

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 целлюлозно-бумажного производства

Обучающийся

Д. А. Локтяев

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доц. В. С. Романов

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

Тольятти 2023

## Аннотация

Работа посвящена разработке проекта системы электроснабжения целлюлозно-бумажного производства на примере целлюлозно-бумажного комбината, который разрабатывается с целью ввода нового объекта в эксплуатацию в связи с производственной необходимостью и дефицитом производимой продукции на отечественном рынке.

«В работе решены следующие поставленные задачи:

- проведён анализ исходных технических и экономических данных с рассмотрением основных теоретических положений для решения поставленных задач» [7];
- «осуществлено проектирование системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината с конечным выбором схемы электроснабжения, а также электрических сетей и аппаратов на всех звеньях электрической сети объекта» [7]. Также выбору подлежат проводники в системе электроснабжения объекта проектирования, включая питающие и распределительные сети. Принятые в работе решения обязательно проверяются на термическую и динамическую стойкость к максимальным токам короткого замыкания, рассчитанным в работе;
- проведён расчёт рентабельности и основных экономических показателей в целом, спроектированной системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината.

## **Abstract**

The work is devoted to the development of a project for a power supply system for pulp and paper production using the example of a pulp and paper mill, which is being developed to put a new facility into operation due to production needs and a shortage of manufactured products on the domestic market. For the qualitative implementation of the main goal of the work, the following tasks were solved:

- the analysis of the initial technical and economic data was carried out with the consideration of the main theoretical provisions for solving the set tasks;
- the design of the power supply system of the pulp and paper mill was completed with the final choice of the power supply scheme, as well as electrical networks and devices at all links of the facility's electrical network. The paper selects the main components of the object of study, as well as its components (power transformers of the GPP, shop TP and auxiliary needs of the GPP, electrical networks, switchgear equipment). Also, conductors in the power supply system of the design object, including supply and distribution networks, are subject to selection. Based on this, on the basis of calculated data, modern technical solutions were selected for use in the work, the reasoned choice of which is based on the analysis of modern developments and models of leading world and domestic manufacturers. The solutions adopted in the work are necessarily checked for thermal and dynamic resistance to the maximum short-circuit currents calculated in the work;
- calculation of profitability and main economic indicators as a whole of the designed power supply system of the pulp and paper mill was carried out.

## Содержание

|   |    |
|---|----|
| Введение .....  | 5  |
| 1 Характеристика объекта и анализ исходных данных.....  | 7  |
| 1.1 Техническая характеристика целлюлозно-бумажного комбината .....                                       | 7  |
| 1.2 Основные требования к проектированию систем электроснабжения<br>целлюлозно-бумажных предприятий.....  | 12 |
| 2 Проектирование системы электроснабжения целлюлозно-бумажного<br>производства.....                       | 19 |
| 2.1 Выбор номинальных напряжений и схемы электроснабжения<br>целлюлозно-бумажного комбината.....          | 19 |
| 2.2 Расчёт электрических нагрузок .....   | 21 |
| 2.3 Выбор и проверка мощности силовых трансформаторов ГПП .....   | 26 |
| 2.4 Выбор и проверка трансформаторов цеховых подстанций с учётом<br>компенсации реактивной нагрузки ..... | 34 |
| 2.5 Расчёт и построение картограммы электрических нагрузок .....  | 37 |
| 2.6 Выбор и проверка проводников системы электроснабжения.....  | 39 |
| 2.7 Расчёт токов короткого замыкания .....  | 43 |
| 2.8 Выбор и проверка электрических аппаратов .....  | 54 |
| 3 Расчёт технико-экономических показателей проекта .....  | 63 |
| Заключение .....  | 71 |
| Список используемых источников.....   | 74 |

## Введение

Известно, что целлюлозно-бумажное производство составляет одно из направлений лесоперерабатывающей промышленности.

Сегодня целлюлозно-бумажное производство испытывает в Российской Федерации значительные сложности, связанные, в первую очередь, с введением санкций, а также разрывом или значительным усложнением многих логистических цепочек.

Такая ситуация требует принятия новых решений, так как в условиях увеличивающегося спроса на производимую продукцию, снижение и сокращение производства приводит к удорожанию продукции, что, в свою очередь, влечёт снижение конкурентоспособности, сокращение персонала, снижение отчислений в бюджет и, в конечном итоге, к ликвидации предприятий путём применения процедуры банкротства.

Сегодня в Российской Федерации около двухсот предприятий целлюлозно-бумажного производства, однако примерно 90% всей продукции приходится на двадцать самых крупных комбинатов.

Такая монополизация отрицательно сказывается не только на конкурентоспособности, но и на качестве продукции и конечном снижении дохода не только предприятий-производителей, но и государства в целом (за счёт снижения поступления налогов в казну).

Однако в отечественной промышленности заметно отставание от мирового научно-технического прогресса. Выходом из сложившейся ситуации является ввод в эксплуатацию качественно новых объектов целлюлозно-бумажного производства лесоперерабатывающей промышленности, на которых основной производственный цикл и оборудование были бы современными, технически и экономически выгодными и рентабельными. Данный аспект обуславливает актуальность выполняемой работы.

Разработка системы электроснабжения одного из таких объектов целлюлозно-бумажного производства лесоперерабатывающей

промышленности (на примере целлюлозно-бумажного комбината) является основной целью данной работы.

«Объектом исследования в данной работе является электрическая часть разрабатываемой системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината» [3].

«Предметом исследования в работе выступает электрическая принципиальная схема электроснабжения объекта исследования, а также её составные части – схема и проводники питающей и распределительной сетей высокого и низкого напряжения, силовые трансформаторы ГПП и цеховых ТП, аппаратура распределительных устройств» [3].

Результатом работы является разработка мероприятий, позволяющим осуществить качественное проектирование системы электроснабжения данного предприятия, с внедрением современных требований на объекте исследования. При решении всех указанных задач, основная цель данной работы будет достигнута.

Работа может быть использована при рассмотрении и решении типичных задач проектирования систем электроснабжения классического типа отечественной лесоперерабатывающей промышленности.

# **1 Характеристика объекта и анализ исходных данных**

## **1.1 Техническая характеристика целлюлозно-бумажного комбината**

В работе осуществляется разработка системы электроснабжения одного из объектов целлюлозно-бумажного производства лесоперерабатывающей промышленности – нового целлюлозно-бумажного комбината.

Ввод в эксплуатацию качественно новых объектов целлюлозно-бумажного производства лесоперерабатывающей промышленности, на которых основной производственный цикл и оборудование были бы современными, технически и экономически выгодными и рентабельными.

Одним из таких предприятий должен стать рассматриваемый в работе целлюлозно-бумажный комбинат, основная задача которого – производство высококачественных изделий из бумаги для строительной, полиграфической, пищевой, лёгкой и военной промышленности.

На основании перечисленных аспектов можно сделать вывод, что современные предприятия целлюлозно-бумажного производства лесоперерабатывающей промышленности страны 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.

В состав современного предприятия целлюлозно-бумажного производства лесоперерабатывающей промышленности также входят производственные и непроизводственные участки, цеха и подразделения.

Технологический процесс и основные подразделения проектируемого целлюлозно-бумажного комбината, схематически представлены в работе на рисунке 1 [20].

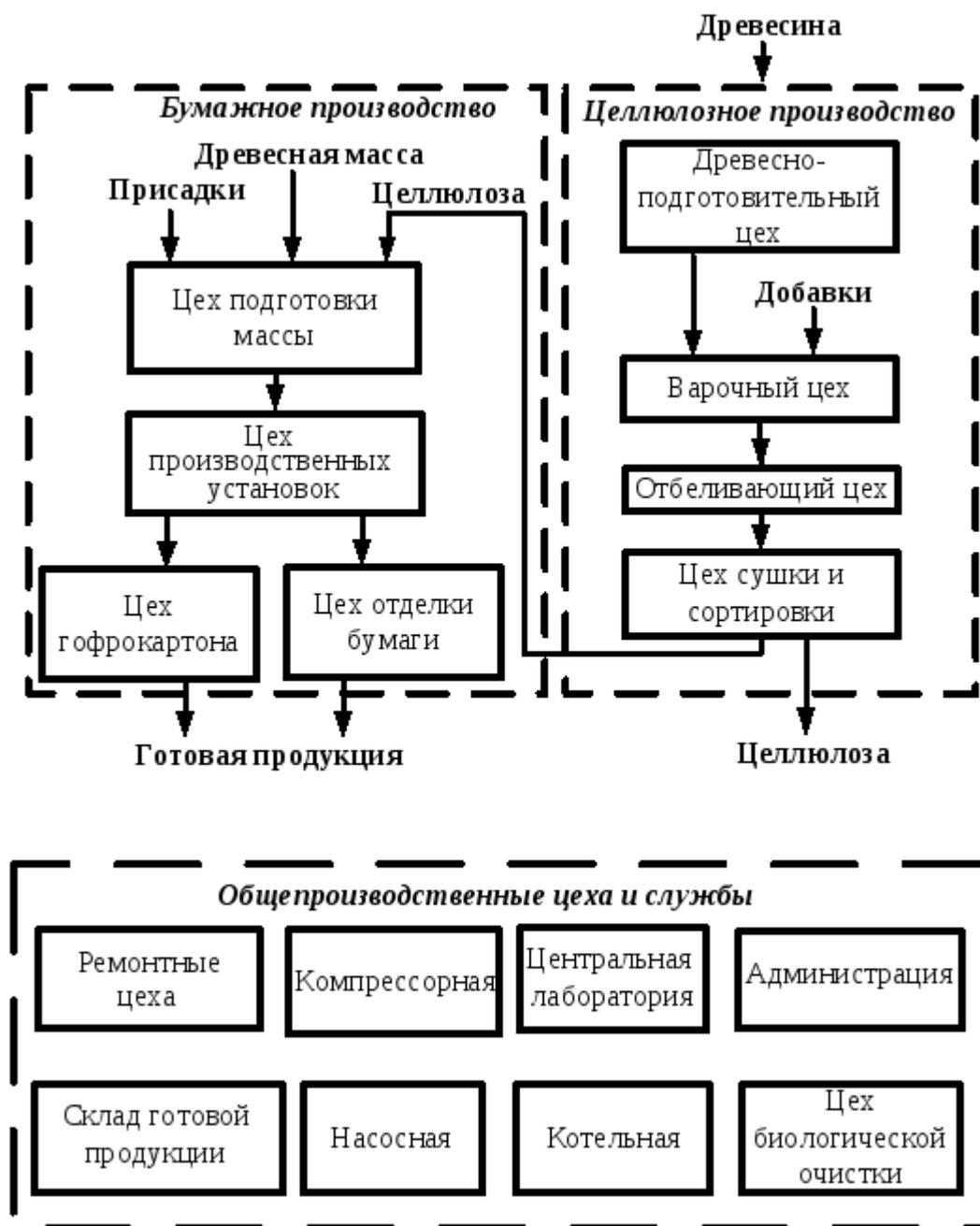


Рисунок 1 – Технологический процесс и основные подразделения проектируемого целлюлозно-бумажного комбината

В состав современного предприятия целлюлозно-бумажного производства лесоперерабатывающей промышленности входят следующие участки, цеха и подразделения (рисунок 1) [20]:

- цех подготовки древесной массы – применяется для подготовки древесной массы нужной консистенции путём её измельчения, прессовки и прокатки;

- цех производственных установок – основной производственный цех, как правило, делится на два отделения: цех горфокартонa и цех отделки бумаги (отделочный цех);
- древесно-подготовительный цех – является основным подготовительным цехом для подготовки целлюлозного производства на комбинате;
- варочный цех – участок, где осуществляется варка и получение первичной целлюлозы;
- отбеливающий цех – цех, в котором производится отбеливание полученной первичной целлюлозы;
- цех сушки и сортировки – предназначен для сушки полученных изделий после процесса варки с последующей их сортировкой;
- вспомогательные цеха и службы: ремонтные цеха, компрессорная, насосная, компрессорная, котельная, складские помещения, цех биологической очистки, лаборатории.

В современной системе классификации цехов и участков, принято выделять производственные и непроизводственные системные элементы в структуре любого производственного цикла.

Их рекомендуется объединять в укрупнённые блоки, таким образом, совершенствуя технологический процесс и снижая производственные потери, а также перерасход и потери электроэнергии в сети предприятия.

Таким образом, исходя из технологического цикла и процесса, а также технических характеристик оборудования и их установленной мощности, на проектируемом целлюлозно-бумажном комбинате предполагается три основных группы подразделений (рисунок 1) [20]:

- бумажное производство;
- целлюлозное производство;
- общепроизводственные цеха и службы.

При этом, на проектируемом целлюлозно-бумажном комбинате, также имеются два высоковольтных электродвигателя компрессорной, которые

нельзя объединить с нагрузкой напряжением ниже 1 кВ любого из основных групп подразделений, поэтому компрессорная с данными высоковольтными двигателями рассматривается как отдельное подразделение.

Кроме того, исходя из важности таких служб, как служба сбыта и служба логистики в современном производстве, их предлагается вынести также в отдельную группу вместе с заводоуправлением (администрацией комбината). Таким образом, все основные важнейшие службы и руководящий персонал будут находиться в одном корпусе, что сделает работу более продуктивной, а производственный цикл – совершеннее [20].

Исходные технические данные основных групп подразделений на проектируемом целлюлозно-бумажном комбинате, с указанием установленной проектной мощности подразделений, представлены в форме таблицы 1. Также в таблице 1 приведена систематизация групп подразделений по категориям надёжности, что имеет важнейшую роль при выборе схемы электроснабжения объекта далее.

Таблица 1 – Исходные технические данные основных групп подразделений на проектируемом целлюлозно-бумажном комбинате

| Номер подразделения, по плану расположения             | Наименование групп подразделений            | Установленная проектная мощность, $P_{уст}$ , кВт | Категории по надёжности электроснабжения |
|--|---|---|--|
| 1  | Бумажное производство                       | 5300  | I, II                                    |
| 2  | Целлюлозное производство                    | 3400  | I, II                                    |
| 3  | Компрессорная                               | 400   | I, II                                    |
|  | (в т.ч. высоковольтные СД 10 кВ)            | 1260  | I  |
| 4  | Общепроизводственные цеха и службы          | 5500  | II, III                                  |
| 5  | Заводоуправление (служба сбыта и логистики) | 500   | II, III                                  |
| Всего по проектируемому целлюлозно-бумажному комбинату |   | 16360   | -  |

Исходный план расположения основных групп подразделений на проектируемом целлюлозно-бумажном комбинате, согласно номеру, присвоенному каждому подразделению (таблица 1), представлен на рисунке 2.

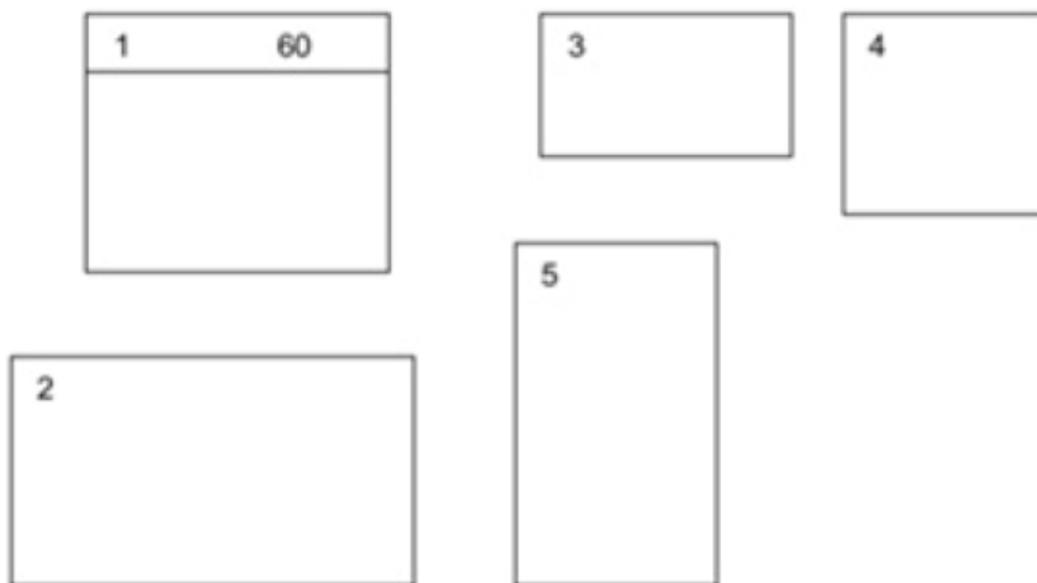


Рисунок 2 – Исходный план расположения основных групп подразделений на проектируемом целлюлозно-бумажном комбинате

Также в работе используются следующие основные исходные данные согласно заданию на проектирование:

- проектируемое предприятие лесохимической промышленности (новый целлюлозно-бумажный комбинат), по категории надёжности районный потребителей, относится ко II категории;
- питание проектируемого целлюлозно-бумажного комбината от энергетической системы предполагается осуществить от узловой районной подстанции с классами напряжения 110/35/6 кВ, на которой находятся два силовых трансформатора ТДТН-40000/110, расстояние до данной питающей ПС составляет 35 км;
- возможны два варианта питания проектируемой системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината: 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.

## 1.2 Основные требования к проектированию систем электроснабжения целлюлозно-бумажных предприятий

Система электроснабжения проектируемого целлюлозно-бумажного комбината, детально рассматриваемого в работе, относится к группе промышленно-технических объектов II категории надёжности [5]. Рассматриваются требования к источникам питания СЭС. Наибольшее распространение в качестве источника питания систем электроснабжения промышленных предприятий в современной энергетике являются понижающие трансформаторные подстанции.

Как правило, питание конечных потребителей 0,4 кВ систем электроснабжения промышленных предприятий осуществляется на номинальном напряжении 0,38/0,22 кВ от понизительных трансформаторных подстанций (ТП) с высшим номинальным напряжением 6 кВ или 10 кВ. Для данной цели в последние годы применяются блочные комплектные подстанции с элегазовой изоляцией. Такие подстанции – самые перспективные с точки зрения модернизации, реконструкции и дальнейшего развития, а также самые надёжные в силу того, что позволяют установить в своих распределительных устройствах современные блоки и модули защиты, минимизируя габариты установки в несколько раз [22].

Очевидно, что системы электроснабжения делятся на внешнюю и внутреннюю части. 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 [24]:

- 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 ЦРП, 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;
- 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.

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 принятых 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;
  - ремонтпригодность 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.

Во внутренней системе электроснабжения промышленных предприятий к применению допускается исключительно изолированная проводка, что связано с безопасностью людей [12].

Внутренние сети передают напряжение 0,38/0,22 кВ с трансформаторных подстанций промышленных предприятий

непосредственно на эти объекты, где далее происходит распределение электроэнергии для питания потребителей в зависимости от схемы электрических соединений, расположения электроприёмников, а также назначения и цикла работы отдельных элементов и всей системы в целом.

В системах электроснабжения ведётся жёсткий контроль за качеством электроэнергии. Поэтому в системах электроснабжения промышленных предприятий на всех номинальных классах напряжения отклонения напряжения, частоты, тока и гармоник должны находиться в допустимых интервалах [3]. Также контроль ведётся за величиной потребляемой реактивной мощности, так как её избыток способен вывести систему из нормального состояния в аварийное. Нормами [3] для систем электроснабжения промышленных предприятий предусмотрена обязательная проверка последних на потребляемую реактивную мощность. В большинстве случаев в системах электроснабжения такая проверка будет выполнена в подавляющем большинстве случаев, однако при наличии большого числа потребителей, имеющих двигательную нагрузку, а также при значительном объёме освещения, выполненного с использованием устаревших люминесцентных ламп стартерного типа, существует вероятность необходимости установки дополнительных устройств компенсации реактивной мощности на объектах. Данный аспект необходимо также проверить в работе.

Кроме того, одним из основных аспектов при разработке схем электрических сетей и режимов работы современных системах электроснабжения промышленных предприятий является непосредственная экономичность спроектированной системы электроснабжения [10]. Известно, что система должна быть по возможности дешёвой и надёжной [10]. Поэтому разрабатываемый проект системы электроснабжения должен быть качественным, надёжным и экономичным, и, самое главное – безопасным [6].

По специфике и составу, системы электроснабжения лесоперерабатывающих предприятий (включая СЭС нового целлюлозно-

бумажного комбината), относятся к системам электроснабжения промышленных предприятий классического типа [8]. Таким образом, к классическим системам электроснабжения применяются следующие основные требования и нормы, обусловленные их природой:

- 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.

Далее в работе, на основе приведённых требований нормативных документов [15], предъявляемых к проектируемым системам электроснабжения промышленных предприятий, а также с учётом исходных технических характеристик оборудования объекта проектирования, приведённых в работе, проводится решение основных поставленных задач.

Выводы по разделу.

«В работе было приведено описание и анализ технологического процесса, а также основных и вспомогательных цехов и участков системы электроснабжения нового целлюлозно-бумажного комбината, с детальным их анализом и систематизацией по принадлежности к категориям надёжности, а также по условиям производственной среды» [2]. Обусловлена актуальность выбора темы, с последующим анализом технических данных нагрузки потребителей.

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

Показано, что разработка качественного проекта системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, с внедрением основных групп мероприятий, будет способствовать значительному повышению параметров надёжности, бесперебойности, электробезопасности и экономичности на объекте исследования.

## 2 Проектирование системы электроснабжения целлюлозно-бумажного производства

### 2.1 Выбор номинальных напряжений и схемы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината

Далее в работе проводится выбор рациональных номинальных напряжений схемы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината.

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

«Для определения рационального значения номинального напряжения в системе внешнего напряжения, в схеме электроснабжения проектируемого целлюлозно-бумажного комбината, используется формула Стилла» [15]:

$$U_{рац} = 4,34\sqrt{L + 0,016P}, \quad (1)$$

«где  $L$  – длина питающей линии, км;

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

«По условию (1) для ГПП внешней СЭС проектируемого целлюлозно-бумажного комбината» [1]:

$$U_{рац} = 4,34\sqrt{35 + 0,016 \cdot 16,36} = 25,77 \text{ кВ}.$$

Таким образом, исходя из номинальных напряжений, применяемых в электрической сети Российской Федерации, принимается ближайшее большее стандартное значение номинального напряжения внешней системы электроснабжения проектируемого целлюлозно-бумажного комбината, равного значению 35 кВ [3].

При выборе напряжения внутренней системы и схемы электроснабжения проектируемого целлюлозно-бумажного комбината,

исходя из той же шкалы номинальных напряжений, и учитывая рекомендации [7], принимается номинальное напряжение 10 кВ, которое эффективнее напряжения 6 кВ.

В результате проведения технического анализа, расчётным путём было установлено, что для проектируемой системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, 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 целлюлозно-бумажного комбината, является двухтрансформаторная ГПП, получающая питание от РУ-35 кВ районной ПС-110/35/10 кВ двумя линиями электропередачи на напряжении 35 кВ.

На основании полученных результатов, с учётом анализа нормативных документов и типичных схемных решений, в работе принимаются следующие схемы в проектируемой системе электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината [4,20]:

- для применения в РУ-35 кВ питающей ГПП, принимается наиболее рациональная схема «Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий». Достоинством данной схемы является простота и надёжность;
- 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 отключён, режим работы – раздельный;
- для применения в распределительной сети 10 кВ, принимается наиболее рациональная схема «Радиальная схема с резервированием на секции шин источника питания (РУ-10 кВ ГПП)». Такая схема наиболее проста в исполнении и обладает наиболее высокой

надёжностью, простотой монтажа, отстройки уставок РЗА и подходит для питания ответственных потребителей;

- для применения на однострансформаторных ЦТП, питающих потребители III категории надёжности, принимается «Радиальная схема без резервирования на секции шин РУ-10 кВ», а для применения на двухтрансформаторных ЦТП, питающих потребители I и II категории надёжности, принимается «Радиальная схема с резервированием на секции шин РУ-10 кВ и РУ-0,4 кВ». Применение таких схем обеспечит питание всех потребителей на напряжении 10/0,4 кВ, соответственно категории надёжности, с учётом степени резервирования в схеме.

Все выбранные схемы электрических соединений проектируемой системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината отвечают требованиям нормативных документов и принимаются к использованию на объекте проектирования.

Общая схема электроснабжения объекта проектирования, составленная с учётом выбранных схем отдельных её составляющих, показана в работе на графическом листе 2.

## **2.2 Расчёт электрических нагрузок**

Далее в работе, для достижения поставленной цели, необходимо провести расчёт электрических нагрузок потребителей системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, 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.

Расчёт проводится 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 целлюлозно-бумажного комбината 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 группы подразделений проектируемого целлюлозно-бумажного комбината, кВт» [8];

$K_c$  – «справочное значение коэффициента спроса группы подразделений проектируемого целлюлозно-бумажного комбината» [8].

«Расчетная реактивная нагрузка силовых электроприёмников группы подразделений проектируемого целлюлозно-бумажного комбината, квар» [6]:

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg}\varphi, \quad (3)$$

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

«Расчётная нагрузка осветительных приёмников группы подразделений проектируемого целлюлозно-бумажного комбината, кВт» [1]:

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

«где  $K_{c.o}$  – справочный коэффициент спроса приемников освещения группы подразделений проектируемого целлюлозно-бумажного

комбината» [4];

« $P_{н.о}$  – суммарная номинальная мощность приемников освещения группы подразделений проектируемого целлюлозно-бумажного комбината, кВт» [1].

При этом [1]:

$$P_{н.о} = P_{уд.о} F, \quad (5)$$

где  $P_{уд.о}$  – «нормируемая удельная мощность освещения группы подразделений проектируемого

целлюлозно-бумажного комбината, кВт/м<sup>2</sup>» [4];

$F$  – «площадь группы подразделений проектируемого

целлюлозно-бумажного комбината согласно генплану, м<sup>2</sup>» [1].

Полная нагрузка силовых и осветительных приёмников группы подразделений проектируемого целлюлозно-бумажного комбината [1]:

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

Полная расчётная силовая нагрузка силовых и осветительных приёмников группы подразделений проектируемого целлюлозно-бумажного комбината [13]:

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

Предварительные потери активной и реактивной мощности в цеховых трансформаторах ЦТП системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината [16]:

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

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

Потери активной мощности в трансформаторах ГПП системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината [16]:

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

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

Проводится расчёт нагрузки осветительных и силовых электроприёмников и потребителей группы подразделений «Бумажное производство» проектируемого целлюлозно-бумажного комбината по условиям (1) – (7):

$$P_p = 0,35 \cdot 5300 = 1855 \text{ кВт}.$$

$$Q_p = 1855 \cdot 1,33 = 2467,2 \text{ квар}.$$

$$S_p = \sqrt{1855^2 + 2467,2^2} = 3086,8 \text{ кВА}.$$

$$I_p = \frac{3086,8}{\sqrt{3} \cdot 10} = 169,7 \text{ А}.$$

$$P_{н.о} = 300 \cdot 15 \cdot 1,05 \cdot 10^{-3} = 44,89 \text{ кВт}.$$

$$Q_{н.о} = 44,89 \cdot 0,43 = 19,35 \text{ квар}.$$

Для всех остальных электроприёмников групп подразделений расчёты электрической нагрузки проведены аналогично.

Полученные в работе «результаты расчёта электрических нагрузок производственного освещения потребителей и электроприёмников групп подразделений системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината сведены в таблицу 2» [1].

Таблица 2 – Результаты расчёта электрических нагрузок производственного освещения потребителей и электроприёмников групп подразделений системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината

| Наименование групп подразделений           | А, м | В, м | $F_{ц}$ , м <sup>2</sup> | $P_{уд.о.}$ , Вт/м <sup>2</sup> | $P_{ном.о.}$ , кВт | тип лампы | $K_{пр.а}$ | $tg\varphi_o$ | $P_{р.о.}$ , кВт | $Q_{р.о.}$ , квар |
|--|------|------|--------------------------|---------------------------------|--------------------|-----------|------------|---------------|------------------|-------------------|
| Бумажное производство                      | 50   | 60   | 3000                     | 15                              | 45                 | LED       | 1,05       | 0,43          | 44,89            | 19,35             |
| Целлюлозное производство                   | 45   | 80   | 3600                     | 15                              | 54                 | LED       | 1,05       | 0,43          | 53,87            | 23,22             |
| Компрессорная                              | 30   | 50   | 1500                     | 15                              | 22,5               | LED       | 1,05       | 0,43          | 22,44            | 9,675             |
| Общепроизводственные цеха и службы         | 40   | 40   | 1600                     | 15                              | 24                 | LED       | 1,05       | 0,43          | 23,94            | 10,32             |
| Заводуправление (служба сбыта и логистики) | 70   | 40   | 2800                     | 12                              | 33,6               | LED       | 1,05       | 0,43          | 33,52            | 14,45             |
| Наружное освещение                         | 250  | 150  | 37500                    | 4                               | 150                | LED       | 1,05       | 0,43          | 149,63           | 64,5              |
| Всего освещения                            | -    | -    | 50000                    | -                               | 329,1              | -         | -          | -             | 328,28           | 141,51            |

Полученные в работе результаты расчёта электрических нагрузок силовой сети потребителей и электроприёмников групп подразделений системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината сведены в таблицу 3. Расчёт силовой нагрузки системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината проводится с учётом высоковольтных двигателей компрессорной.

Таблица 3 – Результаты расчёта электрических нагрузок силовой сети потребителей и электроприёмников групп подразделений системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината

| Наименование групп подразделений           | $\sum P_{уст.}$ , кВт | $K_c$ | $\cos\varphi$ | $tg\varphi$ | $P_p$ , кВт | $Q_p$ , квар | $S_p$ , кВА | $I_p$ , А |
|--|-----------------------|-------|---------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-----------|
| Бумажное производство                      | 5300                  | 0,35  | 0,6           | 1,33        | 1855        | 2467,2       | 3086,8      | 169,7     |
| Целлюлозное производство                   | 3400                  | 0,4   | 0,65          | 1,17        | 1360        | 1591,2       | 2093,2      | 115,1     |
| Компрессорная                              | 400                   | 0,3   | 0,7           | 1,02        | 120         | 122,4        | 171,4       | 9,4       |
| Общепроизводственные цеха и службы         | 1260                  | 0,7   | 0,9           | 0,48        | 882         | 423,36       | 978,3       | 53,8      |
| Заводуправление (служба сбыта и логистики) | 5500                  | 0,65  | 0,65          | 1,17        | 3575        | 4182,8       | 5502,4      | 302,5     |
| Наружное освещение                         | 500                   | 0,8   | 0,8           | 0,75        | 400         | 300          | 500         | 27,5      |
| Всего силовой нагрузки                     | -                     | -     | -             | -           | 8192        | 9086,9       | 12234       | 672,6     |

Полученные в работе «результаты расчёта суммарных электрических нагрузок (с учётом осветительной и силовой нагрузок потребителей и электроприёмников групп подразделений системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината), сведены в таблицу 4» [4].

Таблица 4 – Результаты расчёта суммарных электрических нагрузок сети потребителей и электроприёмников групп подразделений системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината

| Наименование групп подразделений            | $P_p$ , кВт | $Q_p$ , квар | $S_p$ , кВА | $\Delta P_t$ , кВт | $\Delta Q_t$ , квар |
|---|-------------|--------------|-------------|--------------------|---------------------|
| Бумажное производство                       | 1899,89     | 2486,6       | 3129,3      | 62,59              | 312,93              |
| Целлюлозное производство                    | 1413,87     | 1614,4       | 2146        | 42,92              | 214,6               |
| Компрессорная                               | 142,44      | 132,08       | 194,3       | 3,89               | 19,43               |
| (высоковольтные двигатели 10 кВ)            | 882,00      | 423,36       | 978,3       | 19,57              | 97,83               |
| Общепроизводственные цеха и службы          | 3598,94     | 4193,1       | 5525,8      | 110,52             | 552,58              |
| Заводоуправление (служба сбыта и логистики) | 433,52      | 314,45       | 535,6       | 10,71              | 53,56               |
| Наружное освещение территории               | 149,63      | 64,5         | 162,9       | 3,26               | 16,29               |
| Итого на стороне 10 кВ, без учёта КРМ       | 8520,29     | 9228,5       | 12672,2     | 253,44             | 1267,22             |
| Потери на ГПП с учётом КРМ                  | 8520,29     | 6728,5       | 10856,7     | 217,13             | 1085,67             |
| Итого на стороне ВН                         | 8737,42     | 7814,1       | 11721,8     | -                  | -                   |

На основе полученных расчётных значений электрических нагрузок, далее в работе проводятся мероприятия по выбору основного оборудования в проектируемой системе электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината.

### 2.3 Выбор и проверка мощности силовых трансформаторов ГПП

Как было указано ранее, на главной понизительной подстанции ГПП-35/10 кВ системе электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, 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 системе

электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, проводится расчётная проверка мощности новых трансформаторов на ГПП предприятия.

Расчётная «мощность силового трансформатора для установки на подстанции определяется по известной формуле» [12]:

$$S_{\text{ном.т.р.}} = 0,7 \cdot S_{\text{max.ПС}}, \text{MBA}, \quad (12)$$

где  $S_{\text{max.ПС}}$  – максимальное значение полной расчетной нагрузки трансформаторной подстанции ГПП-35/10 кВ системе электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината (таблица 4).

По условию (12) для силовых трансформаторов, установленных на ГПП-35/10 кВ системе электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината:

$$S_{\text{ном.т.}} = 0,7 \cdot 11721,8 = 8205,26 \text{ кВА}.$$

При выборе проводится сравнение номинальной мощности выбранного силового трансформатора и полученного значения расчётной мощности трансформатора ГПП-35/10 кВ системе электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината:

$$S_{\text{ном.т.}} \geq S_{\text{ном.т.р.}}, \text{MBA}, \quad (13)$$

Таким образом, предварительные условия проверки силовых трансформаторов, установленных на ГПП-35/10 кВ системе электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, по условию (13) выполняются:

$$S_{\text{ном.т.}} = 10000 \text{ кВА} \geq S_{\text{ном.т.р.}} = 8205,26 \text{ кВА}.$$

Значит, исходя из результатов предварительной проверки, «для установки на ГПП-35/10 кВ системе электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, принимаются силовые трансформаторы марки ТМН-10000/35.

Далее в работе проводится проверка силовых трансформаторов на перегрузочную способность как в нормальном, так и в максимальном (послеаварийном) режиме работы.

Для проверки трансформаторов марки ТМН-10000/35, установленных на подстанции ГПП-35/10 кВ системе электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината на загрузочную способность, в работе используется типичный упрощенный суточный трёхступенчатый график нагрузок активной нагрузки потребителей целлюлозно-бумажной промышленности, представленный на рисунке 3» [9].

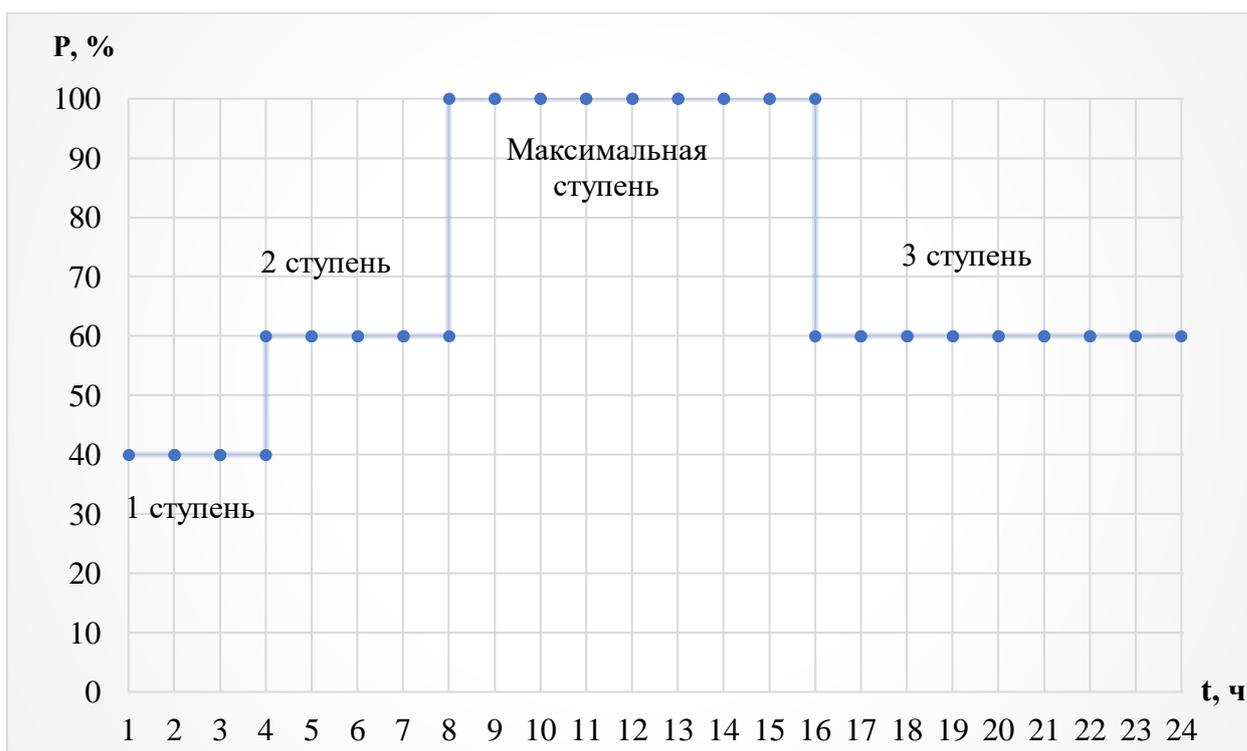


Рисунок 3 – Типичный упрощенный суточный график нагрузок потребителей целлюлозно-бумажной промышленности, исходя из условий технологического процесса

Как известно, на суточных графиках нагрузки есть участки, соответствующие допустимым нагрузкам и перегрузкам.

Условия проверки силовых трансформаторов ГПП-35/10 кВ системе электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината на перегрузочную способность, согласно суточному графику нагрузок [12]:

$$K_2 \leq K_{2\text{доп}}, \quad (14)$$

где  $K_2$  – расчетный коэффициент аварийной перегрузки суточного графика нагрузки трансформатора ГПП-35/10 кВ системе электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината;

$K_{2\text{доп}}$  – коэффициент допустимой аварийной перегрузки суточного графика нагрузки трансформатора ГПП-35/10 кВ системе электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината.

В конечном итоге, с учётом допустимых коэффициентов и мощности (расчётной и номинальной) трансформаторов, установленных на ГПП-35/10 кВ системе электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината:

$$S_{\text{max}} \leq S_{\text{ном.Т}} \cdot K_{2\text{доп}}. \quad (15)$$

Исходный суточный график нагрузки силовых трансформаторов ГПП-35/10 кВ системе электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината задан для значений активной нагрузки (рисунок 5).

«Исходя из фактического значения максимальных значений активной мощности, с использованием коэффициента активной мощности на шинах ГПП-35/10 кВ системе электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината (с учётом компенсации реактивной мощности), рассчитывается значение максимального значения полной мощности типичного суточного графика,

которая соответствует максимальной ступени типичного суточного графика нагрузки» [15]:

$$S_{\max} = \frac{P_{\max}}{\cos \varphi}, \text{ MVA.} \quad (16)$$

Принимается условное равенство нагрузки на ГПП-35/10 кВ. Исходя из этого допущения, на один силовой трансформатор ГПП приходится половина суммарной расчётной нагрузки всей системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината:

$$P_{\max} = \frac{P_{\text{ПС}}}{n}, \text{ MВт,} \quad (17)$$

где  $n$  – количество рабочих силовых трансформаторов на ГПП-35/10 кВ системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината.

«Таким образом, на один силовой трансформатор ГПП-35/10 кВ системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината приходится» [12]:

$$P_{\max} = \frac{8,737}{2} = 4,37 \text{ MВт.}$$

Для трансформатора ГПП-35/10 кВ системе электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, максимальное значение полной мощности по типичному суточному графику нагрузки по (17):

$$S_{\max} = \frac{4,37}{0,867} = 5,04 \text{ MVA.}$$

Для всех остальных ступеней суточного графика нагрузки силового трансформатора ГПП-35/10 кВ в системе электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, используется следующая пропорция по (14):

$$5,04 \text{ МВА} = 100 \% .$$
$$S_{1cm} = 30 \% .$$

Исходя из соотношения пропорции, определяется пропорциональная нагрузка ступеней типичного суточного графика нагрузок ГПП-35/10 кВ системе электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината.

Для первой ступени суточного графика нагрузки силового трансформатора ГПП-35/10 кВ системе электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината по (17):

$$S_{1cm.} = \frac{5,04 \cdot 30}{100} \approx 1,51 \text{ МВА}.$$

Для второй и третьей ступеней нагрузки силового трансформатора ГПП-35/10 кВ системе электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината по (17):

$$S_{2,3cm.} = \frac{5,04 \cdot 60}{100} \approx 3,02 \text{ МВА}.$$

Осуществляется преобразование типичного суточного графика нагрузки силового трансформатора ГПП-35/10 кВ системе электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, в эквивалентный график нагрузки.

Для этой цели определяются коэффициенты нормальной нагрузки и допустимой перегрузки силового трансформатора, установленного на ГПП-35/10 кВ.

Значение коэффициента начальной нагрузки  $K_1$  эквивалентного графика нагрузки силового трансформатора ГПП-35/10 кВ системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, определяется так:

$$K_1 = \frac{1}{S_{ном}} \sqrt{\frac{S_1^2 \Delta t_1 + S_2^2 \Delta t_2 + \dots + S_m^2 \Delta t_m}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_m}}, o.e. \quad (18)$$

По условию (18) для силового трансформатора ГПП-35/10 кВ системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината:

$$K_1 = \frac{1}{10} \sqrt{\frac{1,51^2 \cdot 4 + 3,02^2 \cdot 4 + 3,02^2 \cdot 8}{16}} \approx 0,27.$$

Значение расчётного коэффициента допустимой аварийной перегрузки  $K'_2$  эквивалентного графика нагрузки силового трансформатора ГПП-35/10 кВ в системе электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината определяется, исходя из условия:

$$K'_2 = \frac{1}{S_{ном}} \sqrt{\frac{(S'_1)^2 \Delta h_1 + (S'_2)^2 \Delta h_2 + \dots + (S'_p)^2 \Delta h_p}{\Delta h_1 + \Delta h_2 + \dots + \Delta h_p}}, o.e. \quad (19)$$

По условию (19) для силового трансформатора ГПП-35/10 кВ в системе электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината:

$$K'_2 = \frac{1}{10} \sqrt{\frac{5,04^2 \cdot 8}{8}} \approx 0,5.$$

Все полученные числовые значения эквивалентного графика нагрузки силового трансформатора ГПП-35/10 кВ в системе электроснабжения

целлюлозно-бумажного комбината, включая значения расчётных коэффициентов нормальной нагрузки  $K_1$  и допустимой перегрузки  $K_2$ , показаны на рисунке 4.

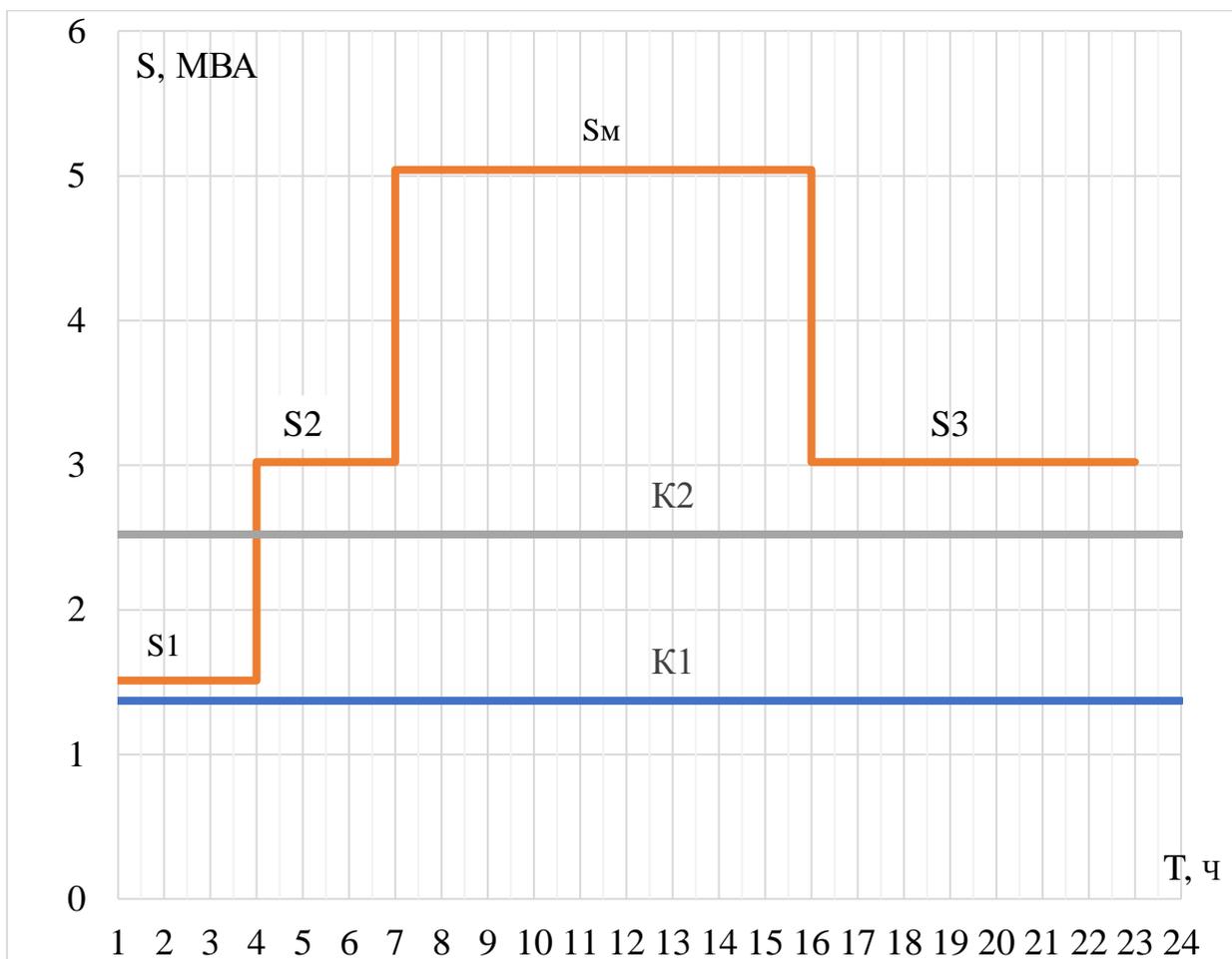


Рисунок 4 – Значения эквивалентного графика нагрузки силового трансформатора ГПП-35/10 кВ в системе электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината

Для допустимых аварийных перегрузок силового трансформатора при системе охлаждения типа Д,  $\theta_{охл} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $K_1 = 0,27$ ,  $h = 8\text{ ч}$  [12] определяется  $K_{2\text{дон}} \approx 1,25$ , что превышает значение расчётного коэффициента фактической перегрузки силового трансформатора  $K_2 = 0,5$ .

Условие проверки соблюдается.

Проверка условия (15) для силовых трансформаторов подстанции ГПП-35/10 кВ в системе электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината:

$$S_{\max} = 11,721 \text{ MVA} \leq 10 \cdot 1,25 = 12,5 \text{ MVA}.$$

Условие проверки соблюдается.

Следовательно, оба однотипных силовых трансформатора марки ТМН-10000/35, рекомендуемые к установке на ГПП-35/10 кВ в системе электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, удовлетворяют условиям всех требуемых проверок, согласно данным суточного графика нагрузки подстанции. Таким образом, они окончательно принимаются к установке на главной понизительной подстанции объекта проектирования.

#### **2.4 Выбор и проверка трансформаторов цеховых подстанций с учётом компенсации реактивной нагрузки**

«Далее в работе необходимо провести выбор и проверку силовых трансформаторов цеховых трансформаторных подстанций внутренней СЭС целлюлозно-бумажного комбината.

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]:

$$S_{\text{ном.т}} \geq S_{\text{ном.т.р}} = \frac{\sum P_p}{N\beta_T}, \quad (20)$$

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

$\sum P_p$  – активная нагрузка объектов, питающихся от ЦТП, кВт;

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

«Расчёт и выбор мощности силовых трансформаторов на цеховых ТП в работе проводится на примере ТП-1 внутренней СЭС целлюлозно-бумажного комбината по условию (20):

$$S_{\text{ном.т}} \geq S_{\text{ном.т.р}} = \frac{1899,89 + 1413,87}{2 \cdot 0,8} = 2071,1 \text{ кВА.}$$

Для установки на цеховой ТП-1 внутренней СЭС целлюлозно-бумажного комбината предварительно приняты два силовых трансформатора марки ТМ-2500/10» [12].

При выборе силовых трансформаторов ЦТП-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:

$$Q_{\text{max},m} = \sqrt{(N_{\text{отт}} \beta_{\text{норм},m} S_{\text{ном}})^2 - P_{\text{см}}^2}. \quad (21)$$

Для трансформаторов, предварительно выбранных для установки на ЦТП-1:

$$Q_{\text{max},m} = \sqrt{(2 \cdot 0,8 \cdot 2500)^2 - 3313,76^2} = 2240,3 \text{ квар.}$$

На всех ЦТП-10/0,4 кВ проектируемой системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, устанавливаются компенсирующие батареи конденсаторов с напряжением 0,4 кВ. Их реактивная мощность определяется так:

$$Q_{\text{НБК}} = Q_p - Q_{\text{max},m}. \quad (22)$$

Величина реактивной мощности батарей конденсаторов для установки на ЦТП-1:

$$Q_{НБК} = 4101 - 2240,3 = 1860,7 \text{ квар.}$$

Исходя из результатов расчёта, для установки на ЦТП-1 принимаются две конденсаторные установки напряжением 0,4 кВ марки УКРМ-0,4-800-УХЛ1. Таким образом, суммарная величина скомпенсированной реактивной составляющей нагрузки на шинах 0,4 кВ ЦТП-1, составит 1600 квар.

Реактивная нагрузка ЦТП-1, определяемая с учётом выбранных компенсирующих батарей конденсаторов 0,4 кВ:

$$Q_{mn} = Q_p - Q_{НБК.см} \quad (23)$$

Реактивная нагрузка ЦТП-1 в числовом значении:

$$Q_{mn} = 4104 - 1600 = 2504 \text{ квар.}$$

На других ЦТП внутренней СЭС целлюлозно-бумажного комбината выбор силовых трансформаторов аналогичен (таблица 5).

Таблица 5 – Выбор трансформаторов внутренней СЭС целлюлозно-бумажного комбината, с учётом компенсации реактивной составляющей нагрузки

| Номер ЦТП | Наименование групп подразделений            | $P_p$ , кВт | $Q_p$ , квар | $S_p$ , кВ·А | $n \times S_{ном.т}$ , кВ·А | $Q_{НБК.см}$ , квар | $S_{mn}$ , кВ·А |
|-----------|---|-------------|--------------|--------------|-----------------------------|---------------------|-----------------|
| ЦТП-1     | Бумажное производство                       | 1899,89     | 2486,6       | 3129,3       | 2×2500                      | 2×800               | 4153,4          |
|           | Целлюлозное производство                    | 1413,87     | 1614,4       | 2146         |                             |                     |                 |
| ЦТП-2     | Компрессорная                               | 142,44      | 132,08       | 194,3        | 2×1000                      | 2×100               | 1604,5          |
|           | (в т.ч. СТД 10 кВ)                          | 882         | 423,36       | 978,3        |                             |                     |                 |
|           | Заводоуправление (служба сбыта и логистики) | 433,52      | 314,45       | 535,6        |                             |                     |                 |
| ЦТП-3     | Общепроизводственные цеха и службы          | 3598,94     | 4193,1       | 5525,8       | 2×2500                      | 2×1200              | 4020,9          |

Установлено и показано в таблице 9, что выбранные силовые трансформаторы цеховых ТП-10/0,4 кВ внутренней СЭС целлюлозно-

бумажного комбината удовлетворяют требованиям и условиям выбора и проверок. Следовательно, они могут быть приняты к установке в проектируемой системе электроснабжения данного объекта.

## 2.5 Расчёт и построение картограммы электрических нагрузок

«Известно, что картограмма электрических нагрузок в общем случае представляет собой размещенные на генплане окружности, площади которых в выбранном масштабе равны расчетным мощностям групп подразделений СЭС целлюлозно-бумажного комбината, кВт» [6]:

$$P_{p,i} = \pi R_i^2 m. \quad (24)$$

«Из данного выражения определяется искомое значение радиуса окружности в принятом масштабе» [6]:

$$R_i = \sqrt{\frac{P_{p,i}}{\pi m}}, \quad (25)$$

где « $P_{p,i}$  – расчетная активная мощность  $i$ -й группы подразделений, кВт;  
 $m$  – масштаб мощности, принимается исходя из удобства геометрического построения, принимается в работе  $m = 1$  кВт/мм<sup>2</sup>» [15].

«Угол заштрихованного сектора, соответствующего площади, равной расчётной мощности осветительной нагрузки» [16]:

$$\varphi = 360 \frac{P_{p,o}}{P_p} \quad (26)$$

«Результаты расчета координат ЦЭН групп подразделений и всей СЭС целлюлозно-бумажного комбината в работе оформляются в форме таблицы б» [16].

Таблица 6 – Результаты расчёта основных данных и результатов картограммы нагрузок

| Наименование групп подразделений               | $P_{p.o}$ , кВт | $P_p$ , кВт | $X$ , м | $Y$ , м | $R$ , м | $\varphi^\circ$ |
|--|-----------------|-------------|---------|---------|---------|-----------------|
| Бумажное производство                          | 44,89           | 1899,89     | 50      | 100     | 24,60   | 8,51            |
| Целлюлозное производство                       | 53,87           | 1413,87     | 40      | 30      | 21,22   | 13,72           |
| Компрессорная (включая высоковольтные Д-10 кВ) | 22,44           | 1024,44     | 150     | 120     | 18,06   | 7,89            |
| Общепроизводственные цеха и службы             | 23,94           | 3598,94     | 220     | 100     | 33,85   | 2,39            |
| Заводоуправление (служба сбыта и логистики)    | 33,52           | 433,52      | 140     | 50      | 11,75   | 27,84           |
| Итого  | 178,66          | 8370,66     | -       | -       | -       | -               |

«Координаты центра электрических нагрузок (ЦЭН)» [16]:

$$X_0 = \frac{\sum P_{p,i} X_i}{\sum P_{p,i}}, \quad (27)$$

$$Y_0 = \frac{\sum P_{p,i} Y_i}{\sum P_{p,i}}, \quad (28)$$

«где  $X_i, Y_i$  – координаты центров нагрузок отдельных групп, м» [16].

Таким образом, координаты ЦЭН СЭС целлюлозно-бумажного комбината в числовом виде:

$$X_0 = \frac{1157674,9}{8370,66} = 138,3 \text{ м.}$$

$$Y_0 = \frac{736907,9}{8370,66} = 88 \text{ м.}$$

Картограмма нагрузок приведена в работе на графическом листе 1.

## 2.6 Выбор и проверка проводников системы электроснабжения

Все проводники в системе внешнего электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината – класса напряжения выше 1 кВ. Поэтому методика выбора для них будет одинаковая.

Известно, что «выбор сечений проводников напряжением выше 1 кВ (питающей воздушной линии напряжением 35 кВ и распределительных кабельных линий 10 кВ)» [5] СЭС целлюлозно-бумажного комбината, 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:

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

где  $S_p$  – расчётная полная нагрузка линии, кВА» [9].

«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 целлюлозно-бумажного комбината, необходимо провести их проверку на работоспособность в нормальном и послеаварийном режимах работы.

«Проверка проводников воздушных и кабельных линий СЭС целлюлозно-бумажного комбината 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 целлюлозно-бумажного комбината 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 целлюлозно-бумажного комбината.

Питание ГПП-35/10 кВ СЭС целлюлозно-бумажного комбината от источника питания, осуществляется двухцепной воздушной линией электропередачи с применением провода марки АС.

В работе, для большей надежности функционирования воздушных линий, для установки на новой питающей ВЛ-35 кВ, выбирается провод марки АСК [7].

Ток нормального режима для питающей ВЛ-35 кВ ГПП-35/10 кВ СЭС целлюлозно-бумажного комбината, с учётом того, что на каждую цепь двухцепной линии приходится половина нагрузки:

$$I_p = \frac{11721,8}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 35} \approx 96,7 \text{ А.}$$

Ток послеаварийного режима для питающей ВЛ-35 кВ ГПП-35/10 кВ СЭС целлюлозно-бумажного комбината (по одной цепи линии проходит вся нагрузка ГПП):

$$I_{p.\max} = \frac{11721,8}{\sqrt{3} \cdot 35} = 193,4 \text{ А.}$$

Расчётное сечение питающей ВЛ-35 кВ ГПП-35/10 кВ СЭС целлюлозно-бумажного комбината по условию экономической плотности тока:

$$S_s = \frac{96,7}{1,1} = 87,9 \text{ мм}^2.$$

Из ряда стандартных наименьших значений сечения новых проводов марки АСК, выбирается ближайшее стандартное сечение – 95 мм<sup>2</sup>.

Согласно дальнейшей перспективе по развитию системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, выбирается для питающих ВЛ-35 кВ провод марки АСК-95/16 с сечением токоведущей жилы 95 мм<sup>2</sup> и допустимой токовой нагрузкой  $I_{дон} = 330 \text{ А}$ .

Проверка предварительно выбранного провода марки АСК-95/16 для воздушной линии 35 кВ по току нормального режима:

$$330 A \geq 96,7 A.$$

Условия проверки выполняются.

Проверка предварительно выбранного провода марки АСК-95/16 для воздушной линии 35 кВ по максимальному рабочему току ПАВ режима:

$$330 A \geq 193,4 A.$$

Условие проверки выполняется.

«Проверка провода марки АСК-95/16 ВЛ-35 кВ по условию механической прочности выполняется» [6]:

$$95 \text{ мм}^2 \geq 70 \text{ мм}^2.$$

Окончательно для применения на питающей ВЛ-35 кВ, в работе выбран современный провод марки АСК-95/16 с сечением токоведущей жилы – 95 мм<sup>2</sup> и допустимой токовой нагрузкой  $I_{дон} = 330 \text{ А}$  (таблица 7).

Таблица 7 – Результаты выбора кабельных линий 10 кВ и 0,38/0,22 кВ системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината

| Линия                            | Кол-во линий, шт. | $S_p$ , кВА | $I_{p.n}$ , А | $I_{p.av}$ , А | Площадь сечения, мм <sup>2</sup> |            |                       |
|----------------------------------|-------------------|-------------|---------------|----------------|----------------------------------|------------|-----------------------|
|                                  |                   |             |               |                | по $J_{эк}$                      | по нагреву | выбрано               |
| $U_{ном} = 10 \text{ кВ}$        |                   |             |               |                |                                  |            |                       |
| ГПП-ТП1                          | 2                 | 4153,4      | 114,2         | 228,4          | 81,6                             | 95         | АСБ (3×95)            |
| ГПП-ТП2                          | 2                 | 1604,5      | 44,1          | 88,2           | 31,5                             | 35         | АСБ (3×35)            |
| ГПП-ТП3                          | 2                 | 4020,9      | 110,5         | 221            | 78,9                             | 95         | АСБ (3×95)            |
| ГПП-СТД                          | 2                 | 978,3       | 26,9          | 53,8           | 19,2                             | 25         | АСБ (3×25)            |
| $U_{ном} = 0,38/0,22 \text{ кВ}$ |                   |             |               |                |                                  |            |                       |
| ТП1-РП1                          | 2                 | 3129,3      | 2258,4        | 3161,8         | -                                | 7×185      | 7×АВВГ<br>3×185+1×95  |
| ТП1-РП2                          | 2                 | 2146        | 1548,7        | 2168,2         | -                                | 5×185      | 5×АВВГ<br>3×185+1×95  |
| ТП2-РП3                          | 2                 | 194,3       | 140,2         | 196,3          | -                                | 70         | АВВГ<br>3×70+1×35     |
| ТП2-РП5                          | 1                 | 535,6       | 386,5         | 541,1          | -                                | 2×95       | 2×АВВГ<br>3×95+1×50   |
| ТП3-РП4                          | 2                 | 5525,8      | 3987,9        | 5583,1         | -                                | 12×185     | 12×АВВГ<br>3×185+1×95 |

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

В работе применяется для ОРУ-35 кВ гибкая ошиновка, для закрытого типа РУ-10 кВ – жёсткая ошиновка.

Результаты выбора и проверки ошиновки для установки в соответствующих РУ ГПП целлюлозно-бумажного комбината представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты выбора и проверки ошиновки для применения в ОРУ-35 кВ и РУ-10 кВ ГПП СЭС целлюлозно-бумажного комбината

| Наименование РУ ГПП | Тип/марка ошиновки | Длительный режим            |                                    | Проверка по режиму КЗ                   |
|---------------------|--------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|
|                     |                    | $I_n \geq I_{p,max}$ ,<br>А | Сечение $q_n$ ,<br>мм <sup>2</sup> | $q_n \geq q_{min}$ ,<br>мм <sup>2</sup> |
| ОРУ – 35кВ          | Гибкая/АСК – 95/16 | 330 > 172,4                 | 300                                | 300 > 53                                |
| РУ – 10кВ           | Жёсткая/А80×10     | 1480 > 809,2                | 800                                | 800 > 226                               |

Все выбранные проводники 35 кВ и 10 кВ для применения в СЭС целлюлозно-бумажного комбината, удовлетворяют условиям выбора и нормативных требуемых проверок [18].

## 2.7 Расчёт токов короткого замыкания

В работе проводится расчёт значения максимального тока трёхфазного короткого замыкания на сборных шинах ГПП-35/10 кВ проектируемой внешней системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, 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 целлюлозно-бумажного

комбината проверяются уставки релейной защиты на надёжность срабатывания.

Для расчета токов КЗ на шинах проектируемой внешней системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, составляется схема замещения (рисунок 5) [14].

В исходной схеме представлены все три класса напряжения: 35 кВ, 10 кВ и 0,4 кВ. Они преобразуются с помощью трансформаторов, показанных на схеме: Т1 – трансформатор ГПП-35/10 кВ, Т2 – трансформатор ЦТП-10/0,4 кВ.

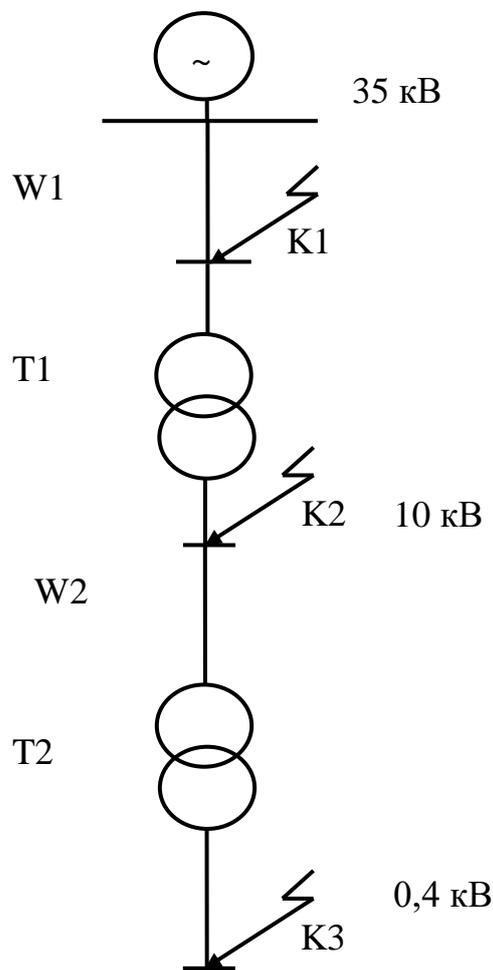


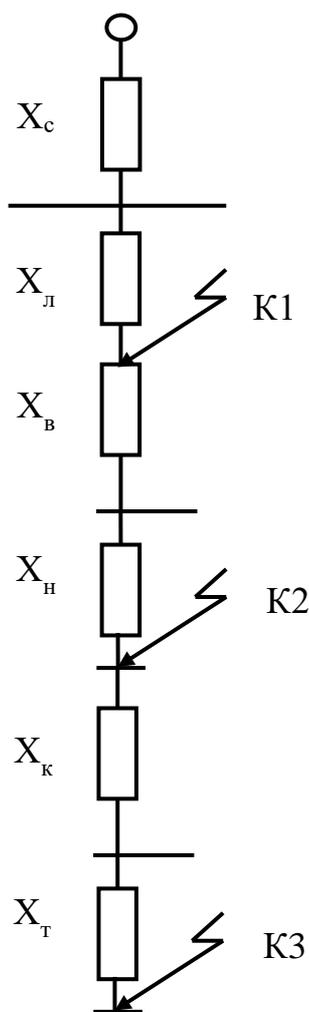
Рисунок 5 – Исходная расчётная схема для расчёта токов КЗ в системе электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината

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, 35 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 целлюлозно-бумажного комбината в работе представлена на рисунке 6» [11].



«Рисунок 6 – Исходная схема замещения для расчёта токов КЗ в системе электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината» [5]

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 – 35 кВ.

Вторая ступень 10 кВ и третья ступень 0,4 кВ, будут неосновными ступенями напряжения.

Базисная мощность принимается равной номинальной мощности силового трансформатора системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, 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 (35 кВ и 10 кВ) системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, принимаются равными напряжениям на шинах ГПП в максимальном режиме работы. Они определены ниже с учётом данного факта.

Базисное напряжение для ступени напряжения 35 кВ (основная ступень):

$$U_{\sigma 1} = 36,75 \text{ кВ}.$$

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 целлюлозно-бумажного комбината рассчитывается по известной формуле:

$$I_{\sigma} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3}U_{\sigma}}. \quad (35)$$

Базисный ток для всех ступеней трансформации схемы (35 кВ, 10 и 0,4 кВ) системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината определён ниже по условию (22).

Базисный ток для ступени напряжения 35 кВ (основная ступень):

$$I_{\sigma 1} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 36,75} = 0,16 \text{ кА.}$$

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

$$I_{\sigma 2} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 0,55 \text{ кА.}$$

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

$$I_{\sigma 3} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 14,45 \text{ кА.}$$

Далее проводится расчёт параметров схемы замещения в системе электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината в относительных единицах, с последующим приведением их к именованным.

«Сопротивление энергосистемы определяется по формуле:

$$x_c = \frac{S_{\bar{o}}}{S_{\kappa}}, \text{ o.e.}, \quad (36)$$

где  $S_{\kappa}''$  - полная мощность трёхфазного КЗ на шинах энергосистемы» [7].

По условию (36):

$$x_c = \frac{10}{500} = 0,02 \text{ o.e.}$$

Сопротивление питающей ВЛ-35 кВ системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината с «учётом её длины, в относительных единицах, при приведении к базисным условиям:

$$x_l = x_0 \cdot L \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}}^2}, \text{ o.e.}, \quad (37)$$

где  $x_0$  - удельное индуктивное сопротивление ВЛ, Ом/км;

$L$  - суммарная длина ВЛ, км» [10].

Согласно условия (37), для питающей ВЛ-35 кВ:

$$x_l = 0,4 \cdot 35 \cdot \frac{10}{35^2} = 0,11 \text{ o.e.}$$

Аналогично для питающей КЛ-10 кВ (к ЦТП-1):

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

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

Для обмотки ВН (35 кВ) трансформатора, оставшегося в работе на ГПП целлюлозно-бумажного комбината:

$$X_{\epsilon} = \frac{0,125 \cdot U_{\text{квн}\%} \cdot S_{\epsilon}}{100 \cdot S_{\text{н.т.}}} \quad (38)$$

Согласно условия (38):

$$X_{\epsilon} = \frac{0,125 \cdot 10,5 \cdot 10}{100 \cdot 10} = 0,01 \text{ o.e.}$$

Для обмотки НН (10 кВ) трансформатора, оставшегося в работе на ГПП целлюлозно-бумажного комбината в результате ПАВ режима:

$$X_{\text{н}} = \frac{1,75 \cdot U_{\text{квн}\%} \cdot S_{\epsilon}}{100 \cdot S_{\text{н.т.}}} \quad (39)$$

Согласно условия (39):

$$X_{\text{н}} = \frac{1,75 \cdot 10,5 \cdot 10}{100 \cdot 10} = 0,18 \text{ o.e.}$$

Для трансформатора ЦТП-1 (2500 кВА), при приведении к базисным условиям:

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

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

$$I'' = \frac{E''}{x_{рез}} \cdot I_b. \quad (40)$$

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:

$$x_{рез} = x_c + x_l, \text{ o.e.} \quad (41)$$

Согласно условия (41):

$$x_{рез} = 0,02 + 0,11 = 0,13 \text{ o.e.}$$

Начальное значение периодической составляющей тока короткого замыкания в расчётной точке К1, при приведении к базисным условиям, в именованных единицах по (40)» [15]:

$$I''_{к1} = \frac{1}{0,13} \cdot 0,16 = 1,23 \text{ кА.}$$

«Результирующее сопротивление к точке К2 в относительных расчётных единицах:

$$x_{рез} = x_c + x_l + x_g + x_n, o.e. \quad (42)$$

Согласно условия (42):

$$x_{рез} = 0,02 + 0,11 + 0,01 + 0,18 \approx 0,32 o.e.$$

Начальное значение периодической составляющей тока короткого замыкания в расчётной точке К2, при приведении к базисным условиям, в именованных единицах по (40):

$$I''_{к2} = \frac{1}{0,32} \cdot 0,55 = 1,72 \text{ кА.}$$

Результирующее сопротивление к точке К3 в относительных расчётных единицах:

$$x_{рез} = x_c + x_l + x_g + x_n + x_k + x_m, o.e. \quad (43)$$

Согласно условия (43):

$$x_{рез} = 0,02 + 0,11 + 0,01 + 0,18 + 0,04 + 0,525 \approx 0,885 o.e.$$

Начальное значение периодической составляющей тока короткого замыкания в расчётной точке К3, при приведении к базисным условиям, в именованных единицах по (40):

$$I''_{к3} = \frac{1}{0,885} \cdot 14,45 = 16,32 \text{ кА.}$$

Значение ударного тока в расчётных точках схемы или начального значения апериодической составляющей тока КЗ в максимальном режиме:

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot k_{уд} \cdot I''_K, \text{ кА,} \quad (44)$$

где  $k_{уд}$  – ударный коэффициент» [12].

По условию (40) для расчётных точек схемы К1 и К2, значение ударных токов (начального значения апериодической составляющей тока КЗ) в именованных единицах:

– в точке К1:

$$i_{уд1} = \sqrt{2} \cdot 1,7 \cdot 1,23 = 2,96 \text{ кА.}$$

– в точке К2:

$$i_{уд2} = \sqrt{2} \cdot 1,4 \cdot 1,72 = 3,41 \text{ кА.}$$

– в точке К3:

$$i_{уд3} = \sqrt{2} \cdot 1,1 \cdot 16,32 = 25,39 \text{ кА.}$$

Значение двухфазного тока КЗ, необходимое для определения надёжности РЗиА:

$$I_{по(\min)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_K, \text{ кА.} \quad (45)$$

Значение двухфазного тока КЗ, необходимое для определения надёжности РЗиА, по условию (45):

– в точке К1:

$$I_{no(min)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 1,23 = 1,07 \text{ кА.}$$

– в точке К2:

$$I_{no(min)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 1,72 = 1,49 \text{ кА.}$$

– в точке К3:

$$I_{no(min)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 16,32 = 14,13 \text{ кА.}$$

Результаты расчёта токов короткого замыкания на шинах 35 кВ и 10 кВ в максимальном режиме работы системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Результаты расчёта токов КЗ на шинах 35 кВ и 10 кВ в максимальном режиме работы системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината

| Параметр         | Расчётная точка КЗ |          |          |
|------------------|--------------------|----------|----------|
|                  | Точка К1           | Точка К2 | Точка К3 |
| $I_k^{(3)}$ , кА | 1,23               | 1,72     | 16,32    |
| $I_k^{(2)}$ , кА | 1,07               | 1,49     | 14,13    |
| $i_{y0}$ , кА    | 2,96               | 3,41     | 25,39    |

Результаты расчёта токов КЗ на шинах 35 кВ, 10 кВ и 0,4 кВ в максимальном режиме работы системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, используются в работе для соответствующих проверок выбранного нового современного оборудования РУ ГПП и ЦТП.

## 2.8 Выбор и проверка электрических аппаратов

Одним из важнейших мероприятий по проектированию системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, 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 они 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.

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

– по номинальному напряжению:

$$U_{уст} \leq U_n. \quad (46)$$

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

– по максимальному рабочему току:

$$I_{раб.макс} \leq I_n. \quad (47)$$

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]:

$$I_{пт} \leq I_{откн}. \quad (48)$$

где « $I_{пт}$  – 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]:

$$(\sqrt{2} \cdot I_{\pi\tau} + i_{a\tau}) \leq \sqrt{2} \cdot I_{отк.н} (1 + \beta_n), \quad (49)$$

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]:

$$t = t_{з.мин} + t_{с.в}, \quad (50)$$

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]:

$$i_y \leq i_{пр.с}, \quad (51)$$

где « $i_{пр.с}$  – 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]:

$$B_k \leq I_T^2 t_T, \quad (52)$$

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» [18] с учётом токов КЗ и отключения цепи:

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

Исходя из расположения в схеме ГПП-35/10 кВ СЭС целлюлозно-бумажного комбината, 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 целлюлозно-бумажного комбината 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/TEL-10-20-1600-У2-48 (вводные) и ВВ/TEL-10-20-630-У2-48 (линейные).

Выбор и проверка высоковольтных выключателей для установки во всех распределительных устройствах ГПП-35/10 кВ СЭС целлюлозно-бумажного комбината, проводится по приведённым выше условиям (таблица 10).

Таблица 10 – Результаты выбора и проверки выключателей высокого напряжения для установки в РУ-35 кВ и РУ-10 кВ ГПП-35/10 кВ СЭС целлюлозно-бумажного комбината

| Наименование присоединений             | Марка                      | Соотношение паспортных и расчетных данных |                                |                                 |                                    |                                |                                      |                                       |
|--|----------------------------|---|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
|  |                            | $\frac{U_n}{U_p}$ ,<br>кВ                 | $\frac{I_n}{I_{p\max}}$ ,<br>А | $\frac{I_{откл.}}{I''}$ ,<br>кА | $\frac{i_{откл.}}{i_{кт}}$ ,<br>кА | $\frac{I_{np-c}}{I''}$ ,<br>кА | $\frac{i_{np-c}}{i_y^{(3)}}$ ,<br>кА | $\frac{I_t^2 \cdot t}{B_k}$ ,<br>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/TEL-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/TEL-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 ГПП-35/10 кВ СЭС целлюлозно-бумажного комбината.

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 целлюлозно-бумажного комбината 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 целлюлозно-бумажного комбината, представлены в таблице 11» [15].

Таблица 11 – Результаты выбора и проверки разъединителей для установки в РУ-35 кВ ГПП-35/10 кВ СЭС целлюлозно-бумажного комбината

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

В ячейках КРУ-10 кВ ГПП-35/10 кВ СЭС целлюлозно-бумажного комбината разъединители не устанавливаются, их заменяют втычные контакты. Для установки в РУ ГПП-35/10 кВ СЭС целлюлозно-бумажного комбината выбираются ограничители перенапряжения следующих типов и марок:

- для установки в РУ-35 кВ и на питающей 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 целлюлозно-бумажного комбината.

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 осуществляется 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 РУ-10 кВ ГПП-35/10 кВ СЭС целлюлозно-бумажного комбината, представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Результаты выбора новых трансформаторов напряжения для установки в РУ на ГПП-35/10 кВ СЭС целлюлозно-бумажного комбината

| Тип ТН     | Кол-во ТН | Мощность на один ТН, ВА | Класс точности | $\frac{U_n}{U_{уст}}$ , кВ | $\frac{S_n}{S_2 \Sigma}$ , ВА |
|------------|-----------|-------------------------|----------------|----------------------------|-------------------------------|
| НТМИ-10-66 | 2         | 36,8/2                  | 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 целлюлозно-бумажного комбината, представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Результаты выбора новых трансформаторов тока для установки в РУ ГПП-35/10 кВ СЭС целлюлозно-бумажного комбината

| 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                    | $B_k$<br>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 целлюлозно-бумажного комбината удовлетворяет всем требуемым условиям и принимается для установки на объекте.

Выводы по разделу 2.

В работе проведён детальный практический расчёт и последующее обоснование технических мероприятий и решений по проектированию системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината.

Обосновано, что для обеспечения питания внешней системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, 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 целлюлозно-бумажного комбината:

- для применения в РУ-35 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 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 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 целлюлозно-бумажного комбината.

На основании полученных результатов, установлено, что для питания проектируемой внешней системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, 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 целлюлозно-бумажного комбината (всего предусмотрено три ЦТП).

Согласно дальнейшей перспективе по развитию системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, для питающих ВЛ-35 кВ принята марка инновационного провода АСК-95/16 с сечением токоведущей жилы 95 мм<sup>2</sup> и допустимой токовой нагрузкой  $I_{don} = 330$  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 АСБ-10. Выбрана и проверена ошиновка для применения в РУ-35 кВ и РУ-10 кВ на ГПП СЭС целлюлозно-бумажного комбината: для применения в ОРУ-35 кВ выбрана гибкая ошиновка из проводов марки АСК-95/16, для РУ-10 кВ закрытого типа – жёсткая ошиновка марки А80×10.

«Выбраны новые современные электрические аппараты для установки в РУ-35 кВ и РУ-10 кВ ГПП системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината:

- в ОРУ-35 кВ – выключатель высокого напряжения ВР35НС-35-20/1600-3/3 УХЛ1, разъединители РЛНДЗ-2-35/1000, ограничители перенапряжения ОПН-У/TEL 35/40,5 УХЛ1, трансформатор тока ТГФМ-35-У3;
- в РУ-10 кВ: выключатели высокого напряжения вводные и секционный ВВ/TEL-10-20-1600-У2-48, выключатели линейные ВВ/TEL-10-20-630-У2-48, ограничители перенапряжения» [14] ОПН-РС/TEL 6/7,6 УХЛ1, трансформаторы напряжения НТМИ-10-66 и трансформаторы тока ТПК-10-У3.

Все выбранные и проверенные в работе аппараты соответствуют требуемым техническим нормативам и могут быть окончательно рекомендованы для установки в соответствующих распределительных устройствах СЭС целлюлозно-бумажного комбината.

### 3 Расчёт технико-экономических показателей проекта

«Исходя из принятых решений в работе, капитальные вложения в систему электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, с учётом систематизации оборудования по его назначению, типу и расположению, определяются:

$$K = K_{ТП} + K_C + K_A, \quad (54)$$

где  $K_{ТП}$  – капиталовложения в трансформаторные подстанции, включая питающую ГПП и цеховые ТП-10/0,4 кВ (с учётом трансформаторов и шкафов РУ-10 кВ);

$K_C$  – капиталовложения в электрические сети (включая выбранные кабельные линии номинальным напряжением 10 кВ и 0,38/0,22 кВ, а также питающую ВЛ-35 кВ);

$K_A$  - капиталовложения в электрические аппараты 35 кВ и 10 кВ (включая распределительные шкафы и ячейки)» [15].

«Капиталовложения в питающую ГПП и цеховые ТП-10/0,4 кВ, на каждой из которых расположены по два силовых трансформатора, системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината определяются:

$$K_{ТП} = C_{осн.} \cdot n + M_n + H_p, \quad (55)$$

где  $n$  - количество единиц оборудования, шт.;

$C_{осн}$  - стоимость одной единицы оборудования, тыс. руб.;

$M_n$  - расходы на монтаж и наладку оборудования, тыс. руб.;

$H_p$  - накладные расходы, тыс. руб.» [15].

«Принимаются в работе» [15]:

$$\begin{aligned} M_n &= 0,3C_{осн}. \\ H_p &= 0,1C_{осн}. \end{aligned} \quad (56)$$

«Результаты расчёта стоимости оборудования питающей ГПП и цеховых ТП-10/0,4 кВ с учётом выбранных в работе силовых трансформаторов, а также шкафов РУ-10 кВ, сведены в таблицу 14» [18].

Таблица 14 – Результаты расчета стоимости оборудования подстанций

| Тип электрооборудования            | Кол-во ед., шт. | Стоимость, за единицу, тыс. руб. | Суммарная стоимость, тыс. руб. |
|------------------------------------|-----------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Силовой трансформатор ТМН-10000/35 | 2               | 750,0                            | 1500,0                         |
| Силовой трансформатор ТМ-2500/10   | 4               | 500,0                            | 2000,0                         |
| Силовой трансформатор ТМ-1000/10   | 2               | 350,0                            | 700,0                          |
| Шкаф РУ-10 кВ (без оборудования)   | 15              | 60,0                             | 900,0                          |
| Итого                              | 23              | -                                | 5100                           |

«Капиталовложения в питающую ГПП и цеховые ТП-10/0,4 кВ системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината» [18]:

$$K_{ТП} = 5100 + 0,3 \cdot 5100 + 0,1 \cdot 5100 = 7140 \text{ тыс.руб.}$$

«Капиталовложения в электрические сети целлюлозно-бумажного комбината определяются так:

$$K_C = l_C \cdot C_C + M_n + H_p, \quad (57)$$

где  $l_C$  - длина сети (соответствующих линий), км;

$C_C$  - стоимость 1 км сети (соответствующих линий), тыс. руб.» [18].

«Результаты расчета стоимости электрических сетей системы электроснабжения сведены в таблицу 15» [18].

Таблица 15 – Результаты расчета стоимости электрических сетей системы электроснабжения предприятия

| Марка кабеля      | Кол-во, км | Стоимость, за км, тыс. руб. | Суммарная стоимость, тыс. руб. |
|-------------------|------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Сеть 35 кВ        |            |                             |                                |
| АСК-95/16         | 5,0        | 180,0                       | 900,0                          |
| Сеть 10 кВ        |            |                             |                                |
| АСБ 3×25          | 0,2        | 350,0                       | 70,0                           |
| АСБ 3×35          | 0,2        | 420,0                       | 84,0                           |
| АСБ 3×95          | 0,5        | 550,0                       | 275,0                          |
| Сеть 0,38/0,22 кВ |            |                             |                                |
| АВВГ 3×70+1×35    | 0,4        | 416,0                       | 166,4                          |
| АВВГ 3×95+1×50    | 0,5        | 512,0                       | 256,0                          |
| АВВГ 3×185+1×95   | 1,0        | 720,0                       | 720,0                          |
| Итого             | 7,8        | -                           | 2471,4                         |

«Капиталовложения в электрические сети проектируемого целлюлозно-бумажного комбината» [18]:

$$K_C = 2471,4 + 0,3 \cdot 2471,4 + 0,1 \cdot 2471,4 \approx 3460 \text{ тыс.руб.}$$

«Капиталовложения в электрические аппараты (включая распределительные шкафы и ячейки, а также АСКУЭ) целлюлозно-бумажного комбината определяются так:

$$K_A = C_{осн.} \cdot n + M_n + H_p, \quad (58)$$

где  $n$  - количество единиц оборудования, шт.;

$C_{осн.}$  - стоимость одной единицы оборудования, тыс. руб.;

$M_n$  - расходы на монтаж и наладку оборудования, тыс. руб.;

$H_p$  - накладные расходы, тыс. руб.» [18].

«Результаты расчета стоимости электрических аппаратов системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината по укрупнённым экономическим показателям сведены в таблицу 16» [18].

Таблица 16 – Результаты расчета стоимости электрических аппаратов системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината

| Марка оборудования  | Кол-во ед., шт. | Стоимость, за единицу, тыс. руб. | Суммарная стоимость, тыс. руб. |
|---|-----------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Разъединитель РЛНДЗ-2-35/600 (линейные и ремонтные)   | 6               | 100,0                            | 600,0                          |
| Ограничители перенапряжения ОПН-35 УХЛ1   | 6               | 60,0                             | 360,0                          |
| Выключатель высокого напряжения ВР35НС-35-20/1600-3/3 УХЛ1 со встроенными трансформаторами тока | 2               | 500,0                            | 1000,0                         |
| Выключатель высокого напряжения ВВ/TEL-10-20/630  | 15              | 300,0                            | 4500,0                         |
| Трансформатор тока ТПК-10   | 30              | 40,0                             | 1200,0                         |
| Разъединитель РЛК-10 УХЛ1   | 6               | 50,0                             | 300,0                          |
| Трансформатор напряжения НТМИ-10-66У3   | 2               | 80,0                             | 160,0                          |
| АСКУЭ Меркурий-234 ARTM-03 РВ.Г 3х230/400В 5(10) А (комплект)                                   | 1               | 150,0                            | 150,0                          |
| Итого   | 62              | -                                | 8270,0                         |

«С учётом стоимости выбранных аппаратов, капиталовложения в электрические аппараты определяются как алгебраическая сумма рассчитанных составляющих:

$$K_A = 8270 + 0,3 \cdot 8270 + 0,1 \cdot 8270 = 11578,0 \text{ тыс.руб.}$$

Определение суммы общих капитальных вложений (суммарных капиталовложений) в систему электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината:

$$K = 7140 + 3460 + 11578 = 22178 \text{ тыс.руб.}$$

С учётом рассчитанной величины суммарных капиталовложений в систему электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, далее в работе проводится определение сметной стоимости данного проекта по укрупнённым экономическим показателям» [18].

«В общем виде расчетная формула эксплуатационных издержек (затрат) для системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината по укрупнённым экономическим показателям:

$$\text{ЭЗ} = \text{ЗП} + \text{СВ} + A_o + P_{\text{ТО}} + \text{Пр}, \quad (59)$$

где  $\text{ЗП}$  – заработная плата, тыс. руб.;

$\text{СВ}$  – страховые взносы, тыс. руб.;

$A$  – амортизационные отчисления, тыс. руб.;

$P$  – затраты на ремонт и техническое обслуживание, тыс. руб.» [18].

«Заработная плата за год:

$$\text{ЗП} = M_0 \cdot N \cdot K_{\text{дон}} \cdot T, \quad (60)$$

где  $M_0 = 39,431$  тыс. руб. – минимальный месячный оклад по

предприятию по состоянию на 2023 г.;

$N = 5$  – количество оперативно – технических работников;

$K_{\text{дон}} = 1,5$  – коэффициент, учитывающий дополнительную оплату

труда;

$T = 12$  – число месяцев в году» [18].

$$\text{ЗП} = 39,431 \cdot 5 \cdot 1,5 \cdot 12 = 3548,8 \text{ тыс.руб.}$$

«Страховые взносы составляют 30,9% от ЗП» [15]:

$$\text{СВ} = 0,309 \cdot \text{ЗП}. \quad (61)$$

$$\text{СВ} = 0,309 \cdot 3548,79 = 1096,6 \text{ тыс.руб.}$$

«Годовые амортизационные отчисления на разработанную систему электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, по укрупнённым экономическим показателям, определяются, исходя из величины капитальных вложений:

$$A_o = K \cdot \frac{a}{100}, \quad (62)$$

где  $a$ - годовая норма амортизационных отчислений, %» [21].

$$A_o = 22178 \cdot 0,1 = 2217 \text{ тыс.руб.}$$

«Годовые затраты на ремонт и техническое обслуживание, с учётом того, что всё оборудование новое:

$$P_{TO} = K \cdot \frac{r}{100}, \quad (63)$$

где  $r$  - годовая норма отчислений на ремонт и техническое обслуживание оборудования и сетей, %» [23].

$$P_{TO} = 22178 \cdot 0,05 \approx 1109 \text{ тыс.руб.}$$

«Прочие расходы» [25]:

$$Pr = 0,01 \cdot \sum K. \quad (64)$$

$$Pr = 22178 \cdot 0,01 \approx 221,8 \text{ тыс.руб.}$$

«Суммарные годовые эксплуатационные издержки» [19]:

$$\text{ЭЗ} = 3548,8 + 1096,6 + 2217 + 1109 + 221,8 = 8193,2 \text{ тыс.руб.}$$

«Суммарная стоимость проекта системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината учитывает капиталовложения и суммарные годовые эксплуатационные издержки» [11]:

$$C = K + \text{ЭЗ}. \quad (65)$$

$$C = 22178 + 8193,2 = 30371,2 \text{ тыс.руб.}$$

«В работе полученные результаты расчёта основных экономических показателей спроектированной системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината представлены в таблице 17» [18].

Таблица 17 – Сводная таблица технико-экономических показателей системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината

| Статья затрат  | Единица измерения | Числовой показатель статьи затрат |
|--|-------------------|-----------------------------------|
| Капиталовложения в подстанции  | тыс. руб.         | 7140,0                            |
| Капиталовложения в электрические сети (питающая и распределительные сети)      | тыс. руб.         | 3460,0                            |
| Капиталовложения в электрические аппараты (питающей и распределительной сетей) | тыс. руб.         | 11578,0                           |
| Суммарные капитальные вложения   | тыс. руб.         | 22178,0                           |
| Заработная плата   | тыс. руб.         | 3548,8                            |
| Страховые взносы   | тыс. руб.         | 1096,6                            |
| Годовые амортизационные отчисления   | тыс. руб.         | 2217,0                            |
| Годовые затраты на ремонт и техническое обслуживание                           | тыс. руб.         | 1109,0                            |
| Прочие расходы   | тыс. руб.         | 221,8                             |
| Суммарная величина эксплуатационных издержек                                   | тыс. руб.         | 8193,2                            |
| Суммарная стоимость проекта  | тыс. руб.         | 30371,2                           |

«Полученные результаты технико-экономических показателей спроектированной системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината должны быть учтены при практической реализации данного проекта» [18].

Таким образом, поставленная задача выполнена.

Выводы по разделу.

В работе проведён расчёт основных экономических показателей спроектированной системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината.

В работе определены: капиталовложения, отчисления на «заработную плату, страховые взносы, годовые амортизационные отчисления, годовые затраты на ремонт и техническое обслуживание, прочие расходы, суммарная величина эксплуатационных издержек.

Установлено, что суммарные капиталовложения в объект проектирования составили 22178 тыс. руб., суммарная величина эксплуатационных издержек – 8193,2 тыс. руб.

При этом суммарная стоимость разработанного проекта составила 30371,2 тыс. руб.» [18].

## Заключение

«В результате выполнения работы проведена разработка проекта системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, осуществляемая с целью ввода нового объекта в эксплуатацию в связи с производственной необходимостью» [18].

Обусловлена актуальность выбора темы, с последующим анализом технических данных нагрузки потребителей.

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

Показано, что разработка качественного проекта системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, с внедрением основных групп мероприятий, будет способствовать значительному повышению параметров надёжности, бесперебойности, электробезопасности и экономичности на объекте исследования.

Обосновано, что для обеспечения питания внешней системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, 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 целлюлозно-бумажного комбината:

- для применения в РУ-35 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 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 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 целлюлозно-бумажного комбината.

На основании полученных результатов, установлено, что для питания проектируемой внешней системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, 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 целлюлозно-бумажного комбината (всего предусмотрено три ЦТП).

Согласно дальнейшей перспективе по развитию системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината, для питающих ВЛ-35 кВ принята марка инновационного провода АСК-95/16 с сечением токоведущей жилы 95 мм<sup>2</sup> и допустимой токовой нагрузкой  $I_{дон} = 330$  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 АСБ-10. Выбрана и проверена ошиновка для применения в РУ-35 кВ и РУ-10 кВ на ГПП СЭС целлюлозно-бумажного комбината: для применения в ОРУ-35 кВ выбрана гибкая ошиновка из проводов марки АСК-95/16, для РУ-10 кВ закрытого типа – жёсткая ошиновка марки А80×10.

«Выбраны новые современные электрические аппараты для установки в РУ-35 кВ и РУ-10 кВ ГПП системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината:

- в ОРУ-35 кВ – выключатель высокого напряжения ВР35НС-35-20/1600-3/3 УХЛ1, разъединители РЛНДЗ-2-35/1000, ограничители перенапряжения ОПН-У/TEL 35/40,5 УХЛ1, трансформатор тока ТГФМ-35-У3;
- в РУ-10 кВ: выключатели высокого напряжения вводные и секционный ВВ/TEL-10-20-1600-У2-48, выключатели линейные ВВ/TEL-10-20-630-У2-48, ограничители перенапряжения» [8] ОПН-РС/TEL 6/7,6 УХЛ1, трансформаторы напряжения НТМИ-10-66 и трансформаторы тока ТПК-10-У3.

Проведён расчёт основных экономических показателей спроектированной системы электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината. В работе определены: капиталовложения, отчисления на «заработную плату, страховые взносы, годовые амортизационные отчисления, годовые затраты на ремонт и техническое обслуживание, прочие расходы, суммарная величина эксплуатационных издержек. Установлено, что суммарные капиталовложения в объект проектирования составили 22178 тыс. руб., суммарная величина эксплуатационных издержек – 8193,2 тыс. руб. При этом суммарная стоимость проекта составила 30371,2 тыс. руб.» [10].

«Таким образом, на основании полученных результатов, установлено, что спроектированная система электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината отвечает всем» [16] критериям по надёжности, бесперебойности обеспечения электроэнергией, электробезопасности и экономичности.

## Список используемых источников

1. АСК - Провод неизолированный для воздушных линий. [Электронный ресурс]: URL: <https://www.ruscable.ru/info/wire/mark/ask/> (дата обращения: 21.02.2023).
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: 22.02.2023).
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. 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.
6. Оборудование электрических станций и подстанций. [Электронный ресурс]: URL: <https://www.elektro-expo.ru/ru/ui/17138/> (дата обращения: 20.02.2023).
7. 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: 20.02.2023).
8. Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей. 6-е изд., перераб. и доп. М: Энергоатомиздат, 2019. 174 с.
9. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей.

4-е изд., перераб. и доп. М: Энергоатомиздат, 2018. 392 с.: ил.

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

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

12. Рожкова Л.Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций: Учебник для студентов учреждений среднего профессионального образования. М.: ИЦ Академия, 2018. 448 с.

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

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

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

16. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. 4-е изд., перераб. и доп. М.: ЭНАС, 2018. 312 с.

17. Типовые схемы РУ ПС 35-750 кВ. [Электронный ресурс]: URL: [http://powersystem.info/index.php/Типовые\\_схемы\\_РУ\\_35-750\\_кВ](http://powersystem.info/index.php/Типовые_схемы_РУ_35-750_кВ) (дата обращения: 20.02.2023).

18. Фролов Ю. М. Основы электроснабжения / Ю.М. Фролов, В.П. Шелякин. М.: Лань, 2019. 480 с.

19. Целлюлозно-бумажное производство. [Электронный ресурс]: URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Целлюлозно-бумажное\\_производство](https://ru.wikipedia.org/wiki/Целлюлозно-бумажное_производство) (дата обращения: 20.02.2023).

20. Целлюлозно-бумажный комбинат. [Электронный ресурс]: URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1187171> (дата обращения: 21.02.2023).

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: Willey. 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.