

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

**Кафедра строительства,  
энергетики и транспорта**

Методические указания  
к курсовому проекту

по дисциплине: **Б1.О.23** Электрические сети

для направления подготовки (специальности)

13.03.02

код направления подготовки

---

«Электроэнергетика и электротехника». Профиль – «Электроснабжение»

---

наименование направления подготовки

Для всех форм обучения

---

код и наименование специальности, форма обучения

Мурманск  
2021

Составил: Васильева Елена Витальевна, доцент кафедры строительства, электроэнергетики и транспорта Мурманского государственного технического университета

Методические указания к курсовому проекту рассмотрены и одобрены на заседании кафедры СЭиТ 01/07/2021 протокол № 05

Методические указания составлены на основе ФГОС ВО по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», утвержденного приказом Минобрнауки РФ от 03.09.2015 № 955, учебного плана в составе ОПОП по направлению подготовки/специальности 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электроснабжение».

Процесс изучения дисциплины «Электрические сети» направлен на формирование элементов следующих компетенций в соответствии с ФГОС ВО:

ПК-5. Готовность определять параметры оборудования объектов профессиональной деятельности

ПК-7. Готовность обеспечивать требуемые режимы и заданные параметры технологического процесса по заданной методике.

В результате изучения дисциплины студент должен:

Знать: структуру современных электрических сетей; требования предъявляемые к электрическим сетям; режимы работы современных электрических сетей; способы регулирования напряжения в электрических сетях.

Уметь: выполнять выбор оборудования для современных электрических сетей; составлять математические модели основных элементов современных электрических сетей; выполнять расчёт параметров математических моделей схем замещения основных элементов современных электрических сетей; выполнять расчёт режимов современных электрических сетей на основе составленных математических моделей; выполнять расчёт потерь мощностей в электрических сетях, выполнять механический расчет проводов и тросов ВЛ.

Владеть: анализом результатов, получаемых в результате расчёта режимов работы электрических сетей.

## **ОГЛАВЛЕНИЕ**

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ                              | 4  |
| ЗАДАНИЕ НА КП                         | 5  |
| МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КП | 6  |
| СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ       | 19 |

## **Введение.**

Курсовое проектирование является одной из учебной важнейших форм работы. Оно ставит своей целью закрепить умения и систематизировать знания, полученные по дисциплине «Электрические сети», а также в смежных дисциплинах, научить студентов применять эти знания при решении инженерных задач, привить им навыки к самостоятельной работе.

При проектировании электрической сети необходимо выполнить технико-экономическое обоснование решений, определяющих оптимальный вариант ЭС, обеспечивающий потребителей качественной электроэнергией, с учетом бесперебойности электроснабжения при рациональном сочетании затрат на сооружение и эксплуатацию ЭС.

Бесперебойность электроснабжения достигается прежде всего резервированием питания электропотребителей с учетом заданной категории надежности.

Электроснабжение электропотребителей первой категории следует осуществлять от двух независимых источников, которыми считают секции шин двух трансформаторов подстанции, питаемой не менее чем двумя линиями. Перерыв в их электроснабжении допустим лишь на время срабатывания АВР.

Питание электропотребителей II категории допускают по одной линии и одним трансформатором при наличии централизованного резерва трансформаторов.

Перерывы в электроснабжении электропотребителей II категории не должны быть продолжительней двух часов, а электропотребителей III категории – не более суток. Нагрузки III категории резервным питанием можно не обеспечивать.

В результате выполнения курсового проекта студент должен освоить:

- принципы и общий алгоритм проектирования электрических сетей;
- критерии выбора оптимального варианта электрической сети;
- порядок построения схем электрической сети;
- методы расчета режимов электрической сети;
- способы регулирования напряжения в электрической сети.
- решение вопросов, связанных с компенсацией реактивной мощности

### **1.Задание на курсовой проект**

Задачей данной работы является выполнение комплекса работ, связанных с проектированием электрической сети 35-220 кВ внешнего электроснабжения промышленного района.

По заданным нагрузкам, их месторасположением и размещением источников питания, необходимо выбрать схему соединения сети, ее номинальное напряжение, определить конструктивное выполнение определенных линий и их основные характеристики:

- число цепей;
- сечение проводов;
- потокораспределение мощностей;
- уровни напряжения различных режимов.

Решить вопросы компенсации реактивной мощности.

#### **Исходные данные к работе:**

Нагрузки в МВт и  $\cos$  подстанций выбирается в соответствии с таблицей А (№ варианта согласуется с преподавателем)

Координаты точек подстанций выбираются в соответствии с таблицей Б (№ варианта соответствует предпоследней цифре зачетной книжки).

Масштаб – 3 км/мм

Продолжительность использования наибольшей нагрузки  $T_m=4500$  ч.

Активная наименьшая мощность нагрузки составляет 25% от наибольшей. Район по гололеду – II

Таблица А

| Вариант          | 0    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $P_6$ , МВт      | 12   | 10   | 8    | 16   | 8    | 12   | 14   | 10   | 8    | 12   |
| $\cos \varphi_6$ | 0,82 | 0,8  | 0,83 | 0,85 | 0,84 | 0,8  | 0,81 | 0,85 | 0,82 | 0,81 |
| $P_в$ , МВт      | 8    | 12   | 16   | 10   | 14   | 8    | 12   | 16   | 10   | 14   |
| $\cos \varphi_в$ | 0,8  | 0,85 | 0,83 | 0,81 | 0,8  | 0,82 | 0,86 | 0,82 | 0,8  | 0,81 |
| $P_г$ , МВт      | 10   | 6    | 10   | 8    | 12   | 10   | 10   | 8    | 16   | 10   |
| $\cos \varphi_г$ | 0,82 | 0,83 | 0,8  | 0,81 | 0,85 | 0,8  | 0,82 | 0,83 | 0,85 | 0,8  |

Таблица Б

| Вариант                                | 0     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Координаты точек подстанции А, х/у, мм | 10/90 | 10/80 | 20/70 | 10/60 | 20/60 | 10/80 | 20/50 | 20/40 | 10/50 | 20/90 |
| Координаты точек подстанции Б, х/у, мм | 40/90 | 50/80 | 40/70 | 50/90 | 50/70 | 40/80 | 40/60 | 70/80 | 60/80 | 60/90 |
| Координаты точек подстанции В, х/у, мм | 90/90 | 70/60 | 80/50 | 70/80 | 80/60 | 90/60 | 70/50 | 60/60 | 80/60 | 90/70 |
| Координаты точек подстанции Г, х/у, мм | 50/30 | 70/40 | 60/30 | 50/40 | 40/20 | 50/20 | 40/30 | 50/10 | 60/10 | 50/20 |

## 2. Содержание и оформление курсового проекта

Курсовой проект состоит из расчетно-пояснительной записки объемом не более 40 страниц печатного текста

Расчетно-пояснительная записка - основная часть проекта, содержащая методы исследования и расчета, в краткой и четкой форме раскрывающая замысел проекта. Основой пояснительной записки должны служить технико-экономические расчеты, их анализ и соответствующие выводы.

Последовательность приведения информации в разделах расчетно-пояснительной записки должна быть следующей:

формулировка задачи, которую следует решить;

пояснение методики, с помощью которой автор проекта предполагает решать поставленную задачу;

само решение, базирующееся на расчетах;

выводы по разделу.

При выполнении расчетов в начале необходимо указать формулу, пояснив параметры, входящие в нее и указать источник информации. Затем произвести подстановку числовых значений и выполнить расчеты с указанием размерности полученных параметров. Если в данном разделе имеет место ряд однотипных вычислений, то расчет выполняется только для одного случая, а все остальные целесообразно свести в таблицы.

Таблицы пояснительной записки должны удовлетворять требованиям простоты и наглядности. В методических указаниях приводится форма некоторых таблиц. Во всех остальных случаях форму сводных таблиц студент должен разработать самостоятельно.

Текст должен поясняться схемами, которые изображаются с соблюдением соответствующих стандартов.

При выполнении проекта необходимо применять Международную систему единиц СИ. Обозначения должны соответствовать государственным стандартам с использованием кратных и дольных единиц, например, А, В, кВ, кА, Вт, кВт, МВт, В\*А, кВ\*А, МВ\*А, вар, квар, Мвар, кВт\*ч, МВт\*ч, Ом, кОм и т.д. Сокращения в тексте не допускаются, за исключением общепринятых, например, ВЛ, ЛЭП, ГПП и др.

В пояснительную записку включается: титульный лист, задание на проектирование, оглавление, введение, главы пояснительной записки

В оглавлении приводятся порядковые номера и полное наименование разделов или подразделов с указанием соответствующих страниц.

Во введении показывается состояние и перспективы развития рассматриваемого вопроса. Основное содержание пояснительной записки должно включать рассмотрение следующих разделов проекта:

1. Введение;
2. Содержание;
3. Составление и обоснование схемы и вариантов номинальных напряжений сети;
4. Баланс реактивной мощности и выбор компенсирующих устройств;
5. Выбор типа и мощности трансформаторов понижающих подстанций;

6. Выбор типа и параметров коммутационного оборудования понижающих подстанций;
7. Электрический расчет составленных вариантов сети;
8. Уточненный расчет выбранного варианта проектируемой сети;
9. Список используемой литературы.

В заключении необходимо подвести итог выполненной работы, т.е. в виде ряда пунктов сформулировать основные технико-экономические результаты (как положительные, так и отрицательные), полученные в ходе проектирования.

Список литературы указывают в конце пояснительной записки с соблюдением современных требований. Примером может служить список литературы данных методических указаний. Ссылка на используемую литературу дается в виде цифры в квадратных скобках.

### 3. Разделы курсового проекта

#### Исходные данные:

| Наименование подстанции | Координаты точек подстанций, мм |   | Активная нагрузка, Р, МВт | Коэффициент мощности, $\cos \varphi$ |
|-------------------------|---------------------------------|---|---------------------------|--------------------------------------|
|                         | x                               | y |                           |                                      |
| А<br>(источник питания) |                                 |   | -                         | -                                    |
| Б                       |                                 |   |                           |                                      |
| В                       |                                 |   |                           |                                      |
| Г                       |                                 |   |                           |                                      |
| Масштаб 3 км/мм         |                                 |   |                           |                                      |

Таблица №1

- продолжительность использования наибольшей нагрузки –  $T_m=4500$  ч.;
- активная наименьшая мощность нагрузки составляет 25% от наибольшей, при этом коэффициент мощности не изменяется;
- район по гололеду – II;
- во всех приемных пунктах имеются потребители I и II категорий, а также потребители III категории, составляющие 20-30% от общей нагрузки подстанции;
- срок строительства составит не более одного года;
- на питающей подстанции А осуществляется встречное регулирование напряжения;
- установленная мощность питающей электрической системы А достаточна для покрытия активной мощности потребителей проектируемой сети.

Все другие данные, необходимые для проектирования, принимаются в соответствии с рекомендациями справочной и методической литературы.

## 1. Составление и обоснование схемы и вариантов номинальных напряжений сети.

Выполняем три варианта (рис.1), магистральную (схем: радиальную рис.2) и кольцевую (рис.3).

Определяем на этих схемах  $\lambda_{изм}$  (измеряема длина). Расчетную длину  $\lambda_{расч}$  находим по формуле:

$$\lambda_{расч} = \lambda_{изм} + \Delta\lambda$$

где  $\Delta\lambda$  - расстояние, которое учитывает неточность прохождения трассы по сравнению с чертежом;  $\Delta\lambda = (0,1 \div 0,15) \lambda_{изм}$

Результаты измерения заносим в таблицу №2.

Таблица №2

| Обозначение линии | Результаты измерения, мм | Длина линии с учетом масштаба, $\lambda_{изм}$ , км | $\Delta\lambda$ , км | $\lambda_{расч}$ , км |
|-------------------|--------------------------|---|----------------------|-----------------------|
| $\lambda_{аб}$    |                          |   |                      |                       |
| $\lambda_{ав}$    |                          |   |                      |                       |
| $\lambda_{бв}$    |                          |   |                      |                       |
| $\lambda_{аг}$    |                          |   |                      |                       |
| $\lambda_{вг}$    |                          |   |                      |                       |

Выбираем главные схемы понижающих подстанций [4].

Основным принципом, которым руководствуются при выборе схем соединения понижающих подстанций в ходе проектирования, строительства и реконструкции электрических сетей, является обеспечение максимальной надежности и экономичности электроснабжения при сохранении требуемых показателей качества электроэнергии. Перечисленным требованиям отвечают более простые унифицированные схемы подстанций с минимальным количеством выключателей на высокой стороне или вовсе без них.

Поэтому в практике проектирования некоторых видов сетей в большинстве случаев принимают определенные типы унифицированных подстанций. В частности, в кольцевых схемах, выполненных одноцепными линиями, применяют схему двухтрансформаторной подстанции типа «мостик» с одним выключателем в перемычке на высокой стороне трансформатора. В магистральных и радиальных схемах, выполненных двухцепными линиями, применяют схему двухтрансформаторной подстанции типа «два блока линия-трансформатор» без выключателей на высокой стороне трансформатора.

Определяем номинальные напряжения в электрических сетях.

Номинальное напряжение в электрических сетях при проектировании выражается тремя способами:

– по кривым; – по таблице;

– по формуле:  $U_{э\kappa} = \frac{1000}{\sqrt{500/\lambda + 2500/P}}$ , кВ [1, стр.106]

где  $\lambda$  - длина линии, км;

P – передаваемая мощность, МВт.

В данной курсовой работе номинальное напряжение предлагается определять третьим способом для каждой схемы.

Для кольцевой схемы:

Разрезать кольцевую схему по “А”.

Потокораспределение определяется по правилу обратных плеч.

$$P_a = \frac{P_{\bar{b}} \cdot \lambda_{a\bar{b}} + P_{\bar{v}} (\lambda_{a\bar{b}} + \lambda_{\bar{b}\bar{v}}) + P_{\bar{r}} (\lambda_{a\bar{b}} + \lambda_{\bar{b}\bar{v}} + \lambda_{\bar{v}\bar{r}})}{\lambda_{a\bar{b}} + \lambda_{\bar{b}\bar{v}} + \lambda_{\bar{v}\bar{r}} + \lambda_{\bar{r}\bar{a}}}$$

$$P_a = \frac{P_{\bar{r}} \cdot \lambda_{a\bar{r}} + P_{\bar{v}} (\lambda_{a\bar{r}} + \lambda_{\bar{r}\bar{v}}) + P_{\bar{b}} (\lambda_{a\bar{r}} + \lambda_{\bar{r}\bar{v}} + \lambda_{\bar{v}\bar{b}})}{\lambda_{a\bar{b}} + \lambda_{\bar{b}\bar{v}} + \lambda_{\bar{v}\bar{r}} + \lambda_{\bar{r}\bar{a}}}$$

Проверка правильности расчета производится по уравнению

$$P_a + P_a = P_{\bar{b}}' + P_{\bar{v}}'' + P_{\bar{r}}$$

Определяется потокораспределение в сети по I закону Кирхгофа:

Выбор напряжения по всей сети определяется по наиболее загруженному участку.

## 2. Баланс реактивной мощности и выбор компенсирующих устройств.

Компенсирующие устройства применяются во всех электрических сетях для того, чтобы реактивная мощность, передаваемая по линии, была минимальной. Уменьшение реактивной мощности приводит к уменьшению тока, а следовательно, и уменьшаются потери мощности в сетях. Выбор мощности компенсирующих устройств и их размещение на подстанции сети влияют на технико-экономические показатели вариантов схем, а также могут повлиять и на правильность выбора величины номинального напряжения и схемы проектируемой сети.

Следует выбрать батареи конденсаторов такой мощности, чтобы довести коэффициент мощности на шинах вторичного напряжения каждой подстанции до  $0,92 \div 0,95$  (меньшие значения желаемого коэффициента мощности нужно принимать для подстанций, расположенных вблизи от источников питания).

Приближенное значение мощности компенсирующих устройств  $Q_{ку}$ , установленных на шинах вторичного напряжения каждой подстанции, определяем по формуле:

$$Q_{ку} = P_{к} \cdot K_{н} (tg \varphi_{к} - tg \varphi_{жкк})$$

где  $P_{к}$  – активная мощность, заданная на шинах вторичного напряжения понижающей К-ой подстанции;

$\varphi_{к}$  и  $\varphi_{жкк}$  – угол сдвига фаз между током и напряжением на шинах вторичного напряжения К-той подстанции и его желаемое значение после компенсации;

$K_{н}$  – коэффициент нагрузки,  $K_{н} \approx 0,8 \div 0,96$ .

Результаты вычислений сводим в таблицу №3.

Таблица №3

| Параметры   |                             | Подстанции |   |   |
|---|-----------------------------|------------|---|---|
|   |                             | Б          | В | Г |
| Активная мощность, $P_{к}$ , МВт                                |                             |            |   |   |
| Коэффициент мощности  | $\cos \varphi_{к}$          |            |   |   |
|   | $tg \varphi_{к}$            |            |   |   |
| Желаемый коэффициент мощности                                   | $\cos \varphi_{жкк}$        |            |   |   |
|   | $tg \varphi_{жкк}$          |            |   |   |
| Реактивная мощность компенсирующего устройства, $Q_{ку}$ , Мвар |                             |            |   |   |
| Желаемая реактивная мощность, $Q_{жк}$ , Мвар                   |                             |            |   |   |
| Желаемая полная мощность, $S_{жк}$ , МВ·А                       | $P_{к} + jQ_{жк}$           |            |   |   |
|   | $\sqrt{P_{к}^2 + Q_{жк}^2}$ |            |   |   |

### 3 Выбор типа и мощности трансформаторов понижающих подстанций.

Силовые трансформаторы предназначены для преобразования уровня напряжения.

Различают два режима работы трансформатора:

- систематические допустимые перегрузки;
- аварийные перегрузки.

Исходя из допустимой перегрузки на время максимума нагрузки на 40%, мощность каждого из двух трансформаторов выбираем равной  $0,65 \div 0,7$  максимальной нагрузки подстанции. При этом обеспечивается питание всех потребителей при аварийном отказе одного трансформатора.

$$S_{н.тр} \geq (0,65 \div 0,7) S_{ж}$$

Определяем ориентировочные мощности трансформаторов подстанций и результаты заносим в таблицу №4.

Таблица №4

|  | Подстанции |   |   |
|--|------------|---|---|
|  | Б          | В | Г |
| Ориентировочная мощность трансформаторов, МВ · А |            |   |   |

Выбираем трансформаторы и заносим их в таблицу №5

Таблица №5

| Подстанции | $S_{ном},$<br>МВ · А | Тип | Каталожные данные |    |             |                  |                  |                | Расчетные данные |              |                   |  |
|------------|----------------------|-----|-------------------|----|-------------|------------------|------------------|----------------|------------------|--------------|-------------------|--|
|            |                      |     | $U_{ном},$ кВ     |    | $u_k,$<br>% | $P_{кз},$<br>кВт | $P_{xx},$<br>кВт | $I_{xx},$<br>% | $R_T,$<br>Ом     | $X_T,$<br>Ом | $Q_{xx},$<br>квар |  |
|            |                      |     | ВН                | НН |             |                  |                  |                |                  |              |                   |  |
|            |                      |     |                   |    |             |                  |                  |                |                  |              |                   |  |

Производим расчет потерь мощности в силовых трансформаторах по формулам:

$$\Delta P_T = P_{xx} \cdot n_T + \frac{P_{кз}}{n} \left( \frac{S_{ж}}{S_{н.тр}} \right)^2$$

$$\Delta Q_T = \frac{I_{xx}}{100} S_{н.тр} \cdot n_T + \frac{u_k}{100 \cdot n_T} \cdot \frac{S_{ж}^2}{S_{н.тр}}$$

где  $P_{xx}$  и  $I_{xx}$  – потери холостого хода;

$P_{кз}$  и  $u_k$  – потери короткого замыкания;  $n_T$

– количество трансформаторов,  $n_T = 2$ .

Находим потери напряжения в трансформаторах по формуле:

$$\Delta U_T = \frac{P_k \cdot R_T + Q_{ж} \cdot X_T}{n_T \cdot U_H} \text{ [кВ]}$$

$$\Delta U_T \% = \frac{\Delta U_T}{U_H} \cdot 100 \%$$

где  $R_T$  и  $X_T$  – активное и реактивное сопротивления трансформатора;

$P_k$  – активная мощность, заданная на шинах вторичного напряжения понижающей

Результаты вычислений сводим в таблицу №6.

Таблица №6

| Подстанции | Потери мощности          |                           | Потери напряжения       |                  |
|------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------|
|            | $\Delta P_T, \text{кВт}$ | $\Delta Q_T, \text{квар}$ | $\Delta U_T, \text{кВ}$ | $\Delta U_T, \%$ |
| Б          |                          |                           |                         |                  |
| В          |                          |                           |                         |                  |
| Г          |                          |                           |                         |                  |

Все потери напряжения должны быть меньше 5%.

Определяем потери энергии в трансформаторах по формуле:

$$\Delta W_T = P_x \cdot n_T \cdot T' + \frac{P_{\text{кз}}}{n_T} \left( \frac{S_{\text{ж}}}{S_{\text{н.тр}}} \right)^2 \cdot T'$$

где  $T'$  и  $T''$  - количество часов в году, в течении которых происходят потери электроэнергии (зависящие и независящие от нагрузки):

$$T' = \tau / \alpha_{\text{max}} \text{ и } T'' = 8760 \text{ ч.}$$

$\tau$  - время потерь, определяется по формуле:

$$\tau = \left( 0,124 + \frac{T_m}{10^4} \right)^2 \cdot T''$$

$T_m$  – число часов использования максимума нагрузки,  $T_m=4500$  ч.

$\alpha_{\text{max}}$  – коэффициент попадания нагрузки рассматриваемого потребителя (дополнительный потребитель мощности) в максимум нагрузки энергосистемы, принимаем  $\alpha_{\text{max}}=0,9$ .

Определяем потери энергии и результаты заносим в таблицу №7.

Таблица №7

| Подстанции                   | Потери электроэнергии в трансформаторах, $\Delta W_T, \text{кВт} \cdot \text{ч}$ |                         |
|------------------------------|--|-------------------------|
|                              | зависимые от нагрузки  | независимые от нагрузки |
| Б                            |  |                         |
| В                            |  |                         |
| Г                            |  |                         |
| Итого, $\Delta W_{T,\Sigma}$ |  |                         |

Определяем потери электроэнергии в конденсаторных установках по формуле:

$$\Delta W_{\text{кв}} = Q_{\text{кв}} \cdot K_{\text{кв}} \cdot T$$

где  $K_{\text{кв}}$  – коэффициент удельных потерь в компенсационных установках, принимаем  $K_{\text{кв}}=0,003$  кВт/квар.

Результаты заносим в таблицу №8.

Таблица №8

| Подстанции                           | Потери электроэнергии в компенсационных установках, $\Delta W_{\text{кв}}, \text{кВт} \cdot \text{ч}$ |                         |
|--------------------------------------|---|-------------------------|
|                                      | зависимые от нагрузки   | независимые от нагрузки |
| Б                                    |   |                         |
| В                                    |   |                         |
| Г                                    |   |                         |
| Итого, $\Delta W_{\text{кв},\Sigma}$ |   |                         |

#### 4. Выбор типа и параметров коммутационного оборудования понижающих подстанций.

Для каждого из вариантов схем сети выбрать главные электрические схемы понижающих подстанций.

Для каждой подстанции произвести выбор и проверку коммутационного оборудования на стороне высокого напряжения.

Выбор вводных выключателей, линейных и шинных разъединителей производится по номинальной мощности силового трансформатора с учетом допустимой перегрузки на время максимума нагрузки на 40%.

$$I_{\text{ном м}} = \frac{1,4 \cdot S_{\text{но}}}{\sqrt{3} U_{\text{вн}}}$$

Проверка вводных выключателей, линейных и шинных разъединителей производится по нагрузке подстанции.

Выбор секционных выключателей, секционных разъединителей и разъединителей ремонтной перемычки (при наличии в схеме) производится по номинальной мощности силового трансформатора.

$$I_{\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} U_{\text{вн}}}$$

Проверка секционных выключателей, секционных разъединителей и разъединителей ремонтной перемычки производится по 1/2 нагрузки подстанции.

Результаты расчетов сводим в таблицы №9 и №10

Таблица №9

| Подстанция | Наименование главной электрической схемы подстанции | Высоковольтные выключатели |                  |            |                  |
|------------|---|----------------------------|------------------|------------|------------------|
|            |   | Вводные                    |                  | Секционный |                  |
|            |   | Тип                        | I <sub>ном</sub> | Тип        | I <sub>ном</sub> |
| Б          |   |                            |                  |            |                  |
| В          |   |                            |                  |            |                  |
| Г          |   |                            |                  |            |                  |

Таблица №10

| Подстанция | Наименование главной электрической схемы подстанции | Высоковольтные разъединители |                  |                                 |                  |
|------------|---|------------------------------|------------------|---------------------------------|------------------|
|            |   | Линейные/ шинные             |                  | Секционные/ ремонтной перемычки |                  |
|            |   | Тип                          | I <sub>ном</sub> | Тип                             | I <sub>ном</sub> |
| Б          |   |                              |                  |                                 |                  |
| В          |   |                              |                  |                                 |                  |
| Г          |   |                              |                  |                                 |                  |

## 6 . Электрический расчет составленных вариантов сети.

Зная потери в трансформаторах, приводим нагрузки трансформаторных подстанций к высокой стороне и результаты записываем в таблицу №11.

$$P_2 = P_k + \Delta P_T$$

$$Q_2 = Q_{ж} + \Delta Q_T$$

Таблица №11

| Параметры                         | Подстанции             |   |   |
|-----------------------------------|------------------------|---|---|
|                                   | Б                      | В | Г |
| Активная мощность, $P_2$ , кВт    |                        |   |   |
| Реактивная мощность, $Q_2$ , квар |                        |   |   |
| Полная мощность, $S_2$ ,<br>кВ·А  | $P_2 + jQ_2$           |   |   |
|                                   | $\sqrt{P_2^2 + Q_2^2}$ |   |   |

Приближенно определяем зарядную мощность линии для каждой схемы по формуле:

$$Q_{зар} = \beta_0 \cdot \lambda \cdot U_n^2$$

где  $\lambda$  - длина линии, [км];

$\beta_0$  - приближенное значение проводимости линии  $\frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{км}}$

$U_n$  – номинальное напряжение сети, [кВ]

Определяем приближенное потокораспределение без учета потерь в линиях.

Приближенное потокораспределение – это потокораспределение в линиях и трансформаторах без учета потерь мощности.

В радиальной схеме, потребляемая мощность является передаваемой.

В магистральной схеме потокораспределение находится по I закону Кирхгофа.

В кольцевой схеме потокораспределение находится по правилу обратных плеч.

$$S_a^{\circ} = \frac{\dot{S}_6 \cdot \lambda_{a6} + \dot{S}_B (\lambda_{a6} + \lambda_{6B}) + \dot{S}_Г (\lambda_{a6} + \lambda_{6B} + \lambda_{BГ})}{\lambda_{a6} + \lambda_{6B} + \lambda_{BГ} + \lambda_{aГ}}$$

$$S_a^{\circ//} = \frac{\dot{S}_Г \cdot \lambda_{aГ} + \dot{S}_B (\lambda_{aГ} + \lambda_{BГ}) + \dot{S}_6 (\lambda_{aГ} + \lambda_{BГ} + \lambda_{6B})}{\lambda_{a6} + \lambda_{6B} + \lambda_{BГ} + \lambda_{aГ}}$$

Проверка правильности расчета производится по уравнению:

$$S_a^{\circ} + S_a^{\circ//} = \dot{S}_6 + \dot{S}_B + \dot{S}_Г$$

Определяем потокораспределение в сети по I закону Кирхгофа:

Определяем сечения проводов в электрических сетях.

Критерием для выбора сечения проводников ВЛ является минимум приведенных затрат. В практике проектирования линий массового строительства выбор сечения проводников производится по нормативным обобщенным показателям.

В качестве такого показателя при проектировании ВЛ 35÷500 кВ используется экономическая плотность тока  $j_э$ , которая в зависимости от типа проводки и числе часов использования максимума нагрузки в год выбирается по [3, стр.40]:

$$j_э = 1,1 \text{ А/мм}^2$$

Экономически целесообразное сечение  $S$  [мм<sup>2</sup>] определяется из соотношения:

$$S = \frac{I_{\max}}{j_3}$$

где  $I_{\max}$  – максимальный ток в аварийном режиме (при обрыве одной из линий), [А].

Расчетный ток определяется по формуле:

$$I_p = \frac{S_{\text{линии}}}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

где  $S_{\text{линии}}$  – мощность, передаваемая по конкретной линии. При двухцепной ( $n_{\text{л}}=2$ ) линии это значение уменьшается в два раза.

Значение  $I_{\max}$  находится по той же формуле, но при обрыве одной из питающих линий.

### 1. Радиальная схема

– участок АБ

$$I_{p.а\text{б}} = \frac{S_{а\text{б}}}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot n_{\text{л}}}$$

$$I_{\max.а\text{б}} = \frac{S_{а\text{б}}}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

– участок АВ

$$I_{p.а\text{в}} = \frac{S_{а\text{в}}}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot n_{\text{л}}}$$

$$I_{\max.а\text{в}} = \frac{S_{а\text{в}}}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

– участок АГ

$$I_{p.а\text{г}} = \frac{S_{а\text{г}}}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot n_{\text{л}}}$$

$$I_{\max.а\text{г}} = \frac{S_{а\text{г}}}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

### 2. Магистральная схема

– участок АБ

$$I_{p.а\text{б}} = \frac{S_{а\text{б}}}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot n_{\text{л}}}$$

$$I_{\max.а\text{б}} = \frac{S_{а\text{б}}}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

– участок БВ

$$I_{p.бв} = \frac{S_{бв}}{\sqrt{3}U_n \cdot n_{л}}$$

$$I_{max.бв} = \frac{S_{бв}}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

3. Кольцевая схема

– участок АБ

$$I_{p.аб} = \frac{S_{аб}}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

$$I_{max.аб} = \frac{S_{авар.аб}}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

– участок БВ

$$I_{p.бв} = \frac{S_{бв}}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

$$I_{max.бв} = \frac{S_{авар.бв}}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

– участок ВГ

$$I_{p.вг} = \frac{S_{вг}}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

$$I_{max.вг} = \frac{S_{авар.вг}}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

– участок АГ

$$I_{p.аг} = \frac{S_{аг}}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

$$I_{max.аг} = \frac{S_{авар.аг}}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

Выбранные провода и их характеристики заносим в таблицу №12.

Таблица №12

| Схема        | Участок | Расчетный ток, $I_p$ , А | Максимальный ток, $I_{max}$ , А | Марка провода | Допустимый длительный ток провода, А | Погонные сопротивления (проводимости) |                  |  |
|--------------|---------|--------------------------|---------------------------------|---------------|--------------------------------------|---------------------------------------|------------------|--|
|              |         |                          |                                 |               |                                      | активное, $R_0$ , Ом/км               | Ом/км индуктивно | емкостная, $\beta$ , $10^{-6}$ 1/(Ом·км) |
| 1            | 2       | 3                        | 4                               | 5             | 6                                    | 7                                     | 8                | 9  |
| радиальная   | АБ      |                          |                                 |               |                                      |                                       |                  |  |
|              | АВ      |                          |                                 |               |                                      |                                       |                  |  |
|              | АГ      |                          |                                 |               |                                      |                                       |                  |  |
| магистральна | АБ      |                          |                                 |               |                                      |                                       |                  |  |
|              | БВ      |                          |                                 |               |                                      |                                       |                  |  |
|              | АГ      |                          |                                 |               |                                      |                                       |                  |  |

| 1         | 2  | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-----------|----|---|---|---|---|---|---|---|
| кольцевая | АБ |   |   |   |   |   |   |   |
|           | БВ |   |   |   |   |   |   |   |
|           | ВГ |   |   |   |   |   |   |   |
|           | АГ |   |   |   |   |   |   |   |

Находим потери напряжения сетей по формуле:

$$\Delta U_{л} = \frac{P_{к} \cdot R_{0} + Q_{жс} \cdot X_{0}}{U_{н} \cdot n_{л}} \cdot \lambda_{к} \text{ [кВ]}$$

$$\Delta U_{л} \% = \frac{\Delta U_{л}}{U_{н}} \cdot 100 \%$$

Потери мощности находим по формулам:

$$\Delta P_{л} = \frac{P_{к}^2 + Q_{жс}^2}{U_{н}^2 \cdot n_{л}} \cdot \lambda_{к}$$

$$\Delta Q_{л} = \frac{P_{к}^2 + Q_{жс}^2}{U_{н}^2 \cdot n_{л}} \cdot X_{0} \cdot \lambda_{к}$$

Потери электроэнергии определяем по формуле:

$$\Delta W_{л}^{//} = \Delta P_{л}$$

• τ Все потери записываем в таблицу №13.

Таблица №13

| Схема         | Участок                 | Длина участка, $\lambda_{к}$ , км | Потери напряжения   |                    | Потери мощности      |                       | Потери электроэнергии, $\Delta W_{л}^{//}$ , кВт·ч |
|---------------|-------------------------|-----------------------------------|---------------------|--------------------|----------------------|-----------------------|--|
|               |                         |                                   | $\Delta U_{л}$ , кВ | $\Delta U_{л}$ , % | $\Delta P_{л}$ , кВт | $\Delta Q_{л}$ , квар |  |
| 1             | 2                       | 3                                 | 4                   | 5                  | 6                    | 7                     | 8  |
| радиальная    | АБ                      |                                   |                     |                    |                      |                       |  |
|               | АВ                      |                                   |                     |                    |                      |                       |  |
|               | АГ                      |                                   |                     |                    |                      |                       |  |
|               | Итого, $\Delta W_{л.Σ}$ |                                   | -                   | -                  | -                    | -                     |  |
| магистральная | АБ                      |                                   |                     |                    |                      |                       |  |
|               | БВ                      |                                   |                     |                    |                      |                       |  |
|               | АГ                      |                                   |                     |                    |                      |                       |  |
|               | Итого, $\Delta W_{л.Σ}$ |                                   | -                   | -                  | -                    | -                     |  |

| 1         | 2                       | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----------|-------------------------|---|---|---|---|---|---|
| кольцевая | АБ                      |   |   |   |   |   |   |
|           | БВ                      |   |   |   |   |   |   |
|           | ВГ                      |   |   |   |   |   |   |
|           | АГ                      |   |   |   |   |   |   |
|           | Итого, $\Delta W_{л.Σ}$ |   | - | - | - | - |   |

Все потери напряжения должны быть меньше 5%.

### 7.. Уточненный расчет выбранного варианта проектируемой сети.

Расчет проектируемой сети будем производить в трех режимах:

- режим максимальной нагрузки;
- режим минимальной нагрузки;
- послеаварийный режим.

Расчеты включают в себя:

- точное потокораспределение;
- уровни напряжений;
- коэффициент трансформации в трех режимах.

Зная сечения проводов, определяем точные значения зарядной мощности:

1. Максимальный режим:

- участки АБ и БВ

Определяем мощность, передаваемая по сети:

$$S_{2'}^{\circ} = S_{2б}^{\circ} + S_{2в}^{\circ} + \Delta S_{л.бв}^{\circ} - jQ_{зар.бв}$$

$$S_{1'}^{\circ} = S_{2'}^{\circ} + \Delta S_{л.аб}^{\circ} - jQ_{зар.аб}$$

Определяем уровни напряжений у трансформаторных подстанций:

$$U_{2'} = U_1 - \Delta U_{л.аб}$$

$$U_2 = U_{2'} - \Delta U_{л.бв}$$

Где  $U_1$  – напряжение, вырабатываемое подстанцией А

Определяем коэффициенты трансформации трансформаторов подстанций:

$$K_{Т.б} = \frac{U_{2'}}{U_{НН}}$$

$$K_{Т.в} = \frac{U_2}{U_{НН}}$$

- участок АГ

Определяем мощность, передаваемая по сети:

$$\overset{\circ}{S}_{1''} = \overset{\circ}{S}_{2r} + \Delta \overset{\circ}{S}_{л.ар} - jQ_{зар.ар}$$

Определяем полную мощность и коэффициент мощности источника питания А:

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{S}_1 &= \overset{\circ}{S}_1' + \overset{\circ}{S}_{1''} \\ S_1 &= \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} \\ \cos \varphi_1 &= \frac{P_1}{S_1} \end{aligned}$$

Определяем уровень напряжения у трансформаторных подстанций:

$$U_2 = U_1 - \Delta U_{л.ар}$$

Определяем коэффициент трансформации трансформатора подстанции:

$$K_{Т.г} = \frac{U_2}{U_{НН}}$$

2. Минимальный режим:

В целях сокращения однотипных расчетов режим наименьших нагрузок можно рассматривать упрощенно с некоторой неточностью, допускаемой в этом случае. Можно считать, что потери напряжения в сети в режиме наименьших нагрузок уменьшаются пропорционально величине:

$$\frac{S_{\min}}{S_{\max}} = \frac{1}{4}$$

А потери мощности пропорционально величине:

$$\frac{S_{\min}^2}{S_{\max}^2} = \frac{1}{16}$$

Поэтому величины потерь напряжения и мощности в линиях и обмотках трансформаторов в режиме наименьших нагрузок могут быть получены путем умножения соответствующих значений, найденных для режима наибольших нагрузок, на приведенные значения.

– участки АБ и БВ

Определяем мощность, передаваемая по сети:

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{S}_{2'} &= \frac{1}{4} \left( \overset{\circ}{S}_6 + \overset{\circ}{S}_B \right) + \frac{1}{16} \left( \Delta \overset{\circ}{S}_{Т.б} + \Delta \overset{\circ}{S}_{Т.в} + \Delta \overset{\circ}{S}_{л.бв} \right) - jQ_{зар.бв} \\ \overset{\circ}{S}_{1'} &= \overset{\circ}{S}_{2'} + \frac{1}{16} \left( \Delta \overset{\circ}{S}_{л.аб} \right) - jQ_{зар.аб} \end{aligned}$$

Определяем уровни напряжений у трансформаторных подстанций:

$$\begin{aligned} U_{2'} &= U_1 - \frac{1}{4} \Delta U_{л.аб} \\ U_2 &= U_{2'} - \frac{1}{4} \Delta U_{л.бв} \end{aligned}$$

Определяем коэффициенты трансформации трансформаторов подстанций:  $K_{Т.б}$

$$\begin{aligned} &= \frac{U_{2'}}{U_{НН}} \\ K_{Т.в} &= \frac{U_2}{U_{НН}}; \end{aligned}$$

– участок АГ

Определяем мощность, передаваемую по сети:

$$\overset{\circ}{S}_{1''} = \frac{1}{4} \left( \overset{\circ}{S}_2 \right) + \frac{1}{16} \left( \Delta S_{T.2}^{\circ} + \Delta S_{л.аг}^{\circ} \right) - j Q_{зар.аг}$$

Определяем полную мощность и коэффициент мощности источника питания А:

$$\overset{\circ}{S}_1 = \overset{\circ}{S}_{1'} + \overset{\circ}{S}_{1''}$$

Определяем уровень напряжения у трансформаторных подстанций:

$$U_2 = U_1 - \frac{1}{4} \Delta U_{л.аг}$$

Определяем коэффициент трансформации трансформатора подстанции:

$$K_{Т.г} = \frac{U_2}{U_{НН}};$$

3. Послеаварийный режим:

В этом режиме произошел обрыв одной из цепей двухцепной линии, поэтому потери электроэнергии в линиях и трансформаторах, и потери напряжения увеличатся в два раза, а зарядная мощность – уменьшится в два раза.

– участки АБ и БВ

Определяем мощность, передаваемая по сети:

$$\overset{\circ}{S}_{2'} = \overset{\circ}{S}_6 + \overset{\circ}{S}_6 + 2 \left( \Delta S_{T.6}^{\circ} + \Delta S_{T.6}^{\circ} + \Delta S_{л.бв}^{\circ} \right) - j \frac{Q_{зар.бв}}{2}$$

$$\overset{\circ}{S}_{1'} = \overset{\circ}{S}_{2'} + 2 \left( \Delta S_{л.аб}^{\circ} \right) - j \frac{Q_{зар.аб}}{2}$$

Определяем уровни напряжений у трансформаторных подстанций:

$$U_{2'} = U_1 - 2(\Delta U_{л.аб})$$

$$U_2 = U_{2'} - 2(\Delta U_{л.бв})$$

– участок АГ

Определяем мощность, передаваемая по сети:

$$\overset{\circ}{S}_{1''} = \overset{\circ}{S}_2 + 2 \left( \Delta S_{T.2}^{\circ} + \Delta S_{л.аг}^{\circ} \right) - j \frac{Q_{зар.аг}}{2}$$

Определяем полную мощность и коэффициент мощности источника питания А:

$$\overset{\circ}{S}_1 = \overset{\circ}{S}_{1'} + \overset{\circ}{S}_{1''}$$

Определяем уровень напряжения у трансформаторных подстанций:

$$U_2 = U_1 - 2(\Delta U_{л.аг})$$

Результаты расчетов заносим в таблицу №14.

Таблица №14.

| Параметры  | Режимы сети  |             |                |
|--|--------------|-------------|----------------|
|  | максимальный | минимальный | послеаварийный |
| Полная мощность источника питания $A, S_1, \text{кВ} \cdot \text{А}$ |              |             |                |
| Уровень напряжения возле подстанции, кВ                              | Б            |             |                |
|  | В            |             |                |
|  | Г            |             |                |
| Коэффициент трансформации на подстанции, $K_T$                       | Б            |             |                |
|  | В            |             |                |
|  | Г            |             |                |

Определяем пределы регулирования коэффициентом трансформации силовых трансформаторов:

$$K_{T.\text{ном}}^{\pm} = \frac{U_{\text{ВН}} \pm 9 \cdot 1,78 \cdot \frac{U_{\text{ВН}}}{100\%}}{U_{\text{НН}}}$$

### **Список используемой литературы:**

- 1) Справочник по проектированию электроэнергетических систем. Под ред. С. С. Рокотяна и И. М. Шапиро – Москва: Энергоатомиздат, 1985.
- 2) Поспелов Г.Е., Федин В.Т. Проектирование электрических сетей и систем. – Минск: «Высшая школа», 1978.
- 3) Правила устройства электроустановок.
- 4) Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.240.30.010-2008 «Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35-750 кВ. Типовые решения», дата введения - 2007-12-20.