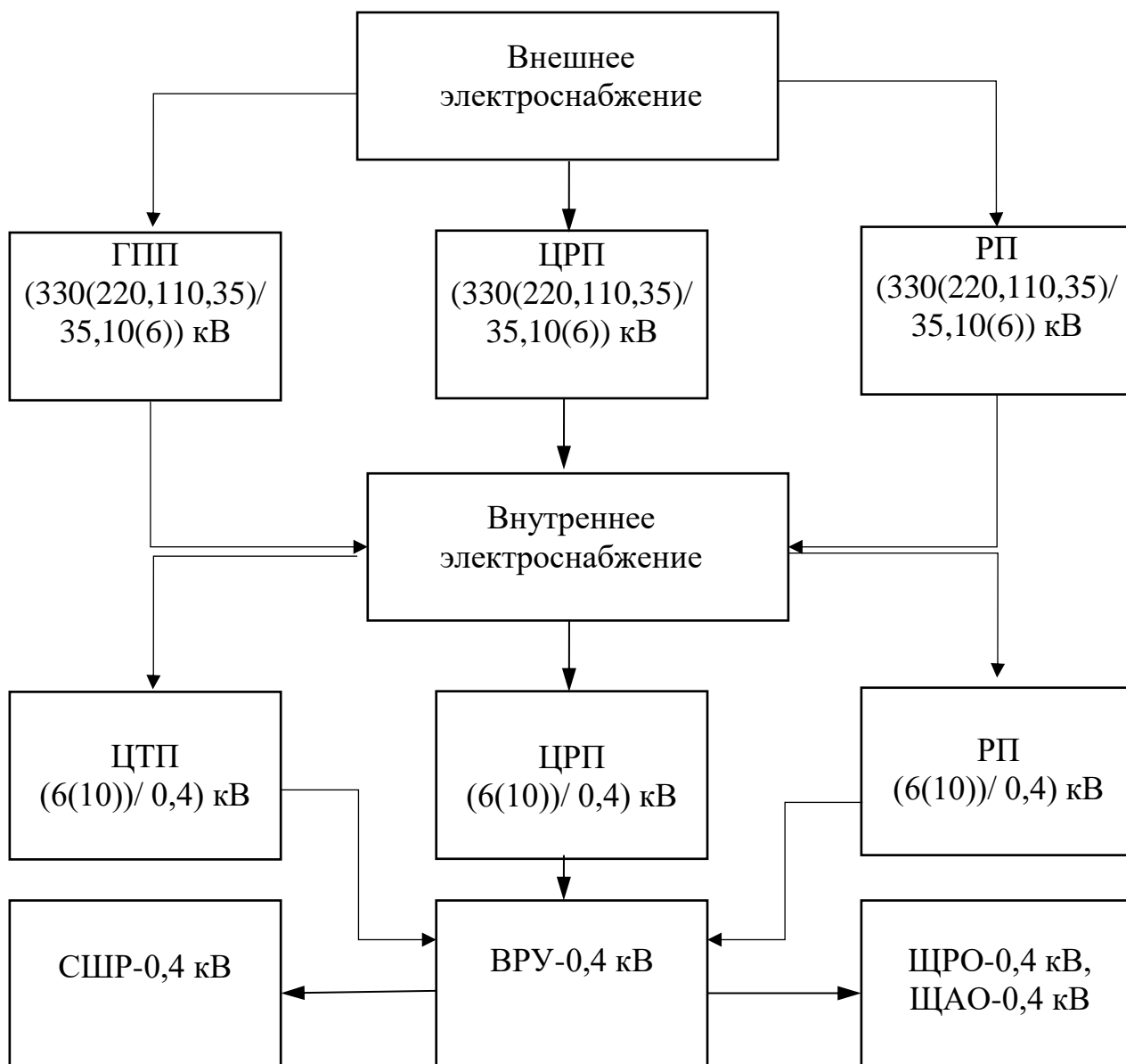


Рисунок 4 – Принципы распределения электроэнергии в системах электроснабжения классического типа

Как можно увидеть из рисунка 4 основными элементами как внешней, так и внутренней систем электроснабжения классического типа являются трансформаторные подстанции.

Для передачи электроэнергии на большие расстояния, с учётом весьма значительных мощностей и потерь электроэнергии, на выходе из электростанций находятся повышающие трансформаторы, после которых посредством линий электропередач высокого и сверхвысокого напряжения, согласно традиционной схеме, получает питание сеть понижающих питающих

подстанций (1150-110 кВ), которые, в свою очередь, далее питают потребительские подстанции на номинальных напряжениях 110-0,4 кВ.

Очевидно, что основными составляющими современных понижающих трансформаторных подстанций является совокупность силовых трансформаторов и распределительных устройств.

Именно благодаря их слаженной работе обеспечиваются условия надёжности, электробезопасности, быстродействия и селективности (избирательности).

Фактически, такими показателями обладают современные разработки электрических аппаратов, активно внедряющихся в последнее время для применения в распределительных устройствах трансформаторных подстанций энергосистемы всех типов и классов напряжения.

Таким образом, установлено, что применение современных электрических аппаратов в распределительных устройствах трансформаторных подстанций систем электроснабжения всех типов создаёт необходимые условия для обеспечения нормальной и надёжной работоспособности не только самой подстанции, но и всей электрической сети и, как результат, всей энергосистемы в целом.

Поэтому качественное проектирование и реализация схем электрических соединений современных трансформаторных подстанций и электростанций систем электроснабжения всех типов является актуальным заданием современной электроэнергетики.

Известно, что к современным трансформаторным понизительным подстанциям систем электроснабжения классического типа предъявляются жёсткие требования по следующим техническим критериям, а именно:

- условия надёжности питания потребителей соответствующих категорий согласно [7];
- принцип бесперебойности передачи электроэнергии потребителям соответствующих категорий надёжности согласно принятым схем нормальных режимов;



- нормы электробезопасности при выполнении электромонтажных, ремонтных работ и работ по обслуживанию и осмотру всего оборудования подстанций;
- применение резервирования на всех ответственных участках распределительной, питающей сети и потребителей подстанции, отказ от системы «холодного» резерва (оборудование не находится в работе в нормальной схеме подстанции);
- применение секционирования на всех звеньях электрической сети в распределительных устройствах подстанции (как правило, применяется секционирование систем сборных шин распределительных устройств);
- применение стандартных разработанных схем распределительных устройств и подстанций, в которые изменения должны быть обоснованы только расчётным технико-экономическим путём;
- обеспечения коммутационной способности оборудования распределительных устройств подстанции (путём установки коммутационной аппаратуры в распределительных устройствах подстанций);
- обеспечение динамической устойчивости системы (проверяется соответствующими расчётами и моделированием всей системы, в которую входит подстанция);
- обеспечение транзита и резерва мощностей для питания других объектов (применяется для узловых и транзитных подстанций);
- соблюдение баланса мощностей во всех режимах, включая баланс по реактивной мощности, применение компенсирующих устройств реактивной мощности (при необходимости);
- обеспечение защиты всех важнейших узлов и ветвей цепи подстанции, а также важнейшего оборудования (например, трансформаторов), для чего применяются аппараты защиты с установленными на их приводах устройствами релейной защиты;

- использование термически устойчивого оборудования, способного выдерживать длительные сквозные токи короткого замыкания;
- автоматизация силового, контрольного, измерительного оборудования путём внедрения средств и устройств автоматики в схемы нормальных режимов подстанций;
- применение современных средств автоматизации на всех уровнях и звеньях подстанций: телеизмерений, автоматизированных систем учёта и контроля электроэнергии, автоматизированных систем управления режимами, систем управления электроснабжением подстанций;
- ремонтнопригодность всего оборудования схемы нормальных соединений подстанции;
- «живучесть» основных узлов, систем и оборудования трансформаторных подстанций;
- возможность дальнейшего расширения, модернизации и реконструкции схемы главных соединений распределительных устройств подстанций;
- применение блочных конструкций;
- использование современного оборудования распределительных устройств подстанций (приоритет отдаётся устройствам с элегазовой и вакуумной изоляцией);
- минимальные стоимости эксплуатации и ремонта при максимальном технико-экономическом эффекте.

Принципы резервирования потребителей систем электроснабжения в зависимости от категории надёжности основаны на обеспечении каждого потребителя минимально необходимым числом источников питания.

Известно, что для потребителей 1 и 2 категории надёжности их должно быть два, для третьей категории надёжности достаточно применение одного источника [11].

При этом особая группа первой категории предусматривает наличие резервирования с использованием третьего источника.

Данные принципы являются основными при выборе источника и схемы питания.

При этом также регламентируется время перерыва в электроснабжении: для особой и первой категории оно должно быть не больше, чем время автоматического включения резерва, для второй категории – не более, чем время включения резервного питания (допускается ручное неавтоматическое включение), а для третьей категории перерыв в электроснабжении должен составлять не более суток [7].

Принцип резервирования в схеме питания потребителей соответствующей категории надёжности систем электроснабжения должен быть внедрён в принципиальной однолинейной схеме электроснабжения на объекте исследования согласно [10].

Также для выбора электрооборудования распределительных устройств трансформаторных подстанций и распределительных пунктов систем электроснабжения рекомендовано использовать фактические показания максимальной нагрузки с целью уменьшения погрешности расчётов.

Кроме того, к установке в распределительных устройствах трансформаторных подстанций и распределительных пунктов систем электроснабжения в последние годы рекомендованы новейшие разработки коммутационной и защитной аппаратуры, имеющие повышенные показатели надёжности, экономичности, запаса ресурса и безопасности.

Также при разработке схемных решений при проектировании систем электроснабжения следует учесть критерии по электробезопасности.

Поэтому в населённых пунктах, в таких случаях, используются только изолированные проводники (кабельные линии, провода СИП и другие аналогичные разработки проводникового материала).

Все приведённые требования должны быть учтены при дальнейшей разработке рекомендаций по проектированию схемы электрических

соединений нормального режима системы электроснабжения данного объекта.

Выводы по разделу 1.

«Приведено описание и анализ технологического процесса, а также основных и вспомогательных цехов и участков системы электроснабжения» [12] нового лесохимического завода АО «Сибирский лесохимический завод», «с детальным их анализом и систематизацией по принадлежности к категориям надёжности, а также по условиям производственной среды» [15].

Показано, что разработка качественного проекта системы электроснабжения лесохимического завода АО «Сибирский лесохимический завод», с внедрением основных групп мероприятий, будет способствовать значительному повышению параметров надёжности, бесперебойности, электробезопасности и экономичности.

## **2 Проектирование системы электроснабжения лесохимического завода**

### **2.1 Выбор рациональных номинальных напряжений схемы электроснабжения лесохимического завода**

Далее в работе проводится выбор рациональных номинальных напряжений схемы электроснабжения лесохимического завода АО «Сибирский лесохимический завод».

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

«В системе электроснабжения лесохимического завода преобладают потребители II-й категории по надежности электроснабжения, поэтому внешнее электроснабжение данного объекта осуществляется по двухцепной ЛЭП с установкой на источнике питания системы электроснабжения объекта двух силовых трансформаторов» [2].

«В качестве источника внешнего электроснабжения объекта проектирования рассматриваются три основных варианта» [12]:

- «питание от центрального распределительного пункта (далее – ЦРП)» [1];
- «питание от распределительного пункта (далее – РП)» [1];
- «питание от главной понизительной подстанции (далее – ГПП)» [1].

На основе результатов анализа выбирается для питания завода главная понизительная подстанция.

Для выбора напряжения внешнего электроснабжения лесохимического завода АО «Сибирский лесохимический завод» в работе используется известная формула Илларионова, учитывающая длину питающей линии и передаваемую мощность» [12]:

$$U_n = \frac{1000}{\sqrt{500/L + 2500/P}}, \quad (1)$$

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

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

«По условию (1) для ГПП внешней СЭС проектируемого лесохимического завода АО «Сибирский лесохимический завод»» [1]:

$$U_n = \frac{1000}{\sqrt{500/6 + 2500/5,1}} = 46,2 \text{ кВ.}$$

Исходя из номинальных напряжений, применяемых в электрической сети Российской Федерации, принимается ближайшее стандартное значение номинального напряжения внешней системы электроснабжения проектируемого лесохимического завода, равное значению 35 кВ [3].

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

## 2.2 Выбор схемы электроснабжения лесохимического завода

В результате проведения технического анализа расчётным путём было установлено, что для проектируемой системы электроснабжения лесохимического завода АО «Сибирский лесохимический завод» наиболее рационально подходит высшее напряжение, равное 35 кВ, а для внутренней системы объекта проектирования – напряжение 10 кВ.

Также было установлено, что основным и единственным источником

питания во внешней системе электроснабжения проектируемого лесохимического завода АО «Сибирский лесохимический завод» является двухтрансформаторная ГПП.

На основании полученных результатов составляется структурная схема ГПП внешней системы электроснабжения проектируемого лесохимического завода АО «Сибирский лесохимический завод» (рисунок 5) [1].

Таким образом, исходя из полученных технических сведений с учётом структурной схемы, приведённой на рисунке 5, в работе необходимо провести обоснование и выбрать рациональные схемы электрических соединений системы электроснабжения лесохимического завода АО «Сибирский лесохимический завод»:

- схему РУ-35 кВ питающей ГПП;
- схему РУ-10 кВ питающей ГПП;
- схему распределительной сети 10 кВ;
- схему трансформаторных цеховых ТП.

Поэтапное решение данных вопросов проводится в работе далее на основе анализа литературных источников [4,20].

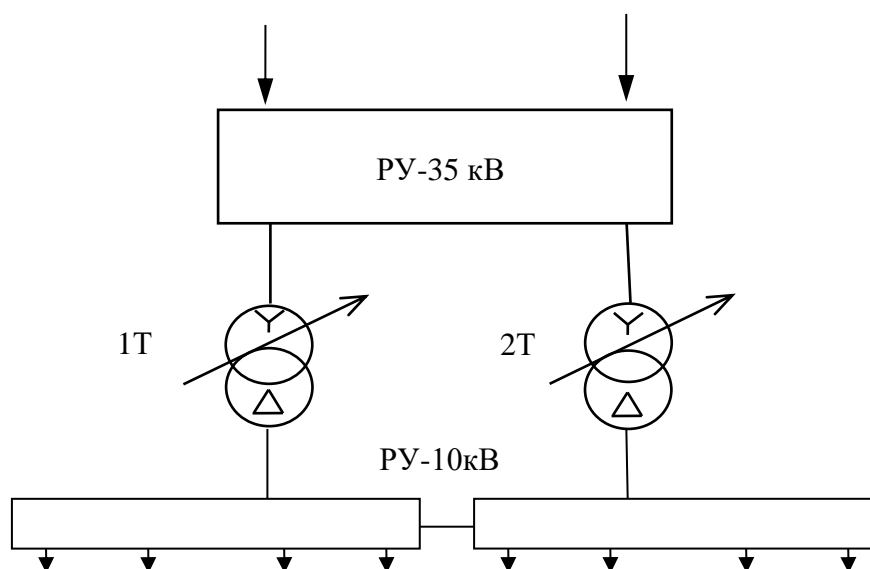


Рисунок 5 – Структурная схема ГПП-35/10 кВ системы электроснабжения лесохимического завода АО «Сибирский лесохимический завод»

Выбор указанных схем электрических соединений системы электроснабжения объекта проектирования проводится в форме таблиц на основании требований [4,20].

Результаты сравнительного анализа при выборе схемы главных электрических соединений РУ-35 кВ питающей ГПП представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты сравнительного анализа при выборе схемы главных электрических соединений РУ-35 кВ питающей ГПП

Тип схемы	Условия применения	Вывод
«Блок (линия-трансформатор) с разъединителем»	Схема ВН ГПП без резервирования при одном силовом трансформаторе	Не подходит по условиям резервирования и числу трансформаторов в схеме
«Блок (линия-трансформатор) с выключателем»	Схема ВН ГПП без резервирования при одном силовом трансформаторе	Не подходит по условиям резервирования и числу трансформаторов в схеме
«Два блока с выключателями и неавтоматической переключкой со стороны линий»	Схема ВН ГПП с резервированием при двух силовых трансформаторах, ГПП-тупиковая	Подходит по всем критериям и параметрам
«Мостик с выключателями в цепях линий и ремонтной переключкой со стороны линий»	Схема ВН ГПП с резервированием при двух силовых трансформаторах, ГПП-ответвительная, узловая	Подходит по техническим критериям, однако по экономическому критерию является избыточно затратной

Таким образом, исходя из результатов проведённого сравнительного анализа (таблица 3), для применения в РУ-35 кВ питающей ГПП принимается наиболее рациональная схема «Два блока с выключателями и неавтоматической переключкой со стороны линий» [25].

Результаты сравнительного анализа при выборе схемы главных электрических соединений РУ-10 кВ питающей ГПП представлены в таблице 4.



Таблица 4 – Результаты сравнительного анализа при выборе схемы главных электрических соединений РУ-10 кВ питающей ГПП

Тип схемы	Условия применения	Вывод
«Одна несекционированная система шин»	Схема НН ГПП без резервирования при одном силовом трансформаторе, либо при двух трансформаторах, питающих потребители 3 категории надёжности	Не подходит по условиям резервирования и числу трансформаторов в схеме, а также по категории надёжности
«Одна секционированная система шин»	Схема НН ГПП с резервированием при двух силовых трансформаторах, в РУ-10 кВ не более 20 присоединений	Подходит по всем критериям и параметрам, присоединений в РУ-10 кВ – менее 20
«Две секционированных системы шин»	Схема НН ГПП с резервированием при двух силовых трансформаторах, в РУ-10 кВ более 20 присоединений	Подходит по техническим критериям, однако по экономическому критерию является избыточно затратной, присоединений в РУ-10 кВ – менее 20

Таким образом, исходя из результатов проведённого сравнительного анализа (таблица 4), в работе для применения в РУ-10 кВ питающей ГПП принимается наиболее рациональная схема «Одна секционированная система шин» [4].

Секционный выключатель в нормальном режиме работы схемы РУ-10 кВ отключён, режим работы – раздельный. Данный режим работы выбран исходя из рекомендаций [10].

Результаты сравнительного анализа при выборе схемы распределительной сети 10 кВ (выполняется кабельными линиями от РУ-10 кВ ГПП до РУ-10 кВ цеховых ТП проектируемого завода) представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты сравнительного анализа при выборе схемы распределительной сети 10 кВ

Тип схемы	Условия применения	Вывод
«Радиальная схема без резервирования на секции шин источника питания»	Схема распределительной сети без резервирования при одном силовом трансформаторе, либо при двух трансформаторах, питающих потребители 3 категории надёжности	Не подходит по условиям резервирования и числу трансформаторов в схеме, а также по категории надёжности
«Магистральная схема без резервирования на секции шин источника питания»	Схема распределительной сети без резервирования при одном силовом трансформаторе, либо при двух трансформаторах, питающих потребители 3 категории надёжности	Не подходит по условиям резервирования и числу трансформаторов в схеме, а также по категории надёжности
«Радиальная схема с резервированием на секции шин источника питания»	Схема распределительной сети с резервированием при двух силовых трансформаторах, питание потребителей 1 и 2 категорий надёжности	Подходит по всем критериям и параметрам
«Магистральная схема с резервированием на секции шин источника питания»	Схема распределительной сети с резервированием при двух силовых трансформаторах, питание потребителей 1 и 2 категорий надёжности	Сложность выполнения схемы, сложность выбора и согласования уставок РЗиА, меньшая надёжность, чем у радиальной схемы с резервированием

Таким образом, исходя из результатов проведённого сравнительного анализа (таблица 5), для применения в распределительной сети 10 кВ принимается наиболее рациональная схема «Радиальная схема с резервированием на секции шин источника питания (РУ-10 кВ ГПП)» [20].

Такая схема наиболее проста в исполнении и обладает наиболее высокой надёжностью, простотой монтажа, отстройки уставок РЗиА и подходит для питания ответственных потребителей. Результаты сравнительного анализа при выборе схемы трансформаторных цеховых ТП (для питания потребителей 1 и 2 категории надёжности применяется схема с двумя трансформаторами на ЦТП, для питания потребителей 3 категории – с одним трансформатором на ЦТП), представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты сравнительного анализа при выборе схемы трансформаторных цеховых ТП

Тип схемы	Условия применения	Вывод
«Радиальная схема без резервирования на секции шин РУ-10 кВ»	Схема распределительной сети без резервирования при одном силовом трансформаторе, либо при двух трансформаторах, питающих потребители 3 категории надёжности	Подходит по условиям резервирования и числу трансформаторов в схеме, а также по категории надёжности, для питания однострансформаторных ЦТП
«Магистральная схема без резервирования на секции шин РУ-10 кВ»	Схема распределительной сети без резервирования при одном силовом трансформаторе, либо при двух трансформаторах, питающих потребители 3 категории надёжности	Сложность выполнения схемы, сложность выбора и согласования уставок РЗиА, меньшая надёжность, чем у радиальной схемы
«Радиальная схема с резервированием на секции шин РУ-10 кВ и РУ-0,4 кВ»	Схема распределительной сети с резервированием при двух силовых трансформаторах, питание потребителей 1 и 2 категорий надёжности	Подходит по условиям резервирования и числу трансформаторов в схеме, а также по категории надёжности, для питания двухтрансформаторных ЦТП
«Магистральная схема с резервированием на секции шин РУ-10 кВ и РУ-0,4 кВ»	Схема распределительной сети с резервированием при двух силовых трансформаторах, питание потребителей 1 и 2 категорий надёжности	Сложность выполнения схемы, сложность выбора и согласования уставок РЗиА, меньшая надёжность, чем у радиальной схемы с резервированием

Таким образом, исходя из результатов проведённого сравнительного анализа (таблица 6), для применения на однострансформаторных ЦТП, питающих потребители 3 категории надёжности, принимается «Радиальная схема без резервирования на секции шин РУ-10 кВ», а для применения на двухтрансформаторных ЦТП, питающих потребителей 1 и 2 категории надёжности, принимается «Радиальная схема с резервированием на секции шин РУ-10 кВ и РУ-0,4 кВ».

Все выбранные схемы электрических соединений проектируемой системы электроснабжения лесохимического завода АО «Сибирский лесохимический завод» отвечают требованиям нормативных документов и принимаются к использованию на объекте проектирования.

### 2.3 Расчёт электрических нагрузок системы электроснабжения лесохимического завода

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

«Наиболее оптимальным 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 лесохимического завода является установленная номинальная нагрузка потребителей ( $P_{уст}$ ), которая принимается равной расчётной активной нагрузке» [8] с учётом коэффициента спроса, показывающего насколько рационально используется электроэнергия в системе электроснабжения объекта.

По известному числу и мощности потребителей на заданном напряжении определяется значение активной нагрузки потребителей электрической части системы электроснабжения лесохимического завода АО «Сибирский лесохимический завод» в максимальном режиме работы системы (по фактическим данным нагрузок объекта):

$$P_p = K_c P_n, \quad (2)$$

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

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

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

$$Q_{p.} = P_{p.} \cdot tg\varphi, \quad (3)$$

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

«Принимается в зависимости от степени компенсации реактивной нагрузки по справочным данным. Соответствует стандартному значению  $cos\varphi$ » [16].

«В работе, помимо силовой расчётной нагрузки объекта, также необходимо провести расчёты осветительной нагрузки лесохимического завода исходя из площади, которая подлежит освещению» [8].

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

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

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

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

«При этом» [1]:

$$P_{н.о} = P_{уд.о} F, \quad (5)$$

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

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

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

$$S_{р.} = \sqrt{(P_{н.} + P_{н.о})^2 + Q_{р.}^2}. \quad (6)$$

«Полная расчётная силовая нагрузка силовых и осветительных приёмников соответствующего цеха (участка) проектируемого лесохимического завода» [13]:

$$S_{р.} = \sqrt{P_{р.}^2 + Q_{р.}^2}. \quad (7)$$

«Предварительные потери активной и реактивной мощности в цеховых трансформаторах ЦТП системы электроснабжения лесохимического завода» [16]:

$$\Delta P_{ТЦ} = 0,02 S_{р.н}, \text{ кВт}; \quad (8)$$

$$\Delta Q_{ТЦ} = 0,1 S_{р.н}, \text{ квар}. \quad (9)$$

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

$$\Delta P_{T.ГПП} = 0,02S_{p,\Sigma}, \text{кВт}; \quad (10)$$

$$\Delta Q_{T.ГПП} = 0,1S_{p,\Sigma}, \text{квар}. \quad (11)$$

«Результаты расчёта электрических нагрузок потребителей системы электроснабжения лесохимического завода сведены в таблицу 7» [2].

Таблица 7 – Результаты расчёта электрических нагрузок потребителей системы электроснабжения лесохимического завода

Наименование цеха (участка)	Осветительная нагрузка					Суммарная расчётная нагрузка		
	$F$ , м <sup>2</sup>	$P_{уд.о.}$ , Вт/м <sup>2</sup>	$P_{н.о.}$ , кВт	$K_{с.о}$	$P_{р.о.}$ , кВт	$P_{р.+P_{р.о.}}$ , кВт	$Q_p$ , квар	$S_p$ , кВА
Потребители 0,38/0,22 кВ								
Цех производства пиломатериалов	20000	20	400	0,95	380	793	363,44	872,3
Цех строганного погонажа	20000	20	400	0,95	380	1180	704	1374,1
Цех топливных пилетов и щепы	2200	20	44	0,95	41,8	169,78	163,3	235,6
Компрессорная	1200	18	21,6	0,95	20,52	172,52	94,24	196,6
Лаборатория контроля качества	2500	17	42,5	0,95	40,38	238,38	174,24	295,3
Участок ремонта и обслуживания оборудования	3500	17	45	0,95	42,75	275,25	174,38	325,8
Пункт приёма и обработки первичного сырья	4000	17	68	0,95	64,6	144,6	60	166,64
Административное здание	5000	18	90	0,95	85,5	160,5	76,5	177,8
Торгово-выставочный комплекс	4000	18	72	0,95	39,9	89,7	37,35	89,7
Склады	6400	16	102,4	0,95	97,28	153,28	18,48	154,4
Насосная	4000	18	72	0,95	39,9	71,9	19,84	74,6
Итого 0,4 кВ					1423,6	4647,88	2668,07	5359,2
Потребители 10 кВ								
Насосная	—	—	—	—	—	680	326,4	754,3
Итого 10 кВ	—	—	—	—	—	680	326,4	754,3

«Кроме того, при расчёте нагрузки всей системы электроснабжения проектируемого лесохимического завода, необходимо учесть перспективную

нагрузку (запас мощности), которую планируется оставить в случае дальнейшего расширения производства лесопереработки» [16].

«Согласно исходным данным, перспективная активная нагрузка объекта проектирования равна  $P_n = 1500$  кВт, следовательно» [9]:

– «по условию (1) для перспективной активной нагрузки» [9]:

$$P_{p.n} = 0,9 \cdot 1500 = 1350 \text{ кВт},$$

– «по условию (2) для перспективной реактивной нагрузки» [9]:

$$Q_{p.n} = 1350 \cdot 0,54 = 729 \text{ квар}.$$

«Численное значение полной расчётной нагрузки  $S_p$  с учётом всех расчётных нагрузок проектируемого лесохимического завода, а также с учётом перспективной активной и реактивной нагрузки, соответствует сумме нагрузок объекта напряжением 0,4 кВ и 10 кВ» [18]:

$$S_p = \sqrt{(P_{p,0,4} + P_{p,10} + P_{p,n})^2 + (Q_{p,0,4} + Q_{p,10} + Q_{p,n})^2}. \quad (12)$$

«Таким образом» [13]:

$$S_p = \sqrt{(4647,88 + 680 + 1350)^2 + (2668,07 + 326,4 + 729)^2} = 8541,4 \text{ кВА}.$$

«Для проектируемой схемы внутреннего электроснабжения питающей сети цеховых ТП-10/0,4 кВ, значение потерь ЭЭ в трансформаторах» [13]:

$$\Delta P_{ТЦ} = 0,02 \cdot 8541,4 = 170,8 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_{ТЦ} = 0,1 \cdot 8541,4 = 854,1 \text{ квар}.$$



«На этапе проектирования, величина реактивной мощности на шинах 10 кВ ГПП схемы внутреннего электроснабжения объекта по условию» [19]:

$$Q_{KY} = P_M(tg\varphi_O - tg\varphi_M). \quad (13)$$

Для условий схемы ЭС объекта с расчётными значениями нагрузок:

$$Q_{KY} = 8024,65(0,4 - 0,36) \approx 321 \text{ квар.}$$

«Исходя из расчётных значений выбраны две конденсаторные установки марки УКРМ-10,5-160-50 мощностью компенсации 160 квар» [15].

«Суммарная расчетная реактивная нагрузка с учётом КУ» [19]:

$$Q_{p\Sigma} = (Q_{p.n} + Q_{p.в}) \cdot K_{pm} + Q_{TЦ} - Q_{KY}, \text{ квар,} \quad (14)$$

где « $K_{pm}$  – коэффициент одновременности максимумов нагрузки» [12].

Для условий схемы ЭС объекта с расчётными значениями нагрузок:

$$Q_{p\Sigma} = (2925,7 + 326,4) \cdot 0,95 + 854,1 - 320 \approx 3622,6 \text{ квар.}$$

«Суммарная расчетная активная нагрузка проектируемого лесохимического завода» с учётом КРМ» [12]:

$$P_{p\Sigma} = (P_{p.n} + P_{p.в}) \cdot K_{pm} + P_{TЦ} + P_{p.o}, \text{ кВт,} \quad (15)$$

Для условий схемы ЭС объекта с расчётными значениями нагрузок с учётом компенсации реактивных токов:

$$P_{p\Sigma} = (6601,04 + 680 + 708,7) \cdot 0,95 + 170,8 + 1423,58 \approx 9184,6 \text{ кВт.}$$

«Суммарная расчетная полная нагрузка лесохимического завода с учётом КРМ» [12]:

$$S_{p.\Sigma} = \sqrt{(P_{p.\Sigma})^2 + (Q_{p.\Sigma})^2}, \quad (16)$$

«Для условий схемы ЭС объекта» [7]:

$$S_{p.\Sigma} = \sqrt{9184,6^2 + 3622,6^2} \approx 9873,2 \text{ кВА.}$$

«Величина потерь в трансформаторах ГПП» [11]:

$$\Delta P_{T.ГПП} = 0,02 \cdot 9873,2 = 197,5 \text{ кВт,}$$

$$\Delta Q_{ТЦ} = 0,1 \cdot 9873,2 = 987,3 \text{ квар.}$$

«Полная расчётная нагрузка ГПП проектируемого лесохимического завода с учётом потерь ЭЭ» [12]:

$$S_p = \sqrt{(P_{p.\Sigma} + \Delta P_{T.ГПП})^2 + (Q_{p.\Sigma} + \Delta Q_{ТЦ})^2}, \text{ кВА.} \quad (17)$$

Значит:

$$S_p = \sqrt{(9184,6 + 197,5)^2 + (3622,6 + 987,3)^2} = 10453,5 \text{ кВА.}$$

На основе полученных расчётных значений электрических нагрузок проводятся мероприятия по выбору оборудования в проектируемой системе электроснабжения лесохимического завода АО «Сибирский лесохимический завод».

## 2.4 Выбор и проверка мощности силовых трансформаторов ГПП

Как было указано ранее, на главной понизительной подстанции ГПП-35/10 кВ АО «Сибирский лесохимический завод», в связи с наличием значительной группы потребителей, относящихся к 1 и 2 категории надёжности, рекомендовано установить два силовых трансформатора.

Учитывая полученные значения показателей и технических данных, полученных в результате расчёта нагрузки потребителей лесохимического завода АО «Сибирский лесохимический завод», проводится расчётная проверка мощности новых трансформаторов на ГПП предприятия.

С учётом систематических нагрузок, а также вероятности послеаварийных перегрузок в системе электроснабжения лесохимического завода АО «Сибирский лесохимический завод», расчётная мощность трансформатора на питающей заводской ГПП-35/10 кВ определяется из соотношения [10]:

$$S_{ном.} \geq \frac{S_p}{N \cdot k_{загр}}, \quad (18)$$

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

« $n$  – количество трансформаторов, шт.» [10].

«Исходя из условия (18), расчётная мощность трансформатора для применения на ГПП АО «Сибирский лесохимический завод»» [4]:

$$S_{ном} \geq \frac{10453,5}{2 \cdot 0,65} = 8041,5 \text{ кВА.}$$

«Учитывая полученные результаты, предварительно выбираются два силовых трансформатора ТМН-10000/35» [14]. «Трансформатор в нормальном

режиме» [15] должен работать с коэффициентом загрузки, не превышающим значение 0,7. Это условие выражается так [15]:

$$K_3 = \frac{S_P}{n \cdot S_{ном}} \leq 0,65. \quad (19)$$

Таким образом, коэффициент загрузки трансформатора подстанции ГПП АО «Сибирский лесохимический завод» в нормальном режиме не превышает предельно установленные значения:

$$K_3 = \frac{10453,5}{2 \cdot 10000} = 0,52 \leq 0,65.$$

В послеаварийном режиме коэффициент загрузки трансформатора не должен быть выше значения 1,35, с учётом нагрузки всей ГПП, которая будет приходиться на один трансформатор, оставшийся в работе [11]:

$$1,35 \cdot S_{ном} \geq S_P. \quad (20)$$

Коэффициент загрузки трансформатора ГПП-35/10 кВ АО «Сибирский лесохимический завод» в послеаварийном режиме также удовлетворяет условию:

$$1,35 \cdot 10000 = 13500 \text{ кВА} \geq 10453,5 \text{ кВА}.$$

Таким образом, в работе расчётным путём установлено, что для питания проектируемой внешней системы электроснабжения лесохимического завода АО «Сибирский лесохимический завод», «на ГПП-35/10 кВ объекта проектирования целесообразно установить два силовых трансформатора номинальной мощностью 10000 кВА каждый (марки ТМН-10000/35)» [14].

## 2.5 Расчёт токов коротких замыканий

В работе проводится расчёт значения максимального тока трёхфазного короткого замыкания на сборных шинах ГПП-35/10 кВ проектируемой внешней системы электроснабжения лесохимического завода АО «Сибирский лесохимический завод», по которому будут проверены на термическую и электродинамическую стойкость электрические аппараты и шинные конструкции, выбранные для установки в соответствующих распределительных устройствах ГПП и цеховых ТП.

Кроме того, по минимальным значениям тока КЗ на шинах всех РУ проектируемой внешней системы электроснабжения лесохимического завода АО «Сибирский лесохимический завод» будут проверены уставки релейной защиты на надёжность срабатывания.

Расчёт токов короткого замыкания проводится по следующему алгоритму, который приведён в работе согласно [12].

Первый этап включает составление расчётной схемы сети, в которой отмечаются расчётные точки короткого замыкания.

На втором этапе осуществляется составления схемы замещения сети, исходя из исходной расчётной схемы. В данной схеме показываются расчётные точки короткого замыкания и все элементы, которые входят в цепь короткого замыкания.

Третий этап предполагает преобразование исходной схемы замещения к элементарному виду, необходимому для расчёта токов короткого замыкания. На этом этапе определяются суммарные сопротивления к каждой точке цепи КЗ. На заключительном этапе определяются искомые токи КЗ и ударные токи во всех требуемых точках.

Для расчета токов КЗ на шинах проектируемой внешней системы электроснабжения лесохимического завода АО «Сибирский лесохимический завод», составляется схема замещения (рисунок 6) [14].

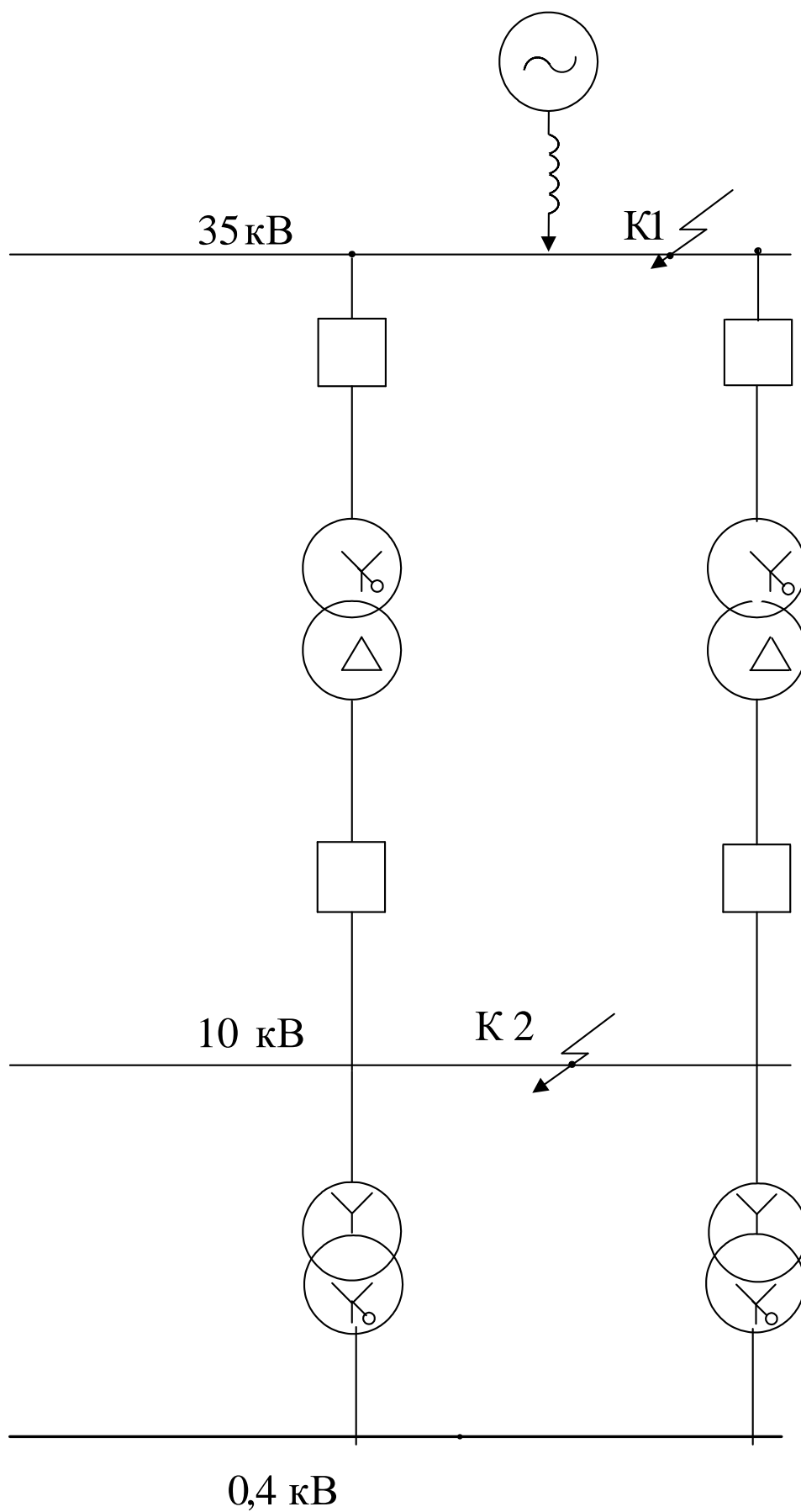


Рисунок 6 – Расчетная схема для расчета токов КЗ на шинах 35 кВ и 10 кВ внешней СЭС АО «Сибирский лесохимический завод»

Для составления схемы замещения, каждый элемент замещается эквивалентным сопротивлением. 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 на шинах проектируемой внешней системы электроснабжения лесохимического завода АО «Сибирский лесохимический завод» (рисунок 7).

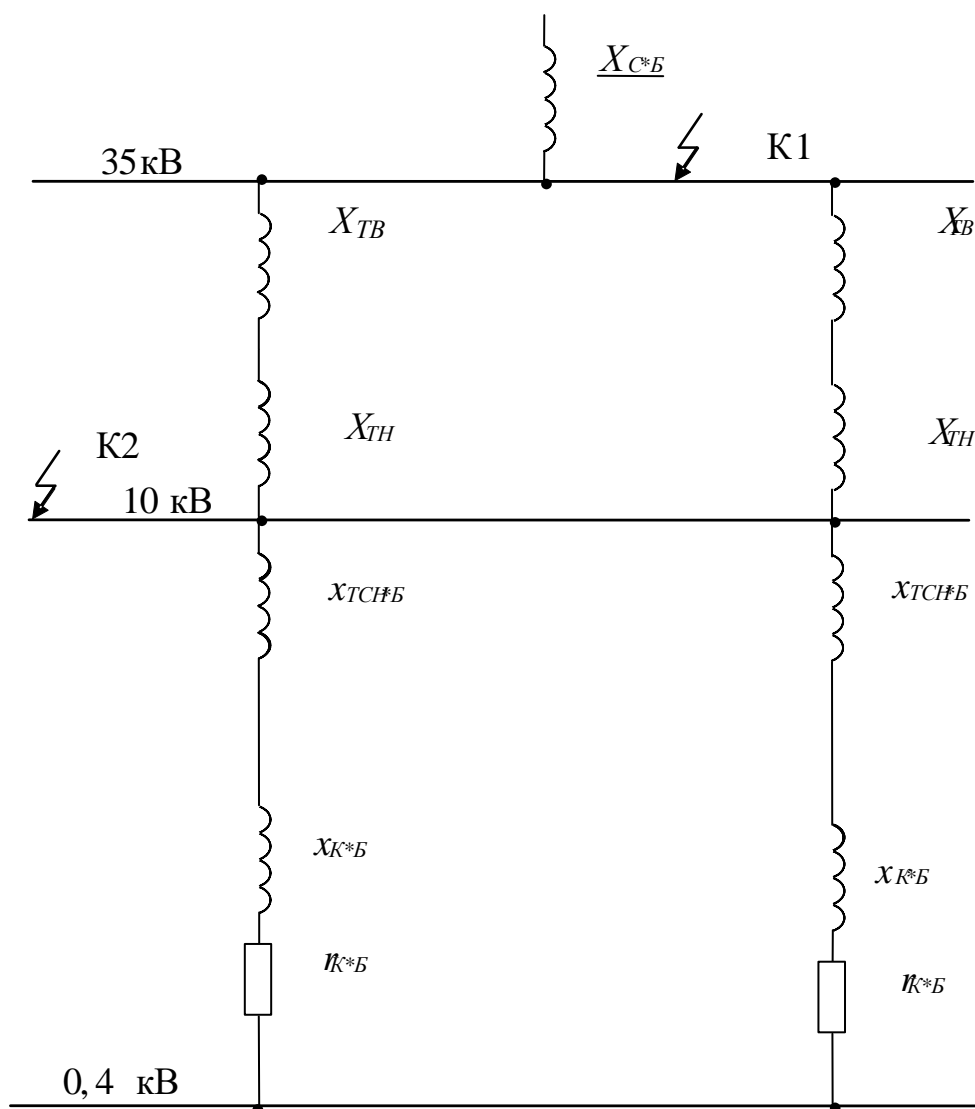


Рисунок 7 – Исходная полная схема замещения электрической сети для расчетов токов КЗ на шинах 35 кВ и 10 кВ внешней СЭС АО «Сибирский лесохимический завод»

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]. Далее проводится расчёт параметров схемы замещения в относительных единицах, с последующим приведением их к именованным.

«Сопротивление энергосистемы» [12]:

$$x_{c*} = \frac{S_{\delta}''}{S_{к}}, \text{ o.e.}, \quad (21)$$

где « $S_{к}''$  – полная мощность трёхфазного КЗ энергосистемы» [9].

По условию (21):

$$x_{c*} = \frac{100}{470} = 0,213 \text{ o.e.}$$

Далее проводится расчёт индуктивных сопротивлений силового трансформатора ГПП СЭС АО «Сибирский лесохимический завод» с учётом паспортных данных, в относительных единицах, при приведении к базисным условиям [12].

Сопротивления к цепи КЗ для отдельных обмоток силового двухобмоточного трансформатора ГПП СЭС АО «Сибирский лесохимический завод», определяются по формуле:

$$x_{т} = \frac{u_{к}\%}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{ном.т}}, \quad (22)$$

где « $S_{ном.т}$  – номинальная мощность трансформатора, кВА» [18].

$$x_{т.в} = \frac{10,75}{100} \cdot \frac{100}{10} = 0,268 \text{ Ом.}$$



$$X_{т.н} = \frac{6,75}{100} \cdot \frac{100}{10} = 0,168 \text{ Ом.}$$

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

$$I''_{к.і} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{cm1} X_{pez\delta*}}, \text{ кА.} \quad (23)$$

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:

$$X_{PEZ.K1} = X_C, \text{ о.е.} \quad (24)$$

Определяются результирующие сопротивления до рассматриваемой точки КЗ. Согласно условия (24):

$$X_{PEZ.K1} = 0,213 \text{ о.е.}$$

«Начальное значение периодической составляющей тока КЗ в расчётной точке К1» [18] в именованных единицах по (23):

$$I''_{к1} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 38,5 \cdot 0,213} = 2,357 \text{ кА.}$$

Результирующее сопротивление к точке К2 в относительных расчётных единицах при последовательно-параллельном соединении элементов:

$$X_{рез.2} = X_{рез.1} + \frac{(X_{ТВ} + X_{ТН}) \cdot (X_{ТВ} + X_{ТН})}{2 \cdot X_{ТВ} + 2 \cdot X_{ТН}}, o.e. \quad (25)$$

Согласно условия (25):

$$X_{рез.2} = 0,213 + \frac{1}{2}0,168 + \frac{1}{2}0,268 = 0,427 o.e.$$

«Начальное значение периодической составляющей тока КЗ в расчётной точке К2» [18] в именованных единицах по (23):

$$I''_{к2} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,6 \cdot 0,427} = 20,493 \text{ кА.}$$

«Значение ударного тока в расчётных точках схемы» [12]:

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot \kappa_{уд} \cdot I''_{к}, \text{ кА,} \quad (26)$$

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

«По условию (26) для расчётных точек схемы К1 и К2 значение ударных токов (начального значения аperiodической составляющей тока КЗ)» [12] в именованных единицах:

– в точке К1:

$$i_{уд1} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 2,357 = 5,999 \text{ кА.}$$

– в точке К2:

$$i_{уд2} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 20,49 = 52,161 \text{ кА.}$$

Значение двухфазного тока КЗ, необходимое для определения надёжности РЗиА [21]:

$$I_{no(\min)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_K'', \text{ кА.} \quad (27)$$

Значение двухфазного тока КЗ, необходимое для определения надёжности РЗиА, по условию (27):

– в точке К1:

$$I_{no(\min)к1} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 2,357 = 2,040 \text{ кА.}$$

– в точке К2:

$$I_{no(\min)к2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 20,49 = 17,744 \text{ кА.}$$

Полученные в работе результаты расчета токов КЗ на шинах 35 кВ и 10 кВ внешней СЭС АО «Сибирский лесохимический завод» представлены в виде таблицы 8 [17].

Таблица 8 – Результаты расчёта токов КЗ на шинах 35 кВ и 10 кВ внешней СЭС АО «Сибирский лесохимический завод»

Параметры точки КЗ	U см, кВ	X <sub>рез</sub> δ *	I'', кА	I <sub>у</sub> <sup>3</sup> , кА	I <sub>к</sub> <sup>2</sup> , кА
К <sub>1</sub>	115,0	0,213	2,357	5,999	2,04
К <sub>2</sub>	6,6	0,427	20,493	52,161	17,744

Результаты расчёта токов КЗ на шинах 35 кВ и 10 кВ внешней СЭС АО «Сибирский лесохимический завод» используются в работе далее при непосредственном «выборе и проверке проводников, аппаратов и основного оборудования РУ-35 кВ и РУ-10 кВ на ГПП и ЦТП» [12].

## 2.6 Выбор и проверка трансформаторов цеховых ТП внутренней системы электроснабжения

«Далее в работе необходимо провести выбор и проверку силовых трансформаторов цеховых трансформаторных подстанций внутренней СЭС АО «Сибирский лесохимический завод» с учётом схемы электрических соединений объекта проектирования, а также подключения нагрузки в питающей сети 10 кВ и распределительной сети 0,38/0,22 кВ» [12].

«Известно, что номинальная полная «мощность силовых трансформаторов для установки на цеховых ТП-10/0,4 кВ систем электроснабжения промышленных предприятий определяется по следующему условию» [12]:

$$S_{\text{ном.т}} \geq S_{\text{ном.т.р}} = \frac{\sum P_p}{N\beta_T}, \quad (28)$$

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

« $\sum P_p$  – активная нагрузка объектов, питающихся от ЦТП, кВт» [12];

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

«Расчёт и выбор мощности силовых трансформаторов на цеховых ТП в работе проводится на примере ТП-1 внутренней СЭС АО «Сибирский лесохимический завод» по условию (28)» [12]:

$$S_{\text{ном.т}} \geq S_{\text{ном.т.р}} = \frac{793}{2 \cdot 0,8} = 495,6 \text{ кВА.}$$

«Для установки на цеховой ТП-1 внутренней СЭС АО «Сибирский лесохимический завод» приняты два силовых трансформатора марки ТМ-630/10 [12]. На других ЦТП внутренней СЭС АО «Сибирский лесохимический завод» выбор силовых трансформаторов аналогичен (таблица 9)» [12].

Таблица 9 – Выбор числа и мощности цеховых трансформаторов внутренней СЭС АО «Сибирский лесохимический завод»

ЦТП	№ цеха	Наименование цеха (участка)	Категория надёжности	$P_p$ , кВт	$S_{ном.т.р.}$ , кВА	$n \times S_{ном.т.}$ , кВА
ЦТП-1	1	Цех производства пиломатериалов	I	793	495,6	2x630
ЦТП-2	2	Цех строганного погонажа	I	1180	842,8	2x1000
ЦТП-3	3	Цех топливных пилетов и щепы	I	708,7	591,9	2x630
	5	Лаборатория контроля качества	II	238,38		
	Всего по ТП-3		I, II	947,08		
ЦТП-4	4	Компрессорная	I	172,52	370,2	2x400
	6	Участок ремонта и обслуживания оборудования	II	275,25		
	7	Пункт приёма и обработки первичного сырья	II	144,6		
	Всего по ТП-4		I, II	592,37		
ЦТП-5	11	Насосная	I	71,9	339,6	2x400
	8	Административное здание	III	160,5		
	9	Торгово-выставочный комплекс	III	89,7		
	10	Склады	III	153,28		
	Всего по ТП-5		II, III	475,38		

«Установлено и показано в таблице 9, что коэффициенты загрузки трансформаторов цеховых ТП-10/0,4 кВ внутренней СЭС АО «Сибирский лесохимический завод» не превышают максимально допустимое значение, следовательно, выбранные типы трансформаторов удовлетворяют требованиям и условиям выбора и проверок» [12].

## 2.7 Выбор и проверка проводников системы электроснабжения

«Далее в работе необходимо провести проверочный расчёт проводников СЭС АО «Сибирский лесохимический завод»» [15].

«В работе в системе электроснабжения АО «Сибирский лесохимический завод» выбору подлежат проводники воздушных линий электропередачи напряжением 35 кВ (питающие воздушные линии от энергосистемы к силовым трансформаторам ГПП) и 10 кВ (отходящие кабельные линии от РУ-10 кВ ГПП к цеховым ТП-10/0,4 кВ)» [22].

Все проводники в системе внешнего электроснабжения АО «Сибирский лесохимический завод» – 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 35 кВ и распределительных кабельных линий 10 кВ)» [5] СЭС АО «Сибирский лесохимический завод» осуществляется по известному условию экономической плотности тока [11]:

$$S_3 = \frac{I_p}{j_3}, \quad (29)$$

где  $j_3$  – «экономическая плотность тока, А/мм<sup>2</sup>» [10].

«При этом расчетное значение рабочего тока нормального режима» [19]:

$$I_n = \frac{P_p}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot \cos \varphi} = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}}, \quad (30)$$

где « $S_p$  – расчётная полная нагрузка линии, кВА» [19].

«Расчетное значение рабочего тока послеаварийного режима» [19]:

$$I_a = 1,4 \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} = 1,4 \cdot I_n. \quad (31)$$

После выбора проводников воздушных и кабельных линий СЭС АО «Сибирский лесохимический завод» необходимо провести их проверку на работоспособность в нормальном и послеаварийном режимах работы.

«Проверка проводников воздушных и кабельных линий СЭС АО «Сибирский лесохимический завод» в нормальном режиме работы» [11]:

$$I_{\text{доп}} \geq I_{p.}, \quad (32)$$

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

Проверка проводников воздушных и кабельных линий СЭС АО «Сибирский лесохимический завод» в послеаварийном режиме работы [11]:

$$I_{\text{доп}} \geq I_{p.\text{max}}, \quad (33)$$

где  $I_{p.\text{max}}$  – 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-35 кВ).

Выполнение данного условия проверяется по следующему соотношению:

$$S_{\text{ст}} \geq S_{\text{мин}}, \text{ мм}^2. \quad (34)$$

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-35 кВ ГПП-35/10 кВ СЭС АО «Сибирский лесохимический завод».

Питание ГПП-35/10 кВ СЭС АО «Сибирский лесохимический завод» осуществляется от двухцепной воздушной линии электропередачи с применением провода марки АС.

В работе для большей надежности функционирования воздушных линий, с учетом климата Сибири, для установки на новой питающей ВЛ-35 кВ

выбирается уникальный по своей конструкции компактный провод марки «AERO-Z» (АЭРО-Зет) [7].

Такой провод отличается от своих аналогов повышенной прочностью и пропускной способностью, а также высокой степенью устойчивости к гололедообразованию [7].

Внешний вид и конструкция основных модификаций инновационных проводов марки AERO-Z для применения на высоковольтных линиях напряжением 35-330 кВ представлены на рисунке 8.



Рисунок 8 – Внешний вид и конструкция основных модификаций инновационных проводов марки AERO-Z для применения на высоковольтных линиях напряжением 35-330 кВ

Ток нормального режима для питающей ВЛ-35 кВ ГПП-35/10 кВ СЭС АО «Сибирский лесохимический завод»:

$$I_p = \frac{10453,5}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 35} \approx 86,2 \text{ А.}$$



Ток послеаварийного режима для питающей ВЛ-35 кВ ГПП-35/10 кВ СЭС АО «Сибирский лесохимический завод»:

$$I_{p.\max} = \frac{10453,5}{\sqrt{3} \cdot 35} = 172,4 \text{ А.}$$

Расчётное сечение питающей ВЛ-35 кВ ГПП-35/10 кВ СЭС АО «Сибирский лесохимический завод» по условию экономической плотности тока:

$$S_{\rho} = \frac{86,2}{1,1} = 78,3 \text{ мм}^2.$$

Из ряда стандартных наименьших значений сечений новых проводов марки АЕРО-Z выбирается ближайшее стандартное сечение – 148 мм<sup>2</sup>.

Согласно дальнейшей перспективе по развитию системы электроснабжения АО «Сибирский лесохимический завод» выбирается для питающих ВЛ-35 кВ провод марки АЕРО-Z - 148 с сечением токоведущей жилы 148 мм<sup>2</sup> и допустимой токовой нагрузкой  $I_{\text{дон}} = 425 \text{ А}$ .

Проверка предварительно выбранного провода марки АЕРО-Z - 148 для воздушной линии 35 кВ по току нормального режима:

$$425 \text{ А} \geq 86,2 \text{ А.}$$

Условия проверки выполняются.

Проверка предварительно выбранного провода марки АЕРО-Z - 148 для воздушной линии 35 кВ по максимальному рабочему току ПАВ режима выполняется (условие (38)):

$$425 \text{ А} \geq 172,4 \text{ А.}$$

Проверка по условию (39) выполняется:

$$148 \text{ мм}^2 \geq 70 \text{ мм}^2.$$

Окончательно для применения на питающей ВЛ-110 кВ в работе выбран современный провод марки АЕРО-Z - 148 с сечением токоведущей жилы – 148 мм<sup>2</sup> и допустимой токовой нагрузкой  $I_{доп} = 425$  А.

«Выбор кабельных линий напряжением 10 кВ, питающих ТП-10/0,4 кВ, представлен в форме таблицы 10.

Таблица 10 – Результаты выбора кабельных линий 10 кВ системы электроснабжения лесохимического завода

№ ТП (линии)	n, шт.	$I_p, \text{А}$	$I_{p,max.}, \text{А}$	$F_{э}, \text{мм}^2$	Марка силового кабеля	$I_{доп}, \text{А}$	$\Delta U, \%$
ТП-1	2	25,2	50,4	18,0	АСБл–10 (3×16)	75	2,4
ТП-2	2	39,7	79,4	28,3	АСБл–10 (3×25)	90	1,8
ТП-3	2	32,3	64,6	23,0	АСБл–10 (3×25)	90	1,1
ТП-4	2	19,9	39,8	14,2	АСБл–10 (3×16)	75	1,9
ТП-5	2	14,3	28,6	10,2	АСБл–10 (3×16)	75	2,6
Насосная (АД 10 кВ)	2	21,8	43,6	15,6	АСБл–10 (3×16)	75	2,1

Проводники питающей ВЛ-110 кВ и отходящих КЛ-10 кВ отвечают условиям всех проверок.

Выбор ошиновки для применения в ОРУ-35 кВ и ЗРУ-10 кВ ГПП СЭС лесохимического завода осуществляется по значению максимального рабочего тока.

При этом проверка выбранной ошиновки проводится по току КЗ в зависимости от паспортной характеристики данных шин.

Результаты выбора и проверки ошиновки в РУ ГПП лесохимического завода представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Результаты выбора и проверки ошиновки для применения в ОРУ-35 кВ и ЗРУ-10 кВ ГПП СЭС лесохимического завода

Наименование РУ ГПП	Тип/марка ошиновки	Длительный режим		Проверка по режиму КЗ
		$I_n \geq I_{p,max}$ , А	Сечение $q_n$ , мм <sup>2</sup>	$q_n \geq q_{min}$ , мм <sup>2</sup>
ОРУ – 35кВ	Гибкая/АС – 300/66	680 > 172,4	300	300 > 53
ЗРУ – 10кВ	Жёсткая/А80×10	1480 > 809,2	800	800 > 226

Все выбранные проводники 35 кВ и 10 кВ для применения в СЭС лесохимического завода удовлетворяют условиям выбора и нормативных требуемых проверок [18].

## 2.8 Выбор и проверка электрических аппаратов подстанции

Как было указано ранее, одним из важнейших мероприятий по проектированию системы электроснабжения АО «Сибирский лесохимический завод» является выбор нового оборудования для установки в распределительных устройствах высокого напряжения на ГПП-35/10 кВ.

РУ-10 кВ ЦТП-10/0,4 кВ выполняется по упрощённой схеме и коммутируется с соответствующих ячеек РУ-10 кВ ГПП-35/10 кВ. Такая схема 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-35/10 кВ (35 кВ, 10 кВ);
- разъединители – применяются только в ОРУ-35 кВ на ГПП-35/10 кВ (в РУ-10 кВ заменяются втычными контактами ячеек типа КРУН);

- ограничители перенапряжения устанавливаются во всех РУ ГПП-35/10 кВ;
- измерительные трансформаторы тока и напряжения – применяются в ОРУ-35 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 [23].

Известно, что выбор выключателей высокого напряжения производится исходя из следующих условий двух основных условий [18]:

- по номинальному напряжению:

$$U_{уст} \leq U_n. \quad (35)$$

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

- по максимальному рабочему току:

$$I_{раб.макс} \leq I_n. \quad (36)$$

где  $I_{раб.макс}$ ,  $I_n$  – 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]:

$$I_{n\tau} \leq I_{откн.н} \quad (37)$$

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

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

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

$$(\sqrt{2} \cdot I_{n\tau} + i_{a\tau}) \leq \sqrt{2} \cdot I_{откн.н} (1 + \beta_n), \quad (38)$$

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]:

$$t = t_{з.мин} + t_{с.в}, \quad (39)$$

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]:

$$i_y \leq i_{np.c}, \quad (40)$$

где « $i_{np.c}$  – 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]:

$$B_k \leq I_T^2 t_T, \quad (41)$$

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,  $c$ » [18].

«При этом тепловой импульс» [18] с учётом токов КЗ и отключения цепи:

$$B_k = I_k^2 (t_{отк} + T_a). \quad (42)$$

Исходя из расположения в схеме ГПП-35/10 кВ СЭС АО «Сибирский лесохимический завод» высоковольтные выключатели напряжением 35 кВ и 10 кВ подразделяются на следующие типы:

- высоковольтные выключатели ввода (вводные высоковольтные выключатели) – служат для приёма электроэнергии от энергосистемы с последующей её передачей на два силовых трансформатора подстанции (сеть 35 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-35/10 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-35/10 кВ СЭС АО «Сибирский лесохимический завод» будут также различными.

Предварительно принимается для установки на объекте проектирования выключатели высокого напряжения новых образцов и модификаций следующих марок:

- в РУ-35 кВ – выключатели марки ВР35НС-35-20/1600-3/3 УХЛ1;
- в РУ-10 кВ – выключатели марки ВВ/ТЕL-10-20-1600-У2-48 (вводные) и ВВ/ТЕL-10-20-630-У2-48 (линейные).

Выбор и проверка высоковольтных выключателей для установки во всех распределительных устройствах ГПП-35/10 кВ СЭС АО «Сибирский лесохимический завод» проводится по приведённым выше условиям (таблица 12).

Таблица 12 – Результаты выбора и проверки выключателей высокого напряжения для установки в РУ ГПП-35/10 кВ СЭС АО «Сибирский лесохимический завод»

Наименование присоединения	Тип выключателя	Соотношение паспортных и расчетных данных						
		$\frac{U_n}{U_p}$ , кВ	$\frac{I_n}{I_{p\max}}$ , А	$\frac{I_{откл.ном}}{I''}$ , кА	$\frac{i_{откл.ном}}{i_{кт}}$ , кА	$\frac{I_{пр.с}}{I''}$ , кА	$\frac{i_{пр.с}}{i_y^{(3)}}$ , кА	$\frac{I_t^2 \cdot t}{B_k}$ , кА·с
Вводной выключатель 35 кВ	ВР35НС-35-20/1600-3/3 УХЛ1	$\frac{35}{35}$	$\frac{1250}{646}$	$\frac{20}{4,372}$	$\frac{38,18}{10,03}$	$\frac{20}{4,372}$	$\frac{50}{13,63}$	$\frac{1200}{22,08}$
Вводной и секционный выключатели 10 кВ	ВВ/ТЕL-10-25/1600 У2	$\frac{10}{10}$	$\frac{1600}{1346}$	$\frac{25}{20,49}$	$\frac{47,73}{39,64}$	$\frac{25}{20,49}$	$\frac{64}{52,16}$	$\frac{1875}{463}$
Линейные выключатели 10 кВ	ВВ/ТЕL-10-12,5/630 У2	$\frac{10}{10}$	$\frac{1600}{168}$	$\frac{25}{20,49}$	$\frac{47,73}{39,64}$	$\frac{25}{20,49}$	$\frac{64}{52,16}$	$\frac{1875}{463}$

Далее проводится выбор разъединителей для установки в РУ-35 кВ и РУ-10 кВ ГПП-35/10 кВ СЭС АО «Сибирский лесохимический завод».

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

В работе для установки в сети 35 кВ на ГПП-35/10 кВ СЭС АО «Сибирский лесохимический завод» 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].

«Результаты выбора и проверки разъединителей для установки в РУ-35 кВ ГПП-35/10 кВ СЭС АО «Сибирский лесохимический завод» представлены в таблице 13» [15].

Таблица 13 – Результаты выбора и проверки разъединителей для установки в РУ-35 кВ ГПП-35/10 кВ СЭС АО «Сибирский лесохимический завод»

Наименование присоединения	Тип разъединителя/ привода	$\frac{U_n}{U_{уст}}$ кВ	$\frac{I_n}{I_{р.макс}}$ А	$\frac{I_{пр.с}}{I}$ кА	$\frac{i_{пр.с}}{i_y}$ кА	$\frac{I_{mT}^2}{B_k}$ кА <sup>2</sup> ·с
ОРУ 35 кВ	<u>РДЗ-1-35/1000НУХЛ1</u> ПРГ-01 2БУХЛ1	<u>35</u>	<u>1000</u>	<u>63</u>	<u>80</u>	<u>1875</u>
	<u>РДЗ-2-35/1000НУХЛ1</u> ПРГ-01 2БУХЛ1	35	646	4,37	13,6	22,1

В ячейках КРУ-10 кВ ГПП-35/10 кВ СЭС АО «Сибирский лесохимический завод» разъединители не устанавливаются, их заменяют втычные контакты. Для установки в РУ ГПП-35/10 кВ СЭС АО «Сибирский лесохимический завод» выбираются ограничители перенапряжения следующих типов и марок:

- для установки в РУ-35 кВ и на ВЛ-35 кВ – ОПН типа ОПН-У/TEL 35/40,5 УХЛ1;
- для установки в РУ-10 кВ и в ячейках отходящих линий 10 кВ – ОПН типа ОПН- РС/TEL 6/7,6 УХЛ1.

Также необходимо выбрать новые трансформаторы тока и напряжения (измерительные трансформаторы) для их непосредственной установки на



ГПП-35/10 кВ СЭС АО «Сибирский лесохимический завод». Выбор новых измерительных трансформаторов тока и напряжения в работе чрезвычайно важен, так как они питают приборы учёта, контроля и управления электроэнергией, а также цепи релейной защиты, автоматики, сигнализации и телеметрии. Результаты выбора и проверки новых трансформаторов напряжения для установки в РУ всех классов напряжения на ГПП-35/10 кВ СЭС АО «Сибирский лесохимический завод» представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Результаты выбора новых трансформаторов напряжения для установки в РУ на ГПП-35/10 кВ СЭС АО «Сибирский лесохимический завод»

Тип ТН	Кол-во ТН	Мощность на один ТН, ВА	Класс точности	$\frac{U_n}{U_{уст}}$ , кВ	$\frac{S_n}{S_2 \sum}$ , ВА
НТМИ-10-66	4	36,8/4	1	$\frac{10}{10}$	$\frac{200,0}{9,3}$

Результаты выбора и проверки новых трансформаторов тока для установки в РУ всех классов напряжения на ГПП-35/10 кВ СЭС АО «Сибирский лесохимический завод» представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Результаты выбора новых трансформаторов тока для установки в РУ ГПП-35/10 кВ СЭС АО «Сибирский лесохимический завод»

Наименование присоединения	Марка ТТ	Исполнение вторичной обмотки	$\frac{U_n}{U_{уст}}$	$\frac{I_{ном}}{I_{р.макс}}$	$\frac{i_{дин}}{i_y}$	$(k_T I_{ном})^2 t_T$
			кВ	А	кА	$B_k$ кА <sup>2</sup> ·с
Ввод РУ 35 кВ	ТГФМ-35-У3	0,5/Р/Р	$\frac{35}{35}$	$\frac{800}{647}$	—	—
ВЛ-35 кВ	ТГФМ-35-У3	0,5/Р/Р	$\frac{35}{35}$	$\frac{300}{202}$	—	—
Шины 10 кВ	ТПК-10-У3	10Р/10Р	$\frac{10}{10}$	$\frac{1500}{1346}$	$\frac{118}{52,2}$	$\frac{7056}{463}$
Отходящие линии 10 кВ	ТПК-10-У3	0,5/Р	$\frac{10}{10}$	$\frac{400}{168}$	$\frac{75}{52,2}$	$\frac{2825}{463}$

Всё новое выбранное оборудование распределительных устройств ГПП-35/10 кВ СЭС АО «Сибирский лесохимический завод» удовлетворяет всем требуемым условиям и принимается для установки на объекте.

Выводы по разделу 2.

Исходя из результатов проведённого сравнительного анализа проведено аргументированное обоснование и выбраны рациональные схемы электрических соединений системы электроснабжения АО «Сибирский лесохимический завод»:

- для применения в РУ-35 кВ питающей ГПП – схема «Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий»;
- для применения в РУ-10 кВ питающей ГПП – схема «Одна секционированная система шин»;
- для применения в распределительной сети 10 кВ – «Радиальная схема с резервированием на секции шин источника питания (РУ-10 кВ ГПП)»;
- для применения на двухтрансформаторных ЦТП, питающих потребители 1 и 2 категории надёжности, принимается «Радиальная схема с резервированием на секции шин РУ-10 кВ и РУ-0,4 кВ».

Рассчитаны электрические нагрузки и токи короткого замыкания в максимальном режиме работы системы электроснабжения АО «Сибирский лесохимический завод». На основании полученных результатов, установлено, что для питания проектируемой внешней системы электроснабжения АО «Сибирский лесохимический завод», на ГПП-35/10 кВ объекта проектирования целесообразно установить два силовых трансформатора номинальной мощностью 10000 кВА каждый (марки ТМН-10000/35).

Выбраны и проверены номинальные мощности трансформаторов цеховых ТП-10/0,4 кВ внутренней СЭС АО «Сибирский лесохимический завод» (всего предусмотрено пять ЦТП). Для питающих ВЛ-35 кВ принята марка инновационного провода АЕРО-Z - 148 с сечением токоведущей жилы 148 мм<sup>2</sup>. Для питания ЦТП от РУ-10 кВ ГПП-35/10 кВ выбраны и проверены сечения всех кабельных линий с использованием марки кабелей современного типа АСБл-10. Выбрана и проверена ошиновка для применения в РУ-35 кВ и РУ-10 кВ ГПП СЭС АО «Сибирский лесохимический завод».

### **3 Расчёт системы собственных нужд ГПП лесохимического завода**

Оперативный ток, применяемый в системе собственных нужд на ГПП-35/10 кВ системы электроснабжения АО «Сибирский лесохимический завод» – переменный, напряжением 220 В.

Для выбора мощности трансформаторов собственных нужд ГПП системы электроснабжения лесохимического завода необходимо рассчитать нагрузку собственных нужд подстанции.

В соответствии с [19] на всех двухтрансформаторных подстанциях 35 – 750 кВ необходимо устанавливать не менее двух трансформаторов собственных нужд (ТСН).

Поэтому на ГПП-35/10 кВ системы электроснабжения АО «Сибирский лесохимический завод» устанавливается два ТСН, которые присоединяются к секциям шин 10 кВ через высоковольтные предохранители, защищающие ТСН от ненормальных режимов работы. На стороне НН предусматривается раздельная работа ТСН, каждого на свою секцию, с АВР на секционной связи.

К основным потребителям собственных нужд подстанции относятся освещение территории ГПП системы электроснабжения лесохимического завода, обогрев оборудования в зимнее время, а также устройства телемеханики, связи и управления [12].

К основным потребителям собственных нужд ТСН ГПП-35/10 кВ системы электроснабжения АО «Сибирский лесохимический завод» относятся следующие потребители [24]:

- отопление РУ-10 кВ;
- подогрев шкафов СН;
- освещение открытой части ГПП;
- аварийное освещение;
- отопление здания ГПП;
- освещение здания ГПП;
- зарядное устройство НРТ40.110;

- стойки телемеханики, связи и управления;
- электроподогреватель;
- ремонтная мастерская;
- блок РЗиА.

Вся нагрузка данных потребителей СН должна быть учтена в работе.

Расчёт нагрузки потребителей собственных нужд ТСН ГПП-35/10 кВ системы электроснабжения АО «Сибирский лесохимический завод» представлен в таблице 16 [18].

Таблица 16 – Расчёт нагрузки потребителей собственных нужд ТСН ГПП-35/10 кВ системы электроснабжения АО «Сибирский лесохимический завод»

Наименование потребителя	$\cos \varphi$	Потребляемая нагрузка		
		$P_{\max}$ , кВт	$Q_{\max}$ , квар	$S_{\max}$ , кВА
Отопление КРУН-10 кВ	1,00	10,00	–	10,00
Подогрев шкафов СН	1,00	5,00	–	5,00
Рабочее освещение открытой части ГПП-35/10 кВ	1,00	2,00	–	2,00
Аварийное освещение открытой части ГПП-35/10 кВ	1,00	1,00	–	1,00
Отопление технических помещений и помещения дежурного персонала ГПП-35/10 кВ	1,00	10,00	–	10,00
Рабочее освещение технических помещений и помещения дежурного персонала ГПП-35/10 кВ	1,00	2,00	–	2,00
Аварийное освещение технических помещений и помещения дежурного персонала ГПП-35/10 кВ	1,00	0,50	–	0,50
Стойки телемеханики, связи и управления, РЗиА	–	3,50	–	3,50
Итого	–	34,00	–	34,00

Проводится расчёт собственных нужд ТСН ГПП-35/10 кВ системы электроснабжения АО «Сибирский лесохимический завод» по методике [18].

Нагрузка собственных нужд ГПП системы электроснабжения лесохимического завода определяется [18]:

$$S_{\max.сн} = k_{р.м} \sqrt{\sum_1^n P_{\max}^2 + \sum_1^n Q_{\max}^2}, \quad (43)$$

где  $P_{\max}$  – суммарная активная потребляемая нагрузка собственных

нужд, кВт;

$Q_{\text{макс}}$  – суммарная реактивная потребляемая нагрузка собственных нужд, кВт.

При  $k_{p.m} = 0,85$ , расчётная полная нагрузка СН по условию (43):

$$S_{\text{макс.сн}} = 0,85\sqrt{34^2 + 0^2} = 28,9 \text{ кВА.}$$

Расчетная мощность трансформатора собственных нужд (ТСН) выбирается с учётом суммарной расчётной полной мощности собственных нужд, с учётом коэффициента загрузки ТСН и числа ТСН на ГПП:

$$S_{\text{ТСН}} = \frac{S_{\text{макс.сн}}}{k_3 \cdot n}, \text{ кВА.} \quad (44)$$

«Расчетная мощность ТСН по (44)» [3]:

$$S_{\text{ТСН}} = \frac{28,9}{0,7 \cdot 2} = 20,64 \text{ кВА.}$$

«К установке на ГПП системы внешнего электроснабжения объекта принимаются два двухобмоточных трехфазных трансформатора внутренней установки типа ТМ-25/10У1, работающих раздельно, каждый на свою секцию шин, подключенных к вводным выключателям через присоединение предохранителей в РУ-10 кВ ГПП» [20] системы электроснабжения лесохимического завода.

Схема подключения ТСН главной понизительной подстанции переменного напряжения 35/10 кВ системы электроснабжения лесохимического завода, принятая при проектировании, представлена на рисунке 9.

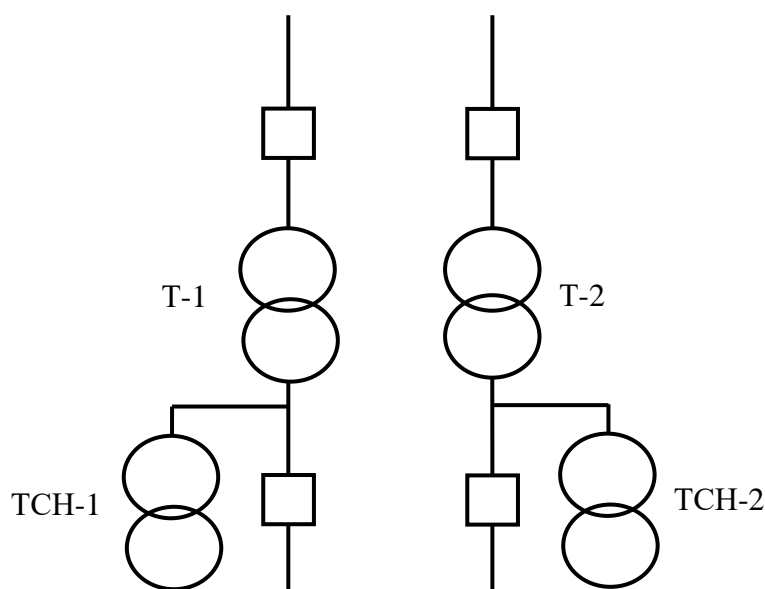


Рисунок 9 – Схема подключения ТСН главной понизительной подстанции переменного напряжения 35/10 кВ системы электроснабжения АО «Сибирский лесохимический завод», принятая при проектировании

Схема подключения ТСН главной понизительной подстанции переменного напряжения 35/10 кВ системы электроснабжения лесохимического завода соответствует всем требованиям и нормам [18], поэтому может быть принята в работе.

Выводы по разделу 3.

Выбраны трансформаторы собственных нужд для установки на ГПП системы электроснабжения лесохимического завода.

В качестве трансформаторов СН приняты и обоснованы два трансформатора марки ТМ-25/10У1. Предложена схема для питания системы СН с резервированием на стороне 0,4 кВ.

## Заключение

В результате выполнения работы проведена разработка проекта системы электроснабжения объекта лесоперерабатывающей промышленности на примере лесохимического завода АО «Сибирский лесохимический завод».

Обозначена актуальность выбора темы с последующим анализом технических данных нагрузки потребителей. Приведён комплекс основных задач, который требуется решить в работе для достижения поставленной цели.

Проведён анализ основных требований, предъявляемых к схемам главных электрических соединений нормального режима систем электроснабжения лесохимических предприятий.

Проведён детальный практический расчёт и последующее обоснование технических мероприятий и решений по проектированию системы электроснабжения АО «Сибирский лесохимический завод».

Обосновано, что для обеспечения питания внешней системы электроснабжения АО «Сибирский лесохимический завод», в работе необходимо применять главную понизительную подстанцию с высшим классом напряжения 35 кВ и низшим классом напряжения 10 кВ и двумя силовыми трансформаторами.

Исходя из результатов проведённого сравнительного анализа проведено аргументированное обоснование и выбраны рациональные схемы электрических соединений системы электроснабжения лесохимического завода АО «Сибирский лесохимический завод»:

- для применения в РУ-35 кВ питающей ГПП принята наиболее рациональная схема «Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий»;
- для применения в РУ-10 кВ питающей ГПП принята наиболее рациональная схема «Одна секционированная система шин»;

- для применения в распределительной сети 10 кВ принята наиболее рациональная схема «Радиальная схема с резервированием на секции шин источника питания (РУ-10 кВ ГПП)»;
- для применения на однострансформаторных ЦТП, питающих потребители 3 категории надёжности, принята «Радиальная схема без резервирования на секции шин РУ-10 кВ», а для применения на двухтрансформаторных ЦТП, питающих потребители 1 и 2 категории надёжности, принята «Радиальная схема с резервированием на секции шин РУ-10 кВ и РУ-0,4 кВ».

Рассчитаны электрические нагрузки и токи короткого замыкания в максимальном режиме работы системы электроснабжения АО «Сибирский лесохимический завод».

На основании полученных результатов, установлено, что для питания проектируемой внешней системы электроснабжения АО «Сибирский лесохимический завод», на ГПП-35/10 кВ объекта проектирования целесообразно установить два силовых трансформатора номинальной мощностью 10000 кВА каждый (марки ТМН-10000/35).

Выбраны и проверены номинальные мощности трансформаторов цеховых ТП-10/0,4 кВ внутренней СЭС АО «Сибирский лесохимический завод» (всего предусмотрено пять ЦТП).

Согласно дальнейшей перспективе по развитию системы электроснабжения АО «Сибирский лесохимический завод» для питающих ВЛ-35 кВ принята марка инновационного провода АЕРО-Z - 148 с сечением токоведущей жилы 148 мм<sup>2</sup> и допустимой токовой нагрузкой  $I_{don} = 425$  А.

Для питания ЦТП от РУ-10 кВ ГПП-35/10 кВ выбраны и проверены сечения всех кабельных линий с использованием марки кабелей современного типа АСБл-10.

Выбрана и проверена ошиновка для применения в РУ-35 кВ и РУ-10 кВ ГПП СЭС АО «Сибирский лесохимический завод».



Выбраны новые современные электрические аппараты для установки в РУ-35 кВ и РУ-10 кВ ГПП системы электроснабжения лесохимического завода.

Выбраны трансформаторы собственных нужд для установки на ГПП системы электроснабжения лесохимического завода.

В качестве трансформаторов СН приняты и обоснованы два трансформатора марки ТМ-25/10У1. Предложена схема для питания системы СН с резервированием на стороне 0,4 кВ.

Таким образом, на основании проведённых расчётов установлено, что система электроснабжения АО «Сибирский лесохимический завод» отвечает всем требуемым критериям по надёжности, бесперебойности обеспечения электроэнергией, электробезопасности и экономичности.

## Список используемых источников

1. АО «Сибирский лесохимический завод». [Электронный ресурс]: URL: <https://excheck.pro/company/2454019736-slhz> (дата обращения: 20.02.2023).
2. 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: 22.01.2023).
3. 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: 21.02.2023).
4. Кадомская К.П., Лавров Ю.А. Электрооборудование высокого напряжения нового поколения. Вологда: Инфра-Инженерия, 2018. 343 с.
5. Линии с проводом AERO-Z. [Электронный ресурс]: URL: <https://domikelectrica.ru/linii-s-provodom-aero-z-7-preimushhestv/> (дата обращения: 20.02.2023).
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. Организация АО «Сибирский лесохимический завод». [Электронный ресурс]: URL: <https://www.list-org.com/company/5638097> (дата обращения: 20.02.2023).
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\\_](https://docs.cntd.ru/document/902087949_) (дата обращения: 20.02.2023).

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. Рогалев Н.Д. Энергосбережение: учебное пособие для ВУЗов. Москва: МЭИ, 2020. 242 с.
13. Рожкова Л.Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций: Учебник для студентов учреждений среднего профессионального образования. М.: ИЦ Академия, 2018. 448 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. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. 4-е изд., перераб. и доп. М.: ЭНАС, 2018. 312 с.
18. Типовые схемы РУ ПС 35-750 кВ. [Электронный ресурс]: URL: [http://powersystem.info/index.php/%D0%A2%D0%B8%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B5\\_%D1%81%D1%85%D0%B5%D0%BC%D1%8B\\_%D0%A0%D0%A3\\_35-750\\_%D0%BA%D0%92](http://powersystem.info/index.php/%D0%A2%D0%B8%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B5_%D1%81%D1%85%D0%B5%D0%BC%D1%8B_%D0%A0%D0%A3_35-750_%D0%BA%D0%92) (дата обращения: 20.02.2023).
19. Фролов Ю. М. Основы электроснабжения / Ю.М. Фролов, В.П. Шелякин. М.: Лань, 2019. 480 с.
20. Шеховцов В. П. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению / В.П. Шеховцов. М.: Форум, Инфра-М, 2019. 136 с.
21. Barker R. CASE Method. Entity-Relationship Modeling. N.Y.: Addition-Wesley Publishing Company, 2021. 112 p.

22. Bunn D.W. Experimental study of a Bayesian method for daily electricity load forecasting. *Appl. Math. Model.* 2020. №2. P. 113 – 116.
23. Bunn Ed. D. Comparative models for electrical load forecasting. New York: Wiley. 2018. 232 p.
24. DeMarco T. Short – term load forecasting in electric power systems: A comparison of ARMA models and extended Wiener filtering. *J. Forecast.* 2022. №4. P.56-61.
25. Farmer E.D. Development of on-line load prediction techniques with trails in the south-western region of the CEGB. *Proc. EE.* 2018. 115 p.