

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Фурсов Владимир Александрович

Должность: И.о. директора Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского

федерального университета

Дата подписания: 05.06.2026 09:53:28

Уникальный программный ключ:

1c378726a41fd0143ae5bccc8ba818c0b0b0a0b02

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования**

**«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Пятигорский институт (филиал) СКФУ**

### **Методические указания**

**по выполнению практических работ**

**по дисциплине «ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ»**

**для студентов направления подготовки**

**13.03.02 Электроэнергетика и электротехника**

Пятигорск 2026 г.

## Введение

Практические занятия создают оптимальные дидактические условия для деятельностного освоения студентами содержания и методологии изучаемой дисциплины «Электроэнергетические системы и сети». Практические занятия занимают преимущественное место при изучении профессиональных дисциплин. Практические занятия проводятся с целью выработки практических умений и приобретения навыков в решении задач, отработки упражнений, выполнении чертежей, производстве расчётов и т.п.

Целью практических занятий является формирование практических умений – профессиональных (выполнять определённые действия, операции, необходимые в последующем в профессиональной деятельности) или учебных, необходимых в последующей учебной деятельности по общепрофессиональным и профессиональным дисциплинам.

Подготовка специалистов в области электроэнергетики и электротехники предусматривает изучение основ передачи и распределения электроэнергии. Поэтому в методические указания включены наиболее характерные решения задач, отражающие основные разделы курса. Приведены примеры расчета параметров элементов электрических сетей и электрических нагрузок, расчета установившихся режимов, разомкнутых и простейших замкнутых сетей.

Разбор студентами конкретных практических решений будет способствовать более глубокому осмыслению физической сущности процессов, протекающих в электроэнергетических системах и сетях, при изучении теоретического материала.

Библиографический список содержит сведения о справочной литературе и дополнительных изданиях, необходимых для углубленного изучения отдельных вопросов.

## **1. Цель и задачи изучения дисциплины**

Целью изучения дисциплины является изучение элементов электроэнергетических систем и способов передачи и распределения электрической энергии, знакомство с устройством, электрооборудованием и режимами работы электроэнергетических систем и сетей и овладение основами расчета установившихся режимов электроэнергетических систем и сетей.

Задачами изучения дисциплины является освоение студентами современных методов проектирования и расчета режимов работы электрооборудования, приобретение навыков выбора схем электрических соединений и электрооборудования электрических подстанций и сетей на основе технико-экономических расчетов с учетом фактора надежности, расчетов и управления режимами электроэнергетических систем.

## **2. Оборудование и материалы**

Аппаратные средства: переносной ноутбук, проектор, интерактивная доска.

Учебная аудитория для проведения учебных занятий, оснащена оборудованием и техническими средствами обучения.

## **3 Наименование практических работ**

Для заочной формы обучения предусмотрены следующие практические работы: Практическое занятие № 3. Структуры, схемы, основное электрооборудование. – 2 часа; Практическое занятие № 4. Режимы работы и конструктивное выполнение – 2 часа. Практическое занятие № 27 Регулирование напряжения на понижающих подстанциях. Способы регулирования напряжения на ПС – 2 часа, Практическое занятие № 28 Проектирование электрических сетей питающих энергосистем – 2 часа, Практическое занятие №31 Выбор сечений ЛЭП. Выбор трансформаторов и автотрансформаторов – 2 часа.

| № Темы дисциплины | Наименование тем дисциплины, их краткое содержание                                   | Объем часов | Из них практическая подготовка, часов |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------|---------------------------------------|
| 5 семестр         |                                                                                      |             |                                       |
| 3                 | <b>Практическая работа №1.</b> Структуры, схемы, основное электрооборудование        | 2           | 2                                     |
| 4                 | <b>Практическая работа №2.</b> Режимы работы и конструктивное выполнение             | 2           | 2                                     |
| 6                 | <b>Практическая работа №3.</b> Параметры элементов ЭСЭС                              | 2           | 2                                     |
| 7                 | <b>Практическая работа №4.</b> Схемы замещения воздушных и кабельных линий.          | 2           |                                       |
| 8                 | <b>Практическая работа №5.</b> Схемы замещения трансформаторов и автотрансформаторов | 2           |                                       |
| 12                | <b>Практическая работа №6.</b> Натуральная мощность. Пропускная способность ЛЭП.     | 2           |                                       |
| 13                | <b>Практическая работа №7.</b> Характеристика                                        | 2           |                                       |

|           |                                                                                                                                 |    |  |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|--|
|           | сетевых задач. Типы конфигурации электрических сетей                                                                            |    |  |
| 14        | <b>Практическая работа № 8</b> Методы описания режимов сложных замкнутых электрических сетей                                    | 4  |  |
|           | <b>Итого за 5 семестр</b>                                                                                                       | 18 |  |
|           | <b>6 семестр</b>                                                                                                                |    |  |
| 17        | <b>Практическая работа №9.</b> Методы расчёта разомкнутых ЭС. Расчёт при заданном напряжении в конце ЛЭП                        | 2  |  |
| 18        | <b>Практическая работа №10.</b> Расчёт разомкнутой сети при заданном напряжении в начале ЛЭП                                    | 2  |  |
| 20        | <b>Практическая работа №11.</b> Расчет параметров установившихся режимов сетей с двухсторонним питанием                         | 4  |  |
| 3         | <b>Практическая работа №12.</b> Потери мощности и энергии в элементах электрических сетей                                       | 4  |  |
| 27        | <b>Практическая работа №13.</b> Регулирование напряжения в электрических сетях                                                  | 2  |  |
| 24        | <b>Практическая работа №14.</b> Баланс реактивной мощности. Расчет потокораспределения реактивной мощности                      | 2  |  |
| 19        | <b>Практическая работа №15.</b> Расчёт сети при нескольких номинальных напряжениях.                                             | 2  |  |
| 20        | <b>Практическая работа №16.</b> Распределение потоков мощности и напряжений в простых замкнутых сетях без учета потерь мощности | 4  |  |
| 24        | <b>Практическая работа №17.</b> Определение нагрузок, баланс реактивной мощности, установка компенсирующих устройств            | 2  |  |
| 23        | <b>Практическая работа №18.</b> Активная мощность. Регулирование частоты.                                                       | 2  |  |
| 28-30, 32 | <b>Практическая работа №19.</b> Элементы проектирования электрических сетей.                                                    | 10 |  |
|           | <b>Итого за 6 семестр</b>                                                                                                       | 36 |  |
|           | <b>Итого</b>                                                                                                                    | 54 |  |

#### **4. Содержание практических работ**

##### **Практическая работа №1 Схемы замещения элементов электрических сетей**

**Цель:** научиться составлять схемы замещения элементов электрических сетей

**Основы теории:**

Различают несколько типов схем электрических сетей: принципиальные схемы соединений; схемы замещения; расчетные (преобразованные) схемы замещения.

Все схемы трехфазных элементов ЭЭС, как правило, изображаются в однолинейном виде. На рис. 1.1 показаны все три вида схем, состоящих из одной ЛЭП и одного двухобмоточного трансформатора с нагрузкой на стороне низкого напряжения.

Такой схемой замещения, как на рис 1.1, б, удобно пользоваться, когда выполняется одиночный расчет простых схем, как правило, в учебных целях без использования специальных программ. В большинстве случаев при расчетах режимов электрических сетей используется расчетная схема рис. 1.1, в или подобная ей, где задаются электрические параметры элементов сети.

Совершенно естественным является удаление из схемы элементов, влияние которых на режим сети пренебрежимо мало. Так, не учитывают:

- потери на корону в ВЛ до 220 кВ;
- зарядную мощность в ЛЭП до 35 кВ, а для коротких ВЛ и ПО кВ;

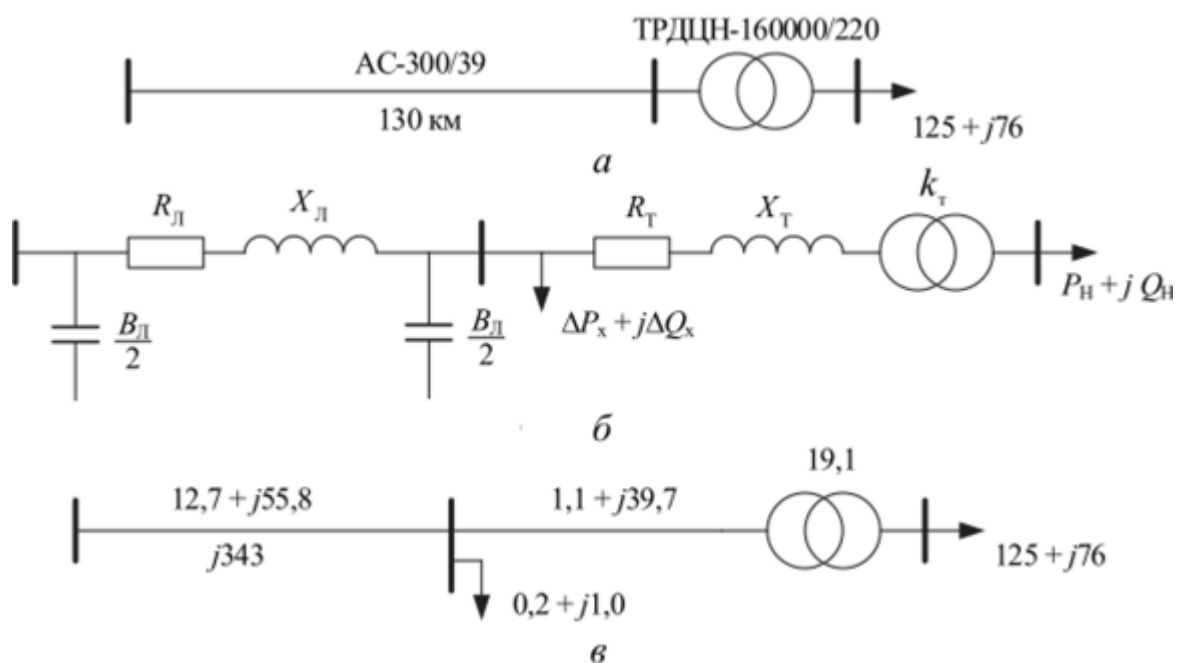


Рисунок 1.1 – Схема замещения

а - принципиальная схема; б - схема замещения; в - расчетная схема (сопротивления в омах, проводимости в микросименсах, мощности в

мегавольт- амперах, коэффициент трансформации в относительных единицах)

- потери холостого хода трансформаторов, если не нужно решать вопросы повышения экономичности работы электрических сетей;
- активные сопротивления обмоток трансформаторов, если не нужно оценивать потери электрической энергии и решать вопросы повышения экономичности работы электрических сетей.

В трехобмоточных трансформаторах и автотрансформаторах индуктивное сопротивление обмоток СН принимают равным нулю и при пренебрежении активным сопротивлением получается ветвь с нулевым сопротивлением. В таких случаях можно приблизительно оценить потери реактивной мощности в обмотке НН, сложить эти потери с реактивной мощностью нагрузки НН и добавить полученную мощность на шины СН. Трехлучевая схема замещения трансформатора превращается в одну ветвь с сопротивлением обмотки ВН и трансформацией с ВН на СН; кв\_с.

Современные программы расчета режимов в энергосистемах вообще не предполагают составления схем замещения или расчетных схем и используют принципиальные схемы, в которых указываются марки (тип) оборудования, число параллельных элементов и расстояния между подстанциями, которые соединяются посредством ЛЭП. Кроме того, все оборудование ЭЭС, нагрузки и варианты схем соединений закладываются в специализированные базы данных, на основе которых ведется формирование схем для расчетов различных режимов.

В тех случаях, когда необходимо составить схему замещения сети с параллельными элементами (две цепи ЛЭП, два трансформатора и т. п.) или упростить расчетную схему, выполняются последовательно-параллельные преобразования схем. В некоторых случаях выполняются преобразования треугольника в звезду и наоборот.

В практике расчетов установившихся режимов электрических сетей получило распространение понятие расчетной нагрузки подстанций, которая

по сути является эквивалентным представлением части схемы электрической сети. Основная цель введения расчетной нагрузки подстанции - это упрощение схемы. В расчетную (эквивалентную) нагрузку подстанции включают саму электрическую нагрузку, потери в трансформаторе (в обмотках и в магнитопроводе - потери холостого хода), а иногда и зарядную мощность подходящих к подстанции ЛЭП. На рис. 1.2 показаны эквивалентные схемы с расчетными нагрузками подстанции из рис. 1.2, б.

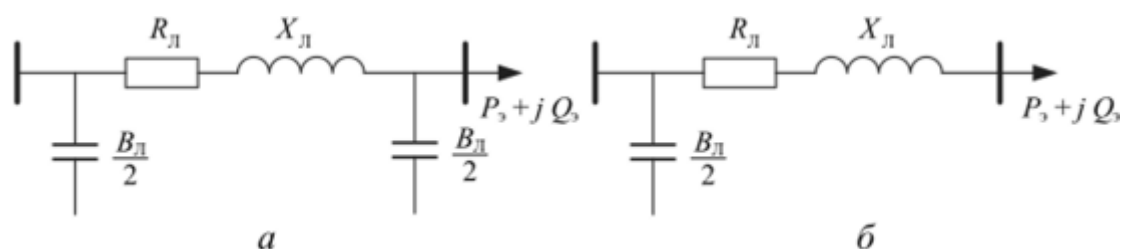


Рисунок 1.2 – Эквивалентные схемы замещения для электрической сети  
а - при эквивалентировании трансформатора б- при эквивалентировании трансформатора и зарядной емкости, подходящей ЛЭП

### **Задание:**

#### **Задача №1**

Определить погонные параметры двухцепной ВЛ 110 кВ с проводами марки АС150/24, расположенными на П-образных деревянных опорах, с расстоянием между соседними фазами по горизонтали 4 м. Составить схему замещения такой линии и вычислить ее параметры, принимая длину линии равной 100 км.

#### **Задача №2**

На понижающей подстанции установлены два трансформатора типа ТДН 10000/110 со следующими каталожными данными:  $U_{B\text{ ном}}=115\text{ кВ}$ ,  $U_{H\text{ ном}}=11\text{ кВ}$ ,  $\Delta P_k=60\text{ кВт}$ ,  $u_k=10.5\%$ ,  $\Delta P_x=11\text{ кВт}$ ,  $I_{xx}=0.9\%$ .

Определить приведенные к стороне высшего напряжения параметры схемы замещения двух параллельно включенных трансформаторов и вычис-

лечь потери мощности в них при нагрузке на шинах низшего напряжения  $S_2=12+j7.2 \text{ MVA}$ ,  $\cos \varphi_2=0.85$ .

### Задача №3

На узловой подстанции районной электрической сети установлены два трехобмоточных трансформатора типа *ТДЦТН 63000/220* с соотношением мощностей обмоток  $100\%/100\%/100\%$  и со следующими каталожными данными:  $U_{B \text{ ном}}=230 \text{ кВ}$ ,  $U_{C \text{ ном}}=38,5 \text{ кВ}$ ,  $U_{H \text{ ном}}=11 \text{ кВ}$ ,  $u_{к \text{ В-С}}=12.5\%$ ,  $u_{к \text{ В-Н}}=24\%$ ,  $u_{к \text{ С-Н}}=10.5\%$ ,  $\Delta P_{к \text{ В-Н}}=320 \text{ кВт}$ ,  $\Delta P_{хх}=91 \text{ кВт}$ ,  $I_{хх}=1\%$ . Нагрузка на шинах среднего и низшего напряжения  $S_2=40+j30 \text{ MVA}$ ,  $S_3=40+j30 \text{ MVA}$ .

Определить приведенные к стороне высшего напряжения параметры схемы замещения двух параллельно включенных трансформаторов и вычислить суммарные потери мощности в них по каталожным данным.

### Задача №4

Составить схему замещения электрической сети (рис.1. ). исходные данные: ЛЭП1 длиной 160 км выполнена проводом 2АС-300х2, номинальное напряжение 330 кВ; ЛЭП2 длиной 90 км выполнена проводом 4АС-300, номинальное напряжение 220 кВ; Т1-автотрансформатор 3АТДЦТН-240000/330/220; мощности нагрузок  $P_4=400 \text{ МВт}$ ,  $P_5=50 \text{ МВт}$ ,  $\cos \varphi=0.9$

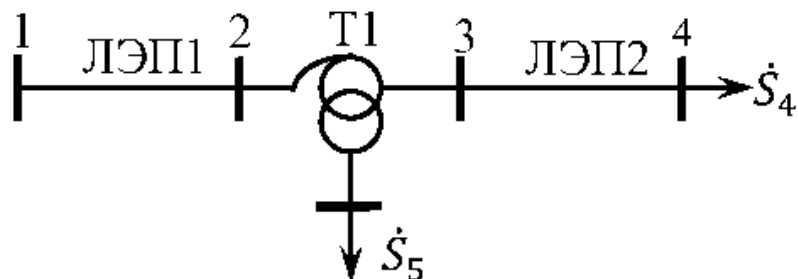


Рисунок – Исходная схема сети

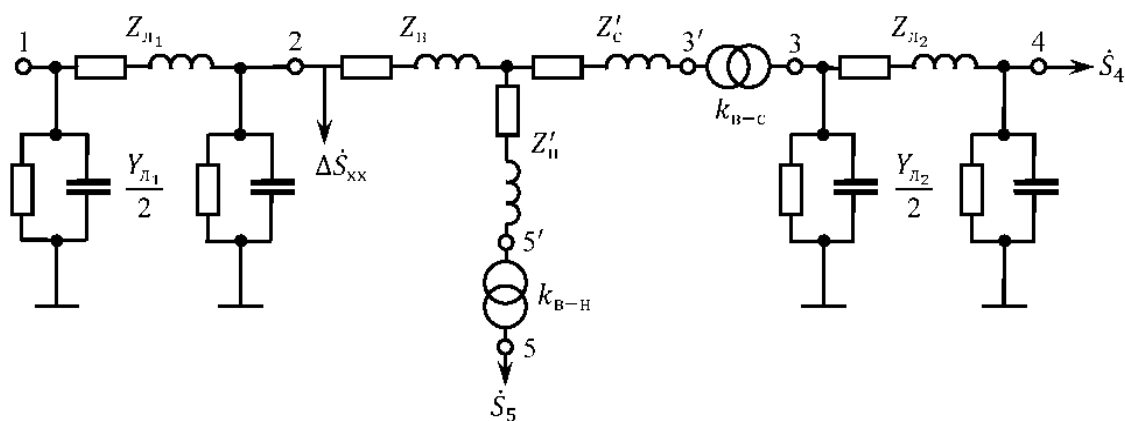


Рисунок – Схема замещения сети

### **Контрольные вопросы:**

1. Классификация электрических сетей?
2. Схемы замещения электрических линий местных и районных электрических сетей.
3. Схемы замещения трансформаторов (автотрансформаторов)?

## **Практическая работа №2 Потери мощности и энергии в элементах электрических сетей**

**Цель:** научиться определять потери мощности в трансформаторах и линиях электропередачи

### **Основы теории:**

Для количественной характеристики работы элементов электрической сети рассматриваются ее рабочие режимы. Рабочий режим – это установившееся электрическое состояние, которое характеризуется значениями токов, напряжений, активной, реактивной и полной мощностей.

Основной целью расчета режимов является определение этих параметров, как для проверки допустимости режимов, так и для обеспечения экономичности работы элементов сетей.

Определение значений токов в элементах сети и напряжений в ее узлах начинается с построения картины распределения полной мощности по эле-

менту, т.е. с определения мощностей в начале и конце каждого элемента. Таковую картину называют потокораспределением.

Рассчитывая мощности в начале и в конце элемента электрической сети, учитывают потери мощности в сопротивлениях элемента и влияние его проводимостей.

Потери активной мощности на участке ЛЭП (см. рис. 2.1) обусловлены активным сопротивлением проводов и кабелей, а также несовершенством их изоляции. Мощность, теряемая в активных сопротивлениях трехфазной ЛЭП и расходуемая на ее нагрев, определяется по формуле:

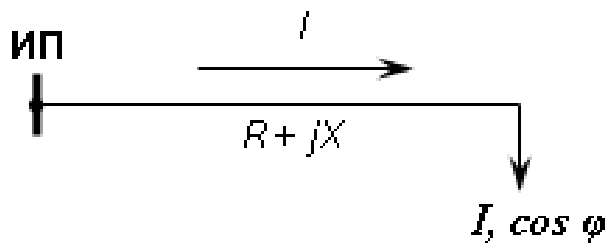


Рисунок 2.1 – К расчету потерь мощности в ЛЭП

$$\begin{aligned}\Delta P &= 3I^2 R = 3 \cdot [(I \cos \varphi)^2 + (I \sin \varphi)^2] \cdot R = \\ &= 3 \cdot (I_a^2 + I_p^2) \cdot R = 3 \cdot \left[ \left( \frac{P}{\sqrt{3}U} \right)^2 + \left( \frac{Q}{\sqrt{3}U} \right)^2 \right] \cdot R = \\ &= 3 \cdot \left( \frac{P^2}{3U^2} + \frac{Q^2}{3U^2} \right) \cdot R = \frac{P^2 + Q^2}{3U^2} R = \frac{S^2}{3U^2} R\end{aligned}$$

где  $I$ ,  $I_a$ ,  $I_p$  – полный, активный и реактивный токи в ЛЭП;

$P$ ,  $Q$ ,  $S$  – активная, реактивная и полная мощности в начале или конце ЛЭП;

$U$  – линейное напряжение в начале или конце ЛЭП;

$R$  – активное сопротивление одной фазы ЛЭП.

Потери активной мощности в проводимостях ЛЭП обусловлены несовершенством изоляции. В воздушных ЛЭП – появлением короны и, в очень незначительной степени, утечкой тока по изоляторам. В кабельных ЛЭП – появлением тока проводимости, а его абсорбции. Рассчитываются потери по формуле:

$$\Delta P = U^2 \cdot G$$

где  $U$  – линейное напряжение в начале или конце ЛЭП;

$G$  – активная проводимость ЛЭП.

При проектировании воздушных ЛЭП потери мощности на корону стремятся свести к нулю, выбирая такой диаметр провода, когда возможность возникновения короны практически отсутствует.

Потери реактивной мощности на участке ЛЭП обусловлены индуктивными сопротивлениями проводов и кабелей. Реактивная мощность, теряемая в трехфазной ЛЭП, рассчитывается аналогично мощности, теряемой в активных сопротивлениях:

$$\Delta Q = 3I^2 X = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} X = \frac{S^2}{U^2} X.$$

Генерируемая емкостной проводимостью зарядная мощность ЛЭП рассчитывается по формуле:

$$\Delta Q_c = U^2 \cdot B$$

где  $U$  – линейное напряжение в начале или конце ЛЭП;

$B$  – реактивная проводимость ЛЭП.

Зарядная мощность уменьшает реактивную нагрузку сети и тем самым снижает потери мощности в ней.

Потери мощности и электроэнергии достигают значительных величин и являются одним из основных фактов, влияющих на экономичность сетей. Их величина регламентируется постановлениями Национального комитета по регулированию электроэнергии (НКРЭ) в сетях напряжением до 35 кВ и в сетях напряжением 35 кВ и выше.

Большая часть потерь электроэнергии (60 – 70%) приходится на сети напряжением 6 – 10 кВ. Поэтому перечисленные ниже мероприятия относятся к сетям этих напряжений и к электроприемникам:

- применение более высокой ступени напряжения (10 кВ вместо 6 кВ);

- повышение уровня напряжения в сети путем применения устройств регулирования напряжения;
- регулирование потоков активной и реактивной мощностей в отдельных звеньях сети;
- применение рациональных схем питания потребителей, которые позволяют осуществлять более экономичную загрузку ЛЭП и трансформаторов;
- рационализация энергохозяйств предприятий – улучшение  $\cos\varphi$ , правильный выбор мощности и загрузка электродвигателей.

При передаче электроэнергии часть ее расходуется на нагрев, создание электромагнитных полей и другие эффекты. Этот расход принято называть потерями. В электроэнергетике термин “потери” имеет специфическое значение. Если в других производствах потери связаны с браком продукции, то потери электроэнергии – это технологический расход на ее передачу.

Величина потерь электроэнергии зависит от характера изменения нагрузки в рассматриваемый период времени. Например, в ЛЭП, работающей с неизменной нагрузкой, потери электроэнергии за время  $t$  рассчитываются следующим образом:

$$\Delta W = \Delta P \cdot t,$$

где  $\Delta P$  – суммарные потери активной мощности в сопротивлении и проводимости ЛЭП.

Если нагрузка меняется, то потери электроэнергии можно рассчитать различными способами. В зависимости от используемой математической модели методы делятся на две группы:

- детерминированные;
- вероятностно-статистические.

Наиболее точным из детерминированных методов является метод расчета потерь электроэнергии по графику нагрузок для каждого потребителя.

Предположим, что нагрузка потребителя в году менялась по следующему графику (см. рис. 2.2). Тогда

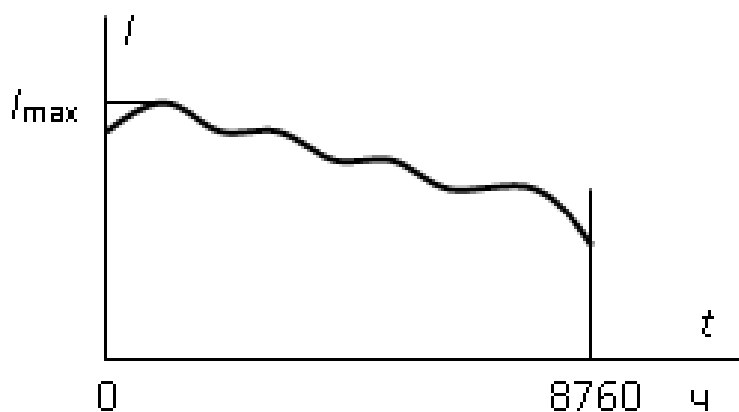


Рисунок 2.2 – График нагрузки потребителя

Интеграл – это фактически площадь, ограниченная графиком изменения квадрата тока. Таким образом, потери активной электроэнергии пропорциональны площади квадратичного годового графика нагрузки.

Так как напряжение на шинах электроприемника меняется незначительно, то его значение можно считать неизменным. Заменяя интеграл суммой площадей прямоугольников с шагом  $\Delta t_i$ , получим:

$$\Delta W = \frac{R}{U^2} \sum_{i=1}^n S_i^2 \cdot \Delta t_i = \frac{R}{U^2} \sum_{i=1}^n (P_i^2 + Q_i^2) \cdot \Delta t_i$$

Потери электроэнергии в трансформаторах при заданном графике нагрузки при использовании его паспортных данных рассчитываются по формулам:

- для двухобмоточных

$$\Delta W_T = [n \cdot \Delta P_x + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_k (\frac{S}{S_{ном}})^2] \cdot \Delta t_i;$$

- для трехобмоточных трансформаторов (автотрансформаторов)

$$\Delta W_T = \{n \cdot \Delta P_x + \frac{1}{n} [\Delta P_{кв} (\frac{S_B}{S_{ном}})^2 + \Delta P_{кс} (\frac{S_c}{S_{ном}})^2 + \Delta P_{кн} (\frac{S_H}{S_{ном}})^2]\} \cdot \Delta t_i.$$

Достоинство метода – высокая точность расчета. Недостаток – большое количество вычислений.

Графики нагрузок не всегда известны. В этом случае потери электроэнергии можно вычислить другим детерминированным методом – через  $\tau_m$ . Метод основан на двух допущениях:

- максимальные потери в электрической сети наблюдаются в период максимума нагрузки в энергосистемы (утренний максимум с 9 до 11 часов; вечерний – с 17 до 21 часа);
- графики активной и реактивной мощности подобны, т.е. график реактивной мощности пересчитан из графика активной мощности.

Время максимальных потерь  $\tau_m$  – это время, в течении которого при работе потребителя с максимальной нагрузкой из сети потребляется такое же количество электроэнергии, что и при работе по реальному графику нагрузки. Исходя из определения, запишем:

$$\Delta W = \frac{R}{U^2} \sum_{i=1}^n (P_i^2 + Q_i^2) \cdot \Delta t_i = \frac{R}{U^2} (P_{\max}^2 \cdot \tau_a + Q_{\max}^2 \cdot \tau_p)$$

где  $\tau_a$ ,  $\tau_p$  – соответственно время максимальных потерь для активной и реактивной нагрузок.

На практике эти значения усредняют и заменяют общим –  $\tau_m$ . Тогда,

$$\Delta W = \frac{R}{U^2} S_{\max}^2 \cdot \tau_m.$$

Для типовых графиков нагрузки величина  $\tau_m$  определяется по известной величине  $T_m$ :

$$\tau_m = (0,124 + \frac{T_m}{10000})^2 \cdot 8760.$$

В соответствии с этим методом потери электроэнергии в элементах сети рассчитываются по формулам:

- в линии электропередач

$$\Delta W = \Delta P_{\max} \cdot \tau_m;$$

- в двухобмоточных трансформаторах

$$\Delta W_T = n \cdot \Delta P_x \cdot 8760 + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_k \left( \frac{S}{S_{\text{НОМ}}} \right)^2 \cdot \tau_m$$

- в трехобмоточных трансформаторах (автотрансформаторах)

$$\Delta W_T = n \cdot \Delta P_x \cdot 8760 + \frac{1}{n} \left[ \Delta P_{KB} \left( \frac{S_B}{S_{НОМ}} \right)^2 \cdot \tau_{MB} + \Delta P_{KC} \left( \frac{S_C}{S_{НОМ}} \right)^2 \cdot \tau_{MC} + \Delta P_{KH} \left( \frac{S_H}{S_{НОМ}} \right)^2 \cdot \tau_{MH} \right].$$

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{max\ i} \cdot T_{M\ i}}{\sum_{i=1}^n P_{max\ i}}.$$

Аналогично определяется величина  $\tau_m$  для ЛЭП, питающей несколько потребителей.

Потери мощности и электроэнергии достигают значительных величин и являются одним из основных фактов, влияющих на экономичность сетей. Их величина регламентируется постановлениями Национального комитета по регулированию электроэнергии (НКРЭ) в сетях напряжением до 35 кВ и в сетях напряжением 35 кВ и выше.

Большая часть потерь электроэнергии (60 – 70%) приходится на сети напряжением 6 – 10 кВ. Поэтому перечисленные ниже мероприятия относятся к сетям этих напряжений и к электроприемникам:

- применение более высокой ступени напряжения (10 кВ вместо 6 кВ);
- повышение уровня напряжения в сети путем применения устройств регулирования напряжения;
- регулирование потоков активной и реактивной мощностей в отдельных звеньях сети;
- применение рациональных схем питания потребителей, которые позволяют осуществлять более экономичную загрузку ЛЭП и трансформаторов;
- рационализация энергохозяйств предприятий – улучшение  $\cos\varphi$ , правильный выбор мощности и загрузка электродвигателей.

**Задание:**

### Задача №1

Определить потери мощности и годовые потери электроэнергии для сети, представленной на рисунке 2.3, нагрузки, показанные на схеме, соответствуют максимальному режиму. График нагрузки приведен на рисунке 2.4. Напряжение в питающем узле 1 равно 525 кВ.

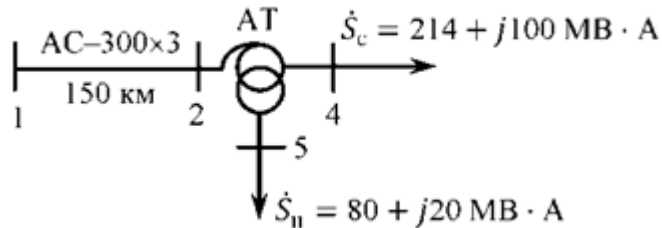


Рисунок 2.3 – Схема сети

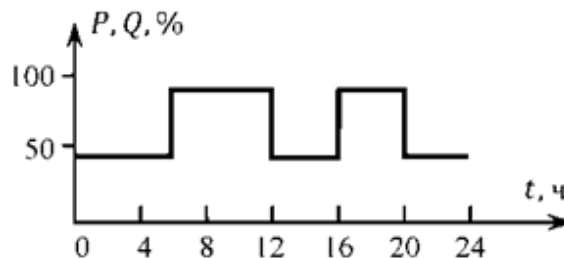


Рисунок 2.4 – График нагрузки

### Задача №2

Определить потери энергии за год в трансформаторах типа 2ТРДН-10000/110,  $T_{max}=6000$  ч, нагрузка в максимальном режиме  $S_{нагр}=15+j10$  МВА. Каталожные данные:  $\Delta P_{кз}=60$  кВт,  $\Delta P_{xx}=18$  кВт.

### Задача №3

На подстанции установлено два трансформатора ТРДЦН-63000/220, которые питаются по двум воздушным линиям сечением АС-400 и длиной 100 км. Нагрузка подстанции в максимальном режиме 100 МВт,  $\cos\varphi=0,9$ .

Определить потери энергии за год и КПД электропередачи по энергии, если задан годовой график нагрузки по продолжительности.

Годовой график по продолжительности

|              |          |             |             |             |
|--------------|----------|-------------|-------------|-------------|
| $t$ , ч      | 0 – 2100 | 2100 – 4000 | 4000 – 6400 | 6400 – 8760 |
| $P$ , отн.ед | 1        | 0,7         | 0,5         | 0,3         |

### ***Контрольные вопросы:***

1. Характер потерь мощности и электроэнергии в различных элементах электрических сетей?
2. Виды потерь мощности. Определение потерь электроэнергии в электрических линиях с помощью графиков нагрузки и с использованием времени максимальных потерь?
3. Определение потерь мощности и электроэнергии в трансформаторах и автотрансформаторах. Меры по снижению потерь мощности и электроэнергии.

### ***Практическая работа №3***

#### ***Расчет параметров установившихся режимов разомкнутых электрических цепей***

***Цель:*** научиться проводить электрический расчет сети

#### ***Основы теории:***

Электрическая сеть высокого напряжения для передачи и распределения электроэнергии относится к категории электрических цепей, поэтому для расчета ее режима применяются общие методы теории цепей. Пусть задана мощность некоторой нагрузки  $S_i = P_i + jQ_i$  узла  $i$ , которая должна быть учтена наряду с другими нагрузками при расчете режима сети. Однако именно напряжения в узлах сети являются искомыми величинами. Это обстоятельство препятствует непосредственному использованию законов Кирхгофа для получения однозначного решения, поэтому нашли применение и другие методы решения, в том числе метод последовательных приближений (итерационный метод).

Метод последовательных приближений основан на последовательном уточнении напряжений в узлах электрической сети, причем в качестве

начального приближения может быть использовано разумное допущение о том, что напряжения во всех узлах в нормальном режиме не могут существенно отличаться от номинального напряжения данного класса сети.

Введение такого допущения позволяет определить приближенно потери мощности на каждом участке сети, мощности в начале и конце каждого участка и токи нагрузок.

Значение тока на участке или мощности в начале участка, непосредственно связанного с узлом, где напряжение считается известным, является достаточным для того, чтобы определить напряжение в конце этого участка. В свою очередь, становится возможным расчет напряжения в конце следующего участка и т. д.

Процесс продолжается до тех пор, пока значения напряжений во всех узлах, полученные после выполнения данной итерации, не будут отличаться от напряжений, полученных на предыдущей итерации, менее чем на заданную величину точности расчета.

### ***Задание:***

#### ***Задача №1***

Определить напряжение в конце воздушной линии 500 кВ в нагрузочном режиме  $S_2 = 800 + j300$  и в режиме холостого хода, построить векторные диаграммы токов напряжений. Схема сети приведена на рисунке 3.1. Расчет выполнить без учета потерь на корону.

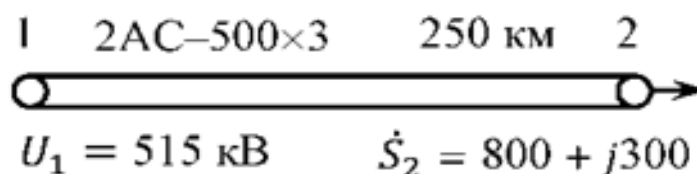


Рисунок 3.1 – Схема сети

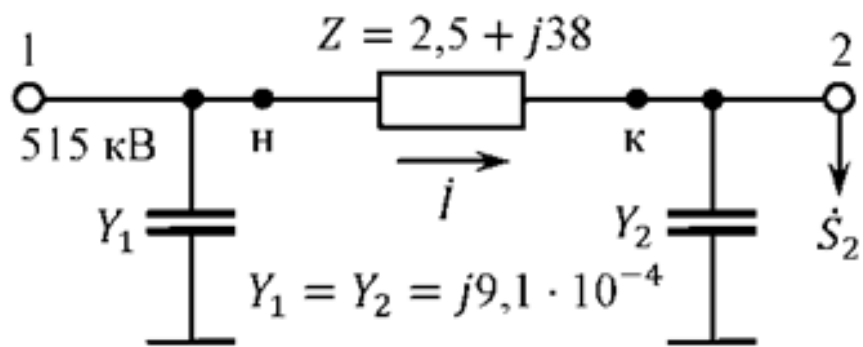


Рисунок 3.2 – Схема замещения сети

### Задача №2

Построить векторные диаграммы токов и напряжений электрической сети без учета потерь мощности для сети, схема замещения которой представлена на рисунке 3.3

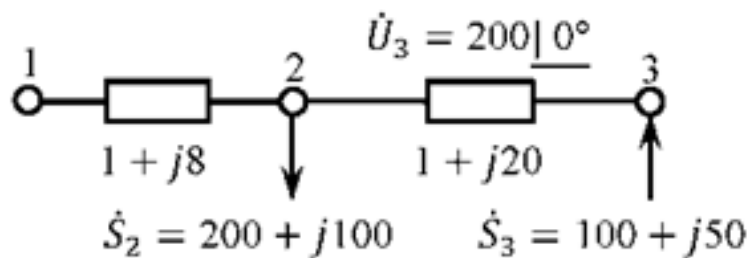


Рисунок 3.3 – Схема замещения сети

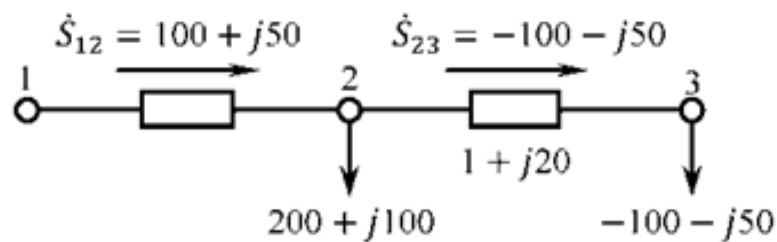


Рисунок 3.4 – Потокораспределение без потерь мощности

### Задача №3

Определить напряжение в узле А в сети с равномерно распределенной нагрузкой, плотность нагрузки  $p=0,3$  МВт/км. Схема сети показана на рисунке 3.5, напряжение базисного узла  $U=3,3$  кВ, нагрузка узла А  $S_A=2+j1,6$  МВА,

длины линий приведены на схеме. При решении принять  $R_0=0.1$  Ом/км,  $X_0=0,2$  Ом/км. Потерями мощности пренебречь.

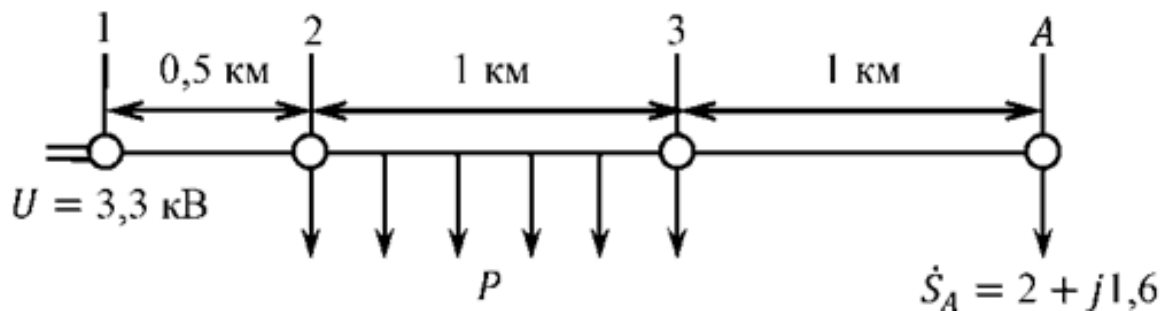


Рисунок 3.5 – Исходная схема

#### **Задача №4**

Выполнить электрический расчет сети, показанной на рисунке 3.6. Линия выполнена сечением 2АС-400, длина линии 100 км, два трансформатора ТРДЦН-63000/220, нагрузка  $P_3=100$  МВт,  $\cos\varphi=0,9$ , напряжение базисного узла 230 кВ.

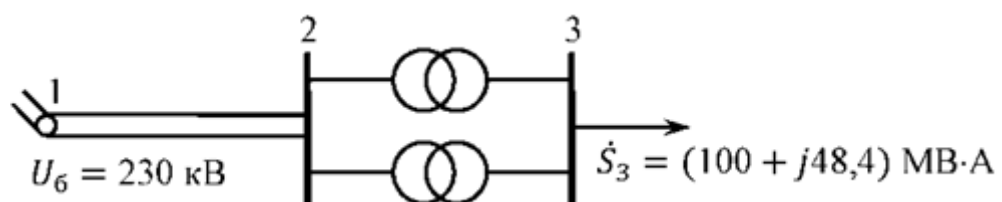


Рисунок 3.6 – Исходная схема сети

#### **Контрольные вопросы:**

1. Анализ различных режимов работы электрической линии. Влияние емкостных токов на режимные параметры.
2. Аналитическая зависимость между напряжениями начала и конца звена электрической сети.
3. Расчет напряжений в конце и начале линии электропередачи в различных режимах.

#### **Практическая работа №4**

#### **Расчет параметров установившихся режимов сетей с двухсторонним питанием**

**Цель:** научиться проводить электрический расчет сети с двухсторонним питанием

**Основы теории:**

Линии с двухсторонним питанием в последнее время получают все более широкое распространение в практике сельской электрификации.

Основное преимущество их заключается в повышении надежности электроснабжения. Недостатками являются: большие затраты при сооружении, трудоемкость расчетов и сложная релейная защита.

Сложность расчета замкнутых сетей, частным случаем которых является линия с двухсторонним питанием, заключается в определении мощностей (токов) по участкам схемы, то есть в распределении мощностей (токов) по сети.

Мощность, поступающая в линию от источника питания А, определяется формулой:

$$S_{A-1} = \frac{\sum_i^n (S_i z_{ib})}{Z_{AB}} + \frac{U_A - U_B}{Z_{AB}} U_n$$

где  $S$  - мощность нагрузки, присоединенной в  $i$ -й точке схемы, ВА;

$Z_{ib}$  - сопротивление линии от точки присоединения нагрузки  $i$  до источника, В;

$Z_{AB}$  - сопротивление всей линии, Ом;

$U_n$  — номинальное напряжение линии, В.

Расчет аварийного режима, когда один из источников питания отключен, значительно упрощается, так как ничем не отличается от расчета радиальной схемы.

Когда известно распределение мощностей, потери напряжения на участках линии с двухсторонним питанием определяются по тем же формулам, что и для радиальной схемы, то есть

$$\Delta U = \frac{P_r + Q_x}{U_H}.$$

Максимальной потерей напряжения нормального режима линии с двухсторонним питанием называется сумма потерь напряжения на отдельных участках схемы от источника питания до точки токораздела, то есть

$$\Delta U_{\max} = \Delta U_{A-1} + \Delta U_{1-2} + \dots$$

### Задание:

#### Задача №1

Определить потокораспределение в сети, приведенной на рисунке 4.1 без учета потерь мощности и генерации линий и напряжения узлов. Построить векторные диаграммы напряжений и токов. Нагрузки заданы в мегавольт-амперах, сопротивления – в омах.

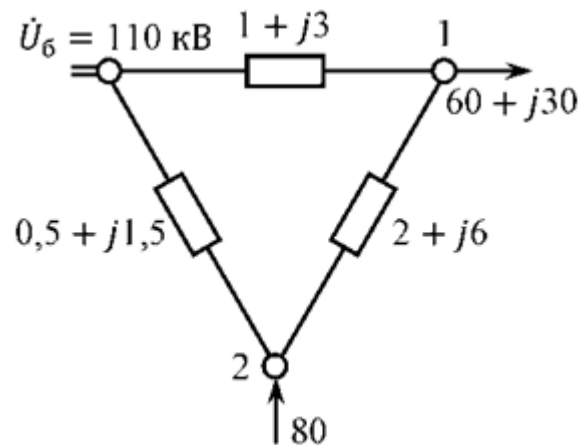


Рисунок 4.2 – Исходная схема

#### Задача №2

Определить токи в ветвях сети линии с двухсторонним питанием с разными напряжениями по концам передачи:  $U_A=115$  кВ,  $U_B=110$  кВ. Схема замещения сети приведена на рисунке 4.2, токи указаны в килоамперах, сопротивление в омах.

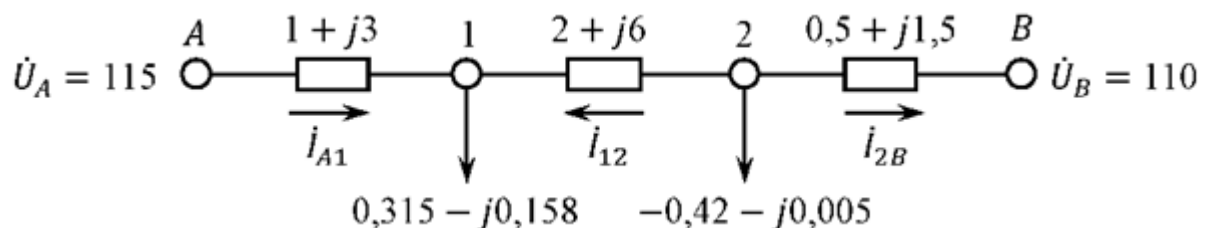


Рисунок 4.2 – Схема замещения сети

#### Задача №3

Определить параметры режима, потери активной мощности в процентах от передаваемой мощности и КПД двухцепной линии 220 кВ, протяженностью 200 км, с проводами АС300/39. Погонные параметры такой линии равны  $r_0=0.098 \text{ Ом/км}$ ,  $x_0=0,424 \text{ Ом/км}$ , активной проводимостью линий пренебречь  $b_0=2.68 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}$ . Мощность и напряжение в конце линии соответственно равны  $S_2=240+j116 \text{ МВА}$ ,  $\cos\phi_2=0.9$ ,  $U_2=218 \text{ кВ}$ .

#### **Задача №4**

От шин 110 кВ узловой подстанции А энергосистемы Центральной Сибири по кольцевой сети осуществляется электроснабжение трех понижающих подстанций, расчетные нагрузки которых равны:

$$S_1 = 25 + j15 = 29.2 \angle 31^\circ \text{ МВА};$$

$$S_2 = 30 + j20 = 36.1 \angle 33^\circ 40' \text{ МВА};$$

$$S_3 = 40 + j16 = 43 \angle 21^\circ 50' \text{ МВА}.$$

Таблица 4.1 – Параметры участков кольцевой линии

| Линия | Марка провода | $r_0, \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$ | $x_0, \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$ | $l_0, \text{км}$ | $r_1, \text{Ом}$ | $x_1, \text{Ом}$ |
|-------|---------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| А-1   | АС 240        | 0,122                              | 0,401                              | 20               | 2,44             | 8,02             |
| 1-2   | АС 185        | 0,159                              | 0,409                              | 20               | 3,18             | 8,18             |
| 2-3   | АС 95         | 0,314                              | 0,429                              | 30               | 9,42             | 12,87            |
| 3-А   | АС 240        | 0,122                              | 0,401                              | 50               | 6,10             | 20,05            |

Выполнить расчет нормального режима работы сети при напряжении на шинах подстанции А 121 кВ. Предварительный расчет потокораспределения в кольце выполнить двумя способами (по длинам и по сопротивлениям участков). Определить суммарную мощность, поступающую в кольцевую сеть с шин подстанции А и наибольшую потерю напряжения в процентах от напряжения на шинах подстанции А.

#### **Контрольные вопросы:**

1. Какая точка в сети называется точкой потоко раздела?
2. В чем отличие расчёта замкнутых сетей от разомкнутых?

3. Анализ различных режимов работы электрической линии. Влияние емкостных токов на режимные параметры.
4. Аналитическая зависимость между напряжениями начала и конца звена электрической сети.
5. Расчет напряжений в конце и начале линии электропередачи в различных режимах.

### ***Практическая работа №5***

#### ***Расчет режимов замкнутых электрических сетей***

**Цель:** научиться проводить электрический расчет замкнутых электрических сетей

#### ***Основы теории:***

К простым замкнутым сетям относятся кольцевые сети и сети с двухсторонним питанием. Кольцевую сеть можно превратить в сеть с двухсторонним питанием, если разрезать ее по источнику питания.

Рассмотрим ЛЭП с двухсторонним питанием (рис. 5.1). Известны:

- мощности нагрузок;
- сопротивления участков ЛЭП;
- напряжения на источниках питания.

Необходимо найти распределение мощностей на участках ЛЭП. Расчет выполним при следующих допущениях:

- в ЛЭП отсутствуют потери мощности;

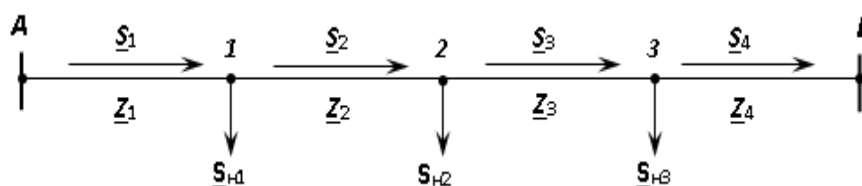


Рисунок 5.1 – Линия электропередач с двухсторонним питанием

Предположим, что нам известна мощность, протекающая на головном участке А-1. Тогда мощности на других участках ЛЭП определяются по I закону Кирхгофа:

$$\underline{S}_2 = \underline{S}_{12} = \underline{S}_1 - \underline{S}_{н1};$$

$$\underline{S}_3 = \underline{S}_{23} = \underline{S}_2 - \underline{S}_{н2} = \underline{S}_1 - \underline{S}_{н1} - \underline{S}_{н2};$$

$$\underline{S}_4 = \underline{S}_{3В} = \underline{S}_3 - \underline{S}_{н3} = \underline{S}_1 - \underline{S}_{н1} - \underline{S}_{н2} - \underline{S}_{н3}.$$

Падение напряжение на любом участке ЛЭП рассчитывается по формуле:

$$\Delta \underline{U}_i = \sqrt{3} \cdot \underline{I}_i \cdot \underline{Z}_i$$

Из формулы для расчета мощности на участке ЛЭП ( $\underline{S}_i = \sqrt{3} \cdot \underline{I}_i^* \cdot \underline{U}_i$ ) найдем ток участка:

$$\underline{I}_i = \frac{\underline{S}_i^*}{\sqrt{3} \cdot \underline{U}_i^*}$$

$$\Delta \underline{U}_i = \sqrt{3} \cdot \frac{\underline{S}_i^*}{\sqrt{3} \cdot \underline{U}_i^*} \cdot \underline{Z}_i = \frac{\underline{S}_i}{\underline{U}_i} \cdot \underline{Z}_i^*$$

При учете второго допущения получим:

$$\Delta \underline{U}_i = \frac{\underline{S}_i}{U_{ном}} \cdot \underline{Z}_i^*$$

Найдем падение напряжения во всей ЛЭП:

$$\underline{U}_A - \underline{U}_B = \frac{\underline{S}_1 \cdot \underline{Z}_{A1}^*}{U_{ном}} + \frac{\underline{S}_2 \cdot \underline{Z}_{12}^*}{U_{ном}} + \frac{\underline{S}_3 \cdot \underline{Z}_{23}^*}{U_{ном}} + \frac{\underline{S}_4 \cdot \underline{Z}_{3В}^*}{U_{ном}}$$

или

$$(\underline{U}_A - \underline{U}_B) \cdot U_{ном} = \underline{S}_1 \cdot \underline{Z}_{A1}^* + \underline{S}_2 \cdot \underline{Z}_{12}^* + \underline{S}_3 \cdot \underline{Z}_{23}^* + \underline{S}_4 \cdot \underline{Z}_{3В}^*.$$

В полученное выражение подставим значения токов участков:

$$\begin{aligned} (\underline{U}_A - \underline{U}_B) \cdot U_{ном} = & \underline{S}_1 \cdot \underline{Z}_{A1}^* + (\underline{S}_1 - \underline{S}_{н1}) \cdot \underline{Z}_{12}^* + (\underline{S}_1 - \underline{S}_{н1} - \underline{S}_{н2}) \cdot \underline{Z}_{23}^* + \\ & + (\underline{S}_1 - \underline{S}_{н1} - \underline{S}_{н2} - \underline{S}_{н3}) \cdot \underline{Z}_{3В}^* \end{aligned}$$

Выполним преобразования:

$$(\underline{U}_A - \underline{U}_B) \cdot U_{\text{ном}} = \underline{S}_1 \cdot (\underline{Z}_{A1}^* + \underline{Z}_{12}^* + \underline{Z}_{23}^* + \underline{Z}_{3B}^*) - \underline{S}_{\text{н1}} \cdot (\underline{Z}_{12}^* + \underline{Z}_{23}^* + \underline{Z}_{3B}^*) - \\ - \underline{S}_{\text{н2}} \cdot (\underline{Z}_{23}^* + \underline{Z}_{3B}^*) - \underline{S}_{\text{н3}} \cdot \underline{Z}_{3B}^*$$

Суммы сопротивлений представляют собой сопротивления:

$$(\underline{Z}_{A1}^* + \underline{Z}_{12}^* + \underline{Z}_{23}^* + \underline{Z}_{3B}^*) = \underline{Z}_{AB}^*; (\underline{Z}_{12}^* + \underline{Z}_{23}^* + \underline{Z}_{3B}^*) = \underline{Z}_{1B}^*; (\underline{Z}_{23}^* + \underline{Z}_{3B}^*) = \underline{Z}_{2B}^*$$

Выражение можем записать следующим образом:

$$(\underline{U}_A - \underline{U}_B) \cdot U_{\text{ном}} = \underline{S}_1 \cdot \underline{Z}_{AB}^* - \underline{S}_{\text{н1}} \cdot \underline{Z}_{1B}^* - \underline{S}_{\text{н2}} \cdot \underline{Z}_{2B}^* - \underline{S}_{\text{н3}} \cdot \underline{Z}_{3B}^* = \underline{S}_1 \cdot \underline{Z}_{AB}^* - \sum_{i=1}^3 \underline{S}_{\text{нi}} \cdot \underline{Z}_{iB}^*$$

В полученном выражении только одна неизвестная величина – мощность первого головного участка:

$$\underline{S}_{\text{гол1}} = \underline{S}_1 = \underline{S}_{A1} = \frac{(\underline{U}_A - \underline{U}_B) \cdot U_{\text{ном}}}{\underline{Z}_{AB}^*} + \frac{\sum_{i=1}^3 \underline{S}_{\text{нi}} \cdot \underline{Z}_{iB}^*}{\underline{Z}_{AB}^*}$$

Если бы мы определяли падение напряжения  $(\underline{U}_B - \underline{U}_A)$  и выполнили аналогичные преобразования, то нашли бы мощность второго головного участка:

$$\underline{S}_{\text{гол1}} = \underline{S}_1 = \underline{S}_{A1} = \frac{(\underline{U}_A - \underline{U}_B) \cdot U_{\text{ном}}}{\underline{Z}_{AB}^*} + \frac{\sum_{i=1}^3 \underline{S}_{\text{нi}} \cdot \underline{Z}_{iB}^*}{\underline{Z}_{AB}^*}$$

При  $n$  нагрузках:

$$\underline{S}_{\text{гол1}} = \underline{S}_1 = \underline{S}_{A1} = \frac{(\underline{U}_A - \underline{U}_B) \cdot U_{\text{ном}}}{\underline{Z}_{AB}^*} + \frac{\sum_{i=1}^n \underline{S}_{\text{нi}} \cdot \underline{Z}_{iB}^*}{\underline{Z}_{AB}^*}$$

$$\underline{S}_{\text{гол2}} = \underline{S}_4 = \underline{S}_{3B} = \frac{(\underline{U}_B - \underline{U}_A) \cdot U_{\text{ном}}}{\underline{Z}_{AB}^*} + \frac{\sum_{i=1}^n \underline{S}_{\text{нi}} \cdot \underline{Z}_{iA}^*}{\underline{Z}_{AB}^*}$$

Правильность полученных расчетов подтверждается выполнением баланса мощности – равенством произведенной и потребленной мощности:

$$\underline{S}_{\text{гол1}} + \underline{S}_{\text{гол2}} = \sum_{i=1}^n \underline{S}_{\text{нi}}$$

Значения части мощностей участков получатся отрицательными, т.е. они имеют обратное направление по отношению к принятому.

В общем случае расчет режима сети с двухсторонним питанием производится в комплексной форме. Но возможны следующие частные случаи:

В однородной ЛЭП отношение  $X_i / R_i$  участков одинаково по всей длине ЛЭП. Обозначим это отношение буквой  $m$ . Для такой ЛЭП реактивное сопротивление участков можно выразить активное -  $X_i = R_i \cdot m$ .

Тогда:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{\text{гол1}} = \underline{S}_1 = \underline{S}_{A1} &= \frac{\sum_{i=1}^n \underline{S}_{hi} \cdot \underline{Z}_{iB}^*}{\underline{Z}_{AB}^*} = \frac{\sum_{i=1}^n \underline{S}_{hi} \cdot (R_{iB} - jX_{iB})}{(R_{AB} - jX_{AB})} = \frac{\sum_{i=1}^n \underline{S}_{hi} \cdot R_{iB} \cdot (1 - jm)}{R_{AB} \cdot (1 - jm)} = \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n \underline{S}_{hi} \cdot R_{iB}}{R_{AB}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{hi} \cdot R_{iB}}{R_{AB}} + j \frac{\sum_{i=1}^n Q_{hi} \cdot R_{iB}}{R_{AB}}. \end{aligned}$$

Таким образом, активные и реактивные мощности головных участков рассчитываются независимо друг от друга по активным сопротивлениям участков.

Однородная ЛЭП с одинаковым сечением проводов на участках. Для такой ЛЭП выражение запишем таким образом:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{\text{гол1}} = \underline{S}_1 = \underline{S}_{A1} &= \frac{\sum_{i=1}^n P_{hi} \cdot R_{iB}}{R_{AB}} + j \frac{\sum_{i=1}^n Q_{hi} \cdot R_{iB}}{R_{AB}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{hi} \cdot r_0 \cdot l_{iB}}{r_0 \cdot l_{AB}} + j \frac{\sum_{i=1}^n Q_{hi} \cdot r_0 \cdot l_{iB}}{r_0 \cdot l_{AB}} = \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n P_{hi} \cdot l_{iB}}{l_{AB}} + j \frac{\sum_{i=1}^n Q_{hi} \cdot l_{iB}}{l_{AB}}. \end{aligned}$$

Таким образом, активные и реактивные мощности головных участков рассчитываются независимо друг от друга по длинам участков.

Однородная ЛЭП и одинаковый  $\cos\varphi$  нагрузок. Для такой ЛЭП выражение запишем так:



|    |                          |                          |                          |                              |                    |                    |       |
|----|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------|--------------------|--------------------|-------|
|    |                          |                          |                          |                              |                    |                    |       |
| 2  | $\frac{AC - 240/32}{38}$ | $\frac{AC - 120/19}{25}$ | $\frac{AC - 240/32}{40}$ | ТРДН-<br>40000/115/10,5/10,5 | $\frac{47}{0,9}$   | $\frac{50}{0,95}$  | 121   |
| 3  | $\frac{AC - 185/29}{28}$ | $\frac{AC - 185/29}{15}$ | $\frac{AC - 185/29}{32}$ | ТРДН-<br>25000/115/10,5/10,5 | $\frac{37}{0,95}$  | $\frac{33}{0,9}$   | 119   |
| 4  | $\frac{AC - 240/32}{40}$ | $\frac{AC - 240/32}{20}$ | $\frac{AC - 240/32}{40}$ | ТРДН-<br>25000/115/10,5/10,5 | $\frac{57}{0,94}$  | $\frac{35}{0,95}$  | 120,5 |
| 5  | $\frac{AC - 240/32}{45}$ | $\frac{AC - 240/32}{30}$ | $\frac{AC - 240/32}{50}$ | ТРДН-<br>40000/115/10,5/10,5 | $\frac{38}{0,92}$  | $\frac{56}{0,95}$  | 118   |
| 6  | $\frac{AC - 240/32}{50}$ | $\frac{AC - 240/32}{30}$ | $\frac{AC - 240/32}{60}$ | ТРДН-<br>40000/230/11/11     |                    | $\frac{55}{0,92}$  | 238   |
| 7  | $\frac{AC - 240/32}{60}$ | $\frac{AC - 240/32}{30}$ | $\frac{AC - 240/32}{50}$ | ТРДЦН-<br>63000/230/11/11    | $\frac{100}{0,95}$ | $\frac{80}{0,94}$  | 237,5 |
| 8  | $\frac{AC - 240/32}{45}$ | $\frac{AC - 240/32}{25}$ | $\frac{AC - 240/32}{60}$ | ТРДЦН-<br>63000/230/11/11    | $\frac{95}{0,9}$   | $\frac{88}{0,93}$  | 239   |
| 9  | $\frac{AC - 300/39}{60}$ | $\frac{AC - 300/39}{40}$ | $\frac{AC - 300/39}{70}$ | ТРДЦН-<br>100000/230/11/11   | $\frac{100}{0,92}$ | $\frac{130}{0,95}$ | 240   |
| 10 | $\frac{AC - 240/32}{30}$ | $\frac{AC - 185/29}{20}$ | $\frac{AC - 240/32}{40}$ | ТРДН-<br>40000/115/10,5/10,5 | $\frac{44}{0,95}$  | $\frac{50}{0,9}$   | 118   |
| 11 | $\frac{AC - 185/32}{28}$ | $\frac{AC - 120/19}{18}$ | $\frac{AC - 185/32}{32}$ | ТРДН-<br>25000/115/10,5/10,5 | $\frac{38}{0,95}$  | $\frac{34}{0,93}$  | 117,5 |
| 12 | $\frac{AC - 240/32}{56}$ | $\frac{AC - 240/32}{28}$ | $\frac{AC - 240/32}{44}$ | ТРДЦН-<br>63000/230/11/11    | $\frac{90}{0,93}$  | $\frac{85}{0,92}$  | 238   |
| 13 | $\frac{AC - 300/39}{50}$ | $\frac{AC - 240/32}{30}$ | $\frac{AC - 240/32}{60}$ | ТРДЦН-<br>63000/230/11/11    | $\frac{100}{0,94}$ | $\frac{87}{0,91}$  | 239   |
| 14 | $\frac{AC - 300/39}{80}$ | $\frac{AC - 240/32}{40}$ | $\frac{AC - 300/39}{70}$ | ТРДЦН-<br>100000/230/11/11   | $\frac{100}{0,95}$ | $\frac{120}{0,92}$ | 240   |

**Контрольные вопросы:**

1. Какие сети называются замкнутыми? Назовите виды замкнутых сетей. В чем их преимущество?
2. Что понимают под расчетной нагрузкой узла замкнутой сети?
3. На каких условиях основано выражение для расчета распределения мощностей в линии с двусторонним питанием? Запишите это выражение в общем виде.
4. В каких случаях в линии с двусторонним питанием появляется уравнивающая мощность?
5. Может ли в сети с двусторонним питанием поток реактивной мощности быть направлен навстречу потоку активной мощности?
6. Что такое точка потокоораздела и как она выбирается?
7. Каковы особенности правила моментов для однородной сети?
8. Как уточнить потокооразделение с учетом потерь мощности?
9. Как выполняется расчет режима линии с двусторонним питанием, если точки потокоораздела по активной и реактивной мощностям не совпадают?
10. Как проверить правильность расчета токов в линии с двусторонним питанием?

### ***Практическая работа №6***

#### ***Элементы проектирования электрических сетей***

***Цель:*** приобрести навыки выбора элементов и проектирования электрических сетей

#### ***Основы теории:***

В техническом задании на проектирование обычно приводятся мощности нагрузок с указанием состава потребителей по категориям надежности их электроснабжения, наиболее характерные суточные графики нагрузок или время использования наибольшей нагрузки в году, вторичное напряжение подстанций, их расположение относительно друг друга и возможных источ-

ников питания, указания о возможных путях дальнейшего развития сети. В ряде случаев задание на проектирование содержит указания о целесообразности применения тех или иных средств управления режимами сети в связи с наличием в существующей системе определенных автоматических управляющих устройств и систем.

В процессе проектирования на основании исходных данных, имеющихся в техническом задании, выбирается номинальное напряжение, рациональная схема сети, сечения проводов и кабелей линий, образующих сеть; определяется мощность и число трансформаторов или автотрансформаторов на подстанциях; разрабатываются схемы их электрических соединений; оценивается необходимость установки на подстанциях источников реактивной мощности и их наиболее экономичное размещение; определяются средства регулирования напряжения.

В настоящее время в практике проектирования электрических сетей применяется метод вариантного сопоставления на основе определения приведенных затрат. Предполагаемые варианты сооружения сети могут отличаться номинальным напряжением, конфигурацией схемы, иметь разную надежность электроснабжения потребителей в тех случаях, когда это возможно, но должны быть технически осуществимы и удовлетворять необходимым требованиям. только такие варианты электрической сети подлежат дальнейшему экономическому анализу с целью выявления наиболее рационального из них, причем критерием для оценки наиболее целесообразного варианта является минимум приведенных затрат. Если же различие в приведенных затратах сопоставляемых вариантов лежит в пределах точности задания исходных данных, то для окончательного решения принимаются во внимание дополнительные характеристики вариантов, а именно условия эксплуатации сети, возможность ее дальнейшего развития, наличия среди вариантов сети с более высоким номинальным напряжением, необходимые средства регулирования напряжения, наиболее простая возможность введения дополнительных средств автоматизации сети и многое другое.

**Задание:**

**Задача №1**

Задана схема сети, приведенная на рис. 6.1 Исходные данные по участкам сети и о нагрузках приведены в табл. 6.1

Требуется:

1. Определить потоки мощности на участках сети без учета потерь мощности, полагая, что сеть однородная.
2. Выбрать номинальные напряжения для каждого участка сети по одной из эмпирических формул, по зонам экономических номинальных напряжений и по таблицам, характеризующим пропускную способность и дальность передачи линий разных напряжений.
3. Выбрать число и мощность трансформаторов на подстанциях.
4. На всех участках определить сечения по экономической плотности тока.
5. Проверить выбранные сечения по условиям допустимого нагрева в послеаварийных режимах.

Результаты расчетов представить в виде:

- 1) структурной схемы сети с результатами расчетов по выбору параметров сети;
- 2) табл. 6.2 и 6.3

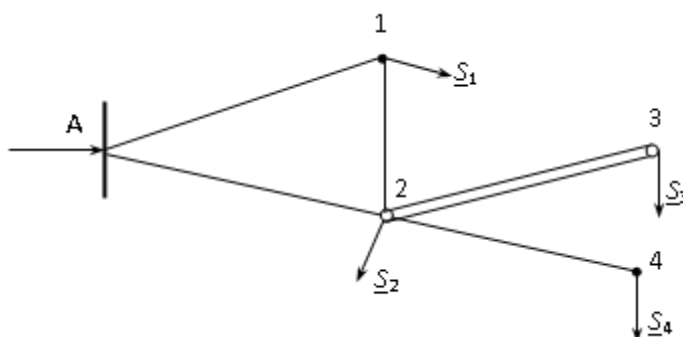


Рисунок 6.1 – Схема сети

Таблица 6.1 – Исходные данные по длинам линий и по нагрузкам

| Номер варианта | Длины участков, км |       |       |       |       | Нагрузки узлов, МВ·А |                   |                   |                   |
|----------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                | A – 1              | 1 – 2 | A – 2 | 2 – 3 | 2 – 4 | $\underline{S}_1$    | $\underline{S}_2$ | $\underline{S}_3$ | $\underline{S}_4$ |
| 1              | 50                 | 35    | 70    | 30    | 25    | 80+j50               | 30+j15            | 42+j17            | 20+j10            |
| 2              | 75                 | 30    | 55    | 28    | 23    | 85+j40               | 42+j18            | 30+j20            | 23+j17            |
| 3              | 86                 | 38    | 58    | 32    | 20    | 90+j45               | 29+j17            | 40+j15            | 24+j10            |
| 4              | 70                 | 40    | 60    | 36    | 19    | 92+j38               | 35+j14            | 50+j18            | 19+j8             |
| 5              | 90                 | 45    | 100   | 38    | 21    | 98+j44               | 38+j14            | 45+j20            | 28+j16            |
| 6              | 74                 | 42    | 58    | 34    | 27    | 101+j50              | 50+j25            | 28+j14            | 25+j12            |
| 7              | 82                 | 48    | 60    | 37    | 26    | 94+j40               | 55+j19            | 30+j15            | 26+j13            |
| 8              | 76                 | 37    | 65    | 40    | 23    | 108+j60              | 49+j20            | 40+j18            | 30+j15            |
| 9              | 87                 | 42    | 62    | 32    | 18    | 86+j35               | 50+j25            | 39+j19            | 23+j16            |
| 10             | 65                 | 30    | 76    | 30    | 16    | 95+j47               | 39+j20            | 46+j17            | 18+j10            |
| 11             | 36                 | 15    | 42    | 19    | 12    | 45+j19               | 23+j14            | 14+j7             | 4+j2              |
| 12             | 38                 | 18    | 32    | 20    | 16    | 38+j14               | 20+j10            | 12,5+j4           | 6+j3              |
| 13             | 30                 | 20    | 46    | 16    | 11    | 35+j17               | 19+j8             | 14+j5             | 7+j4              |
| 14             | 35                 | 28    | 40    | 17    | 14    | 48+j20               | 16+j8             | 16+j8             | 5,2+j2,8          |
| 15             | 44                 | 25    | 30    | 19    | 12    | 45+j20               | 22+j9             | 17+j5             | 4,2+j1,8          |
| 16             | 50                 | 30    | 45    | 21    | 15    | 41+j19               | 20+j8             | 15+j7             | 6,8+j3            |
| 17             | 37                 | 19    | 40    | 18    | 14    | 44+j20               | 21+j9             | 11+j4             | 6,4+j2            |
| 18             | 52                 | 17    | 38    | 20    | 16    | 39+j13               | 27+j9             | 13+j6             | 5,5+j3            |
| 19             | 44                 | 22    | 42    | 16    | 12    | 40+j20               | 24+j12            | 15,5+j4           | 4,5+j1,5          |
| 20             | 48                 | 25    | 45    | 17    | 13    | 47+j18               | 22+j7             | 16+j5             | 5+j2,5            |

Таблица 6.2 – Результаты решения задачи

| Параметр                             | Номер участка |     |     |                     |     |
|--------------------------------------|---------------|-----|-----|---------------------|-----|
|                                      | A-1           | 1-2 | A-2 | 2-3<br>(одной цепи) | 2-4 |
| Расчетный ток, А                     |               |     |     |                     |     |
| Расчетное сечение, мм <sup>2</sup>   |               |     |     |                     |     |
| Стандартное сечение, мм <sup>2</sup> |               |     |     |                     |     |

Таблица 6.3 – Результаты проверки сечений проводов по нагреву

| Номер участка | Допустимый ток по нагреву для выбранного сечения, А | Ток, А, в режиме |                                       |     |     |                  |     |
|---------------|-----------------------------------------------------|------------------|---------------------------------------|-----|-----|------------------|-----|
|               |                                                     | нормальном       | послеаварийном при отключении участка |     |     |                  |     |
|               |                                                     |                  | А-1                                   | 1-2 | А-2 | 2-3 (одной цепи) | 2-4 |
| А - 1         |                                                     |                  |                                       |     |     |                  |     |
| 1 - 2         |                                                     |                  |                                       |     |     |                  |     |
| А - 2         |                                                     |                  |                                       |     |     |                  |     |
| 2 - 3         |                                                     |                  |                                       |     |     |                  |     |
| 2 - 4         |                                                     |                  |                                       |     |     |                  |     |

**Задача №2**

Задана схема электрической сети 10 кВ, приведенная на рис. 6.2 Длины участков сети, нагрузки приведены в табл. 19. Время использования наибольших нагрузок принять  $T_{нб1} = 5100$  ч,  $T_{нб2} = 4200$  ч,  $T_{нб3} = 3500$  ч,  $T_{нб4} = T_{нб5} = 4500$  ч. Выбрать сечения проводов для участков сети, воспользовавшись методом экономической плотности тока.

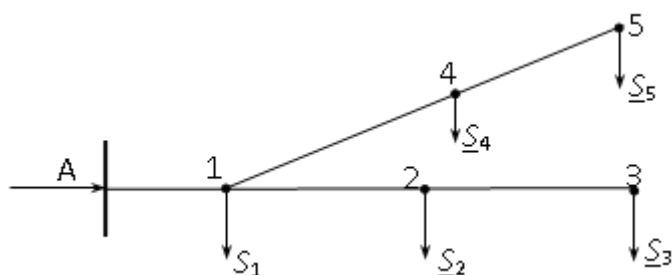


Рисунок 6.2 – Схема сети 10 кВ

Таблица 6.4 – Исходные данные по длинам линий и по нагрузкам

| ср<br>ва<br>н | Длины линий, км | Нагрузка, МВ·А |
|---------------|-----------------|----------------|
|---------------|-----------------|----------------|

|    | A-1 | 1-2 | 2-3 | 1-4 | 4-5 | $\frac{S_1}{\cos \varphi_1}$ | $\frac{S_2}{\cos \varphi_2}$ | $\frac{S_3}{\cos \varphi_3}$ | $\frac{S_4}{\cos \varphi_4}$ | $\frac{S_5}{\cos \varphi_5}$ |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1  | 5   | 2   | 4   | 2   | 2   | $\frac{0,4}{0,9}$            | $\frac{0,6}{0,92}$           | $\frac{0,1}{0,92}$           | $\frac{0,3}{0,95}$           | $\frac{0,2}{0,69}$           |
| 2  | 4   | 2   | 1   | 3   | 1   | $\frac{0,7}{0,95}$           | $\frac{0,2}{0,95}$           | $\frac{0,2}{0,87}$           | $\frac{0,5}{0,9}$            | $\frac{0,4}{0,92}$           |
| 3  | 6   | 2   | 3   | 3   | 2   | $\frac{0,6}{0,93}$           | $\frac{0,4}{0,9}$            | $\frac{0,3}{0,88}$           | $\frac{0,6}{0,92}$           | $\frac{0,2}{0,9}$            |
| 4  | 5   | 3   | 2   | 4   | 1   | $\frac{0,9}{0,95}$           | $\frac{0,6}{0,9}$            | $\frac{0,2}{0,9}$            | $\frac{0,5}{0,87}$           | $\frac{0,2}{0,9}$            |
| 5  | 7   | 1   | 2   | 4   | 1   | $\frac{0,5}{0,92}$           | $\frac{0,4}{0,9}$            | $\frac{0,3}{0,95}$           | $\frac{0,4}{0,92}$           | $\frac{0,3}{0,95}$           |
| 6  | 4   | 1   | 5   | 1   | 2   | $\frac{0,4}{0,92}$           | $\frac{0,3}{0,9}$            | $\frac{0,2}{0,9}$            | $\frac{0,5}{0,89}$           | $\frac{0,2}{0,95}$           |
| 7  | 4   | 2   | 3   | 2   | 2   | $\frac{0,3}{0,92}$           | $\frac{0,2}{0,93}$           | $\frac{0,2}{0,9}$            | $\frac{0,3}{0,95}$           | $\frac{0,4}{0,95}$           |
| 8  | 6   | 3   | 3   | 2   | 4   | $\frac{0,6}{0,95}$           | $\frac{0,5}{0,9}$            | $\frac{0,1}{0,92}$           | $\frac{0,5}{0,92}$           | $\frac{0,3}{0,89}$           |
| 9  | 4   | 3   | 2   | 3   | 2   | $\frac{0,8}{0,95}$           | $\frac{0,4}{0,95}$           | $\frac{0,3}{0,93}$           | $\frac{0,4}{0,9}$            | $\frac{0,3}{0,93}$           |
| 10 | 3   | 1   | 2   | 3   | 2   | $\frac{0,9}{0,93}$           | $\frac{0,3}{0,89}$           | $\frac{0,2}{0,9}$            | $\frac{0,4}{0,87}$           | $\frac{0,3}{0,9}$            |

Таблица 6.5 – Результаты решения задачи

| Номер участка | Ток участка, А | Расчетное сечение, мм <sup>2</sup> | Стандартное сечение, мм <sup>2</sup> | Допустимый ток по нагреву, А |
|---------------|----------------|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| A-1           |                |                                    |                                      |                              |
| 1-2           |                |                                    |                                      |                              |
| 2-3           |                |                                    |                                      |                              |
| 1-4           |                |                                    |                                      |                              |
| 4-5           |                |                                    |                                      |                              |

### Задача №3

Определить сечения проводов участков сети напряжением 10 кВ, приведенной на рис. 6.3, по допустимой потере напряжения, равной 6 %. Информация о длинах участков сети и нагрузках в узлах представлена в табл.

21. Удельную проводимость материала проводов принять  $\gamma = 32 \frac{\text{М}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}$ .

Расчеты выполнить для условия: сечения проводов одинаковы на всех участках сети.

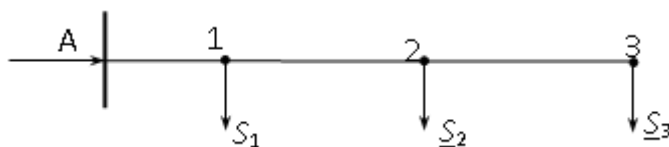


Рисунок 6.3 – Схема сети

Таблица 6.6 – Исходные данные по длинам участков сети и по нагрузкам

| Номер<br>варианта | Длины участков сети, км |     |     | Нагрузки, МВ·А    |                   |                   |
|-------------------|-------------------------|-----|-----|-------------------|-------------------|-------------------|
|                   | А-1                     | 1-2 | 2-3 | $\underline{S}_1$ | $\underline{S}_2$ | $\underline{S}_3$ |
| 1                 | 5                       | 4   | 2   | $0,8+j0,4$        | $0,5+j0,2$        | $0,7+j0,3$        |
| 2                 | 7                       | 1   | 3   | $1,5+j0,8$        | $1+j0,4$          | $0,8+j0,4$        |
| 3                 | 5                       | 6   | 2   | $0,7+j0,3$        | $0,6+j0,2$        | $0,5+j0,2$        |
| 4                 | 5                       | 3   | 4   | $1,2+j0,6$        | $0,9+j0,4$        | $0,4+j0,1$        |
| 5                 | 4                       | 4   | 2   | $0,9+j0,5$        | $0,6+j0,3$        | $0,7+j0,3$        |
| 6                 | 6                       | 4   | 2   | $1,6+j0,4$        | $0,7+j0,4$        | $0,3+j0,1$        |
| 7                 | 5                       | 3   | 2   | $1,2+j0,5$        | $0,6+j0,2$        | $0,5+j0,2$        |
| 8                 | 2                       | 5   | 1   | $0,9+j0,4$        | $0,5+j0,2$        | $0,4+j0,1$        |
| 9                 | 5                       | 3   | 2   | $0,7+j0,3$        | $1+j0,4$          | $0,3+j0,1$        |
| 10                | 2                       | 4   | 5   | $0,8+j0,5$        | $0,5+j0,2$        | $0,5+j0,1$        |

### ***Контрольные вопросы:***

1. Какие параметры являются решающими при выборе номинального напряжения линии?
2. Что представляют собой экономические области номинальных напряжений?

3. Каков физический смысл экономической плотности тока?
4. Исходя из какого режима выбирают сечения по экономической плотности тока: режима наибольших нагрузок, наименьших нагрузок, послеаварийных режимов? Почему?
5. В каких координатах строятся экономические интервалы нагрузок?
6. Почему и как экономическая плотность тока зависит от времени использования наибольшей нагрузки?
7. Для каких режимов производится проверка сечений проводов по нагреву? Почему?
8. Для каких сетей сечение провода выбирают по допустимой потере напряжения? Почему?
9. Какова последовательность выбора проводников линий по допустимой потере напряжения?
10. Какие дополнительные условия применяются при выборе проводников по допустимой потере напряжения? Каковы области их использования?
11. В чем особенности выбора сечений проводов по допустимой потере напряжения в разветвленных сетях?
12. Какова зависимость индуктивного сопротивления проводов от их сечения?
13. Какие наименьшие сечения алюминиевых и сталеалюминевых проводов допускаются по условию механической прочности для линий напряжением выше 1 кВ?
14. От чего зависит допустимый ток по нагреву линий электропередачи?
15. Чем обусловлено ограничение наименьших допустимых сечений проводов линий напряжения 110 кВ и выше?
16. Какому условию должны удовлетворять провода воздушных линий с учетом возможности появления короны?

## ***Практическая работа №7***

### ***Регулирование напряжения в электрических сетях***

**Цель:** изучить средства регулирования напряжения в распределительных сетях

#### ***Основы теории:***

Напряжение в узлах сети постоянно меняется из-за изменения нагрузки, режима работы источников питания, схемы сети.

Режим напряжений в электрической сети должен быть таким, чтобы были выполнены требования ГОСТ в отношении допустимых отклонений напряжения для электроприемников, которые питаются от этой сети. Значения отклонений напряжения часто превышают допустимые по следующим причинам:

- большие потери напряжения в сети;
- неправильный выбор сечений токоведущих элементов и мощности силовых трансформаторов;
- неправильное построение схемы сети.

Очень часто эти причины возникают при развитии сети, при ее реконструкции. Поэтому чтобы обеспечить необходимые отклонения напряжения на шинах электроприемников следует применять регулирование напряжения.

Регулированием напряжения называется процесс изменения напряжения в характерных точках сети с помощью специальных технических средств.

Способы регулирования напряжения возникли с возникновением электрических сетей. Их развитие происходило от низших уровней управления к высшим. Сначала использовалось регулирование напряжения в центрах питания распределительных сетей и непосредственно у потребителей и на энергоблоках электростанций. Сейчас эти методы регулирования напряжения называются локальными. По мере развития сетей и объединения их в крупные энергосистемы возникла необходимость координировать работу локаль-

ных методов. Координирование относится к высшим уровням регулирования напряжения.

Локальное регулирование может быть централизованным и местным. Централизованное управление выполняется в центрах питания. Местное регулирование проводится непосредственно у потребителей. Регулирование напряжения в центрах питания приводит к изменению режима напряжения во всей сети, которая питается от него. Местное регулирование приводит к изменению режима напряжения в ограниченной части сети.

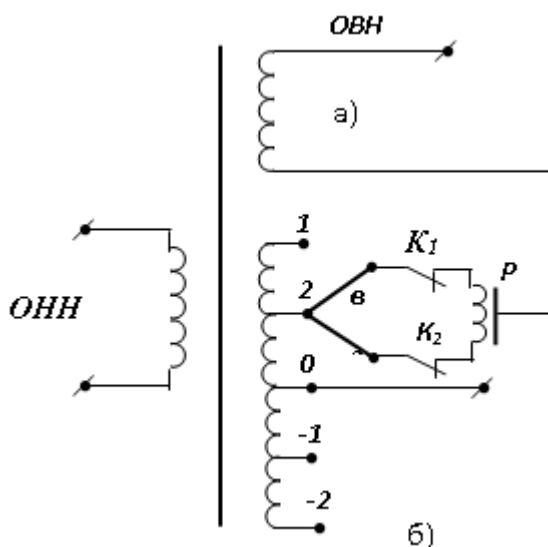


Рисунок 7.1 – Схема РПН с реактором

Рассмотрим принципиальную схему устройства РПН с реактором (рис. 7.1).

Обмотка высшего напряжения трансформатора с РПН состоит из двух частей: нерегулируемой или основной (а) и регулируемой (б).

На регулируемой части обмотки имеется ряд ответвлений к неподвижным контактам 1, 2, 0, -1, -2. Ответвления 1, 2 соотрые включены согласно виткам основной обмотки. При включении ответвлений 1, 2 коэффициент трансформации увеличивается. Ответвления -1, -2 соответствуют части витков, которые включены встречно по отношению к виткам основной обмотки. Их включение приводит к уменьшению коэффициента трансформации.

Основным выводом обмотки высшего напряжения является нулевой вывод. С него снимается номинальное напряжение.

На регулируемой части обмотки есть переключающее устройство. Оно состоит из подвижных контактов в и г, контакторов К1 и К2 и реактора Р. Середина обмотки реактора соединена с нерегулируемой частью обмотки высшего напряжения трансформатора. В нормальном режиме работы (без переключения) ток нагрузки обмотки высшего напряжения протекает через реактор и распределяется поровну между половинами обмотки реактора. Поэтому магнитный поток мал и потеря напряжения в реакторе тоже мала.

Переключения выполняются следующим образом. Предположим, что необходимо переключиться с ответвления 2 на ответвление 1. Для этого отключается контактор К1, переводится подвижный контакт на ответвление 1 и вновь включается контактор К1. В результате этих действий секция 1 - 2 оказывается замкнутой на реактор. Значительная индуктивность реактора ограничивает уравнивающий ток, который возникает из-за наличия напряжения на секции 1 – 2. Затем отключается контактор К2, переводится подвижный контакт г на ответвление 1 и включается контактор К2.

Реактор и все подвижные и неподвижные контакты переключающего устройства размещаются в баке трансформатора. Контактors помещаются в отдельном кожухе. Он залит маслом и размещен снаружи бака трансформатора. Это облегчает ревизию контактов и смену масла.

Переключатели с реакторами рассчитаны на длительное протекание тока нагрузки. Но реактор является тяжелым и громоздким элементом. Поэтому переключающие устройства трансформаторов напряжения 220 кВ и выше выполняются на активных сопротивлениях. Чтобы снизить потери электроэнергии в таких устройствах, их рассчитывают на кратковременную работу. Устройство получается компактным, но требует применения мощных быстродействующих приводов. Принцип действия таких устройств рассмотрим на примере автотрансформаторов напряжением 220 – 330 кВ.

Устройство РПН автотрансформатора расположено в линейном конце обмотки среднего напряжения (рис. 18.4). При таком расположении устройства РПН изменяется коэффициент трансформации между обмотками выс-

шего и среднего напряжений. Коэффициент трансформации между обмотками высшего и низшего напряжения не изменяется. Сначала устройство РПН автотрансформаторов выполнялось встроенным в нейтраль, как у трансформаторов. При регулировании изменялся коэффициент трансформации между всеми обмотками. При таком выполнении трудно было согласовать требования по регулированию напряжения у потребителей на сторонах низкого и среднего напряжений. При расположении устройства РПН в линейном конце обмотки среднего напряжения обмотка низшего напряжения оказывается нерегулируемой. Если возникает необходимость регулирования обмотки низшего напряжения автотрансформатора, последовательно с обмоткой низшего напряжения включают линейный регулятор. С экономической точки зрения такое решение оказывается более целесообразным, чем выполнение автотрансформатора с двумя устройствами РПН.

Выполнение ответвлений со стороны нейтрали позволяет облегчить изоляцию устройства РПН и рассчитать его на разность токов обмоток высшего и среднего напряжений ( $I_B - I_C$ ). Но регулирование будет связанным. Выполнение ответвлений в линейном конце обмотки среднего напряжения устройство должно рассчитываться на полный номинальный ток, а его изоляция на напряжение обмотки среднего напряжения  $U_C$ . Но регулирование будет независимым.

Согласно рисунка, рабочий ток протекает через замкнутый контакт 1 и вспомогательный контакт 2. Переключение происходит в следующем порядке. При переходе со ступени, а на ступень в сначала размыкается рабочий контакт 1, затем вспомогательный контакт 2. Ток нагрузки протекает через сопротивление  $R$ .

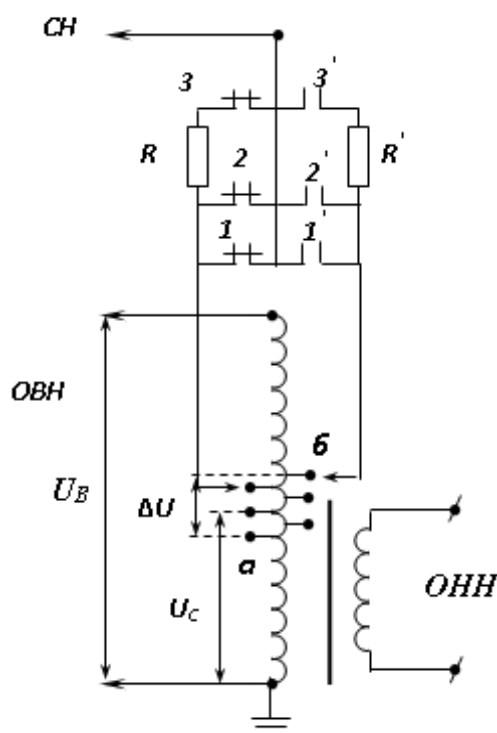


Рисунок 7.2 – Схема РПН на активных сопротивлениях

Замыкается дугогасительный контакт 3'. Образуется мост – уравнительный ток протекает через оба активных сопротивления  $R$  и  $R'$ . Размыкается дугогасительный контакт 3 и переводит ток нагрузки на правое плечо. Замыкаются контакты 2' и 1'. Создается новое рабочее положение.

### **Задание:**

#### **Задача №1**

На понижающей подстанции установлены два двухобмоточных трансформатора типа ТРДН. Информация о номинальных мощностях, номинальных напряжениях и диапазонах регулирования напряжения представлена в таблице 22.

По результатам электрических расчетов сети получены значения напряжения на шинах высшего напряжения подстанции; известны значения мощностей на шинах низкого напряжения трансформаторов (табл. 7.1).

Требуется выбрать ответвления на обмотках высшего напряжения, если желаемое напряжение на шинах низкого напряжения.

Таблица 7.1 – Исходные данные о параметрах трансформаторов и параметров режимов

| Номер<br>варианта | Информация о<br>трансформаторах | Диапазон ре-<br>гулирования | $U_1$ , кВ | $\underline{S}_2$ , МВ·А |
|-------------------|---------------------------------|-----------------------------|------------|--------------------------|
| 1                 | ТРДН-25000/115/10,5/10,5        | $\pm 9 \times 1,78 \%$      | 119        | $30 + j15$               |
| 2                 | ТРДН-40000/115/10,5/10,5        | $\pm 9 \times 1,78 \%$      | 118        | $45 + j18$               |
| 3                 | ТРДЦН-63000/115/10,5/10,5       | $\pm 9 \times 1,78 \%$      | 117        | $75 + j40$               |
| 4                 | ТРДЦН-80000/115/10,5/10,5       | $\pm 9 \times 1,78 \%$      | 119,5      | $90 + j45$               |
| 5                 | ТРДН-40000/230/11/11            | $\pm 8 \times 1,5 \%$       | 238        | $49 + j13$               |
| 6                 | ТРДЦН-63000/230/11/11           | $\pm 8 \times 1,5 \%$       | 237        | $80 + j25$               |
| 7                 | ТРДЦН-100000/230/11/11          | $\pm 8 \times 1,5 \%$       | 239        | $115 + j60$              |
| 8                 | ТРДН-40000/230/11/11            | $\pm 8 \times 1,5 \%$       | 235        | $47 + j17$               |
| 9                 | ТРДН-63000/230/11/11            | $\pm 8 \times 1,5 \%$       | 238        | $78 + j36$               |
| 10                | ТРДНС-25000/36,75/10,5/10,5     | $\pm 8 \times 1,5 \%$       | 37         | $29 + j14$               |
| 11                | ТРДНС-32000/36,75/10,5/10,5     | $\pm 8 \times 1,5 \%$       | 37,5       | $32 + j15$               |
| 12                | ТРДНС-40000/36,75/10,5/10,5     | $\pm 8 \times 1,5 \%$       | 36,5       | $44 + j20$               |
| 13                | ТРДНС-63000/36,75/10,5/10,5     | $\pm 8 \times 1,5 \%$       | 38         | $79 + j35$               |
| 14                | ТРДНС-40000/36,75/10,5/10,5     | $\pm 8 \times 1,5 \%$       | 37         | $49 + j10$               |
| 15                | ТРДНС-63000/36,75/10,5/10,5     | $\pm 8 \times 1,5 \%$       | 38         | $74 + j40$               |

### Задача №2

На понижающей подстанции установлен трехобмоточный трансформатор с регулированием напряжения под нагрузкой на стороне высшего напряжения и с ПБВ на стороне среднего напряжения, имеющий номинальные напряжения и диапазоны регулирования  $115 \pm (9 \times 1,78) \% / 38,5 \pm (2 \times 2,5) \% / 11$ .

По результатам электрических расчетов сети при наибольших и наименьших нагрузках получены значения напряжений на шинах низкого и

среднего напряжений, приведенные к высшему напряжению,  $U_3^B$  и  $U_2^B$  соответственно (табл. 7.2).

Требуется выбрать ответвления на обмотках высшего и среднего напряжений, если желаемое напряжение на шинах 10 кВ в режиме наибольших нагрузок  $U_{3\text{желнб}} = 1,05U_H = 10,5 \text{ кВ}$ ; в режиме наименьших нагрузок  $U_{3\text{желнм}} = 1,0U_H = 10 \text{ кВ}$ ; на шинах 35 кВ в обоих режимах  $U_{2\text{жел}} = 36,5 \text{ кВ}$ .

Таблица 7.2 – Исходные данные о напряжениях

| Номер<br>варианта | Напряжение, приведенное к высшему напряжению |                                |                                 |                                |
|-------------------|----------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
|                   | в режиме наибольших<br>нагрузок              |                                | в режиме наименьших<br>нагрузок |                                |
|                   | $U_{2\text{нб}}^B, \text{ кВ}$               | $U_{3\text{нб}}^B, \text{ кВ}$ | $U_{2\text{нм}}^B, \text{ кВ}$  | $U_{3\text{нм}}^B, \text{ кВ}$ |
| 1                 | 105                                          | 103                            | 119                             | 117                            |
| 2                 | 106                                          | 104                            | 112                             | 114                            |
| 3                 | 109                                          | 104                            | 117                             | 119                            |
| 4                 | 112                                          | 107                            | 118                             | 109                            |
| 5                 | 113                                          | 111                            | 114                             | 111                            |
| 6                 | 109                                          | 108                            | 118                             | 112                            |
| 7                 | 108                                          | 104                            | 117                             | 112                            |
| 8                 | 106                                          | 102                            | 114                             | 109                            |
| 9                 | 108                                          | 105                            | 117                             | 115                            |
| 10                | 109                                          | 105                            | 115                             | 113                            |
| 11                | 107                                          | 103                            | 114                             | 112                            |
| 12                | 103                                          | 102                            | 116                             | 112                            |
| 13                | 106                                          | 102                            | 117                             | 114                            |
| 14                | 108                                          | 102                            | 117                             | 115                            |

Расчеты выполнить в следующем порядке:

1. Для обмоток высшего и среднего напряжения трансформатора подстанции рассчитать напряжения ответвлений, соответствующие каждой ступени регулирования, и составить таблицы в виде табл.7.3.

2. Для двух режимов определить расчетные и выбрать стандартные ответвления обмотки высшего напряжения трансформатора из условия обеспечения желаемого напряжения на шинах 10 кВ.
3. Определить действительные напряжения в двух режимах на шинах 10 кВ.
4. Используя выбранные ответвления обмотки высшего напряжения для режимов наибольших и наименьших нагрузок, определить расчетное и выбрать стандартное ответвление обмотки среднего напряжения, исходя из желаемого напряжения на шинах 35 кВ.
5. Определить действительные напряжения в двух режимах на шинах 35 кВ.
6. Определить отклонения действительных напряжений от желаемых на шинах 10 и 35 кВ в двух режимах.
7. Сделать анализ и выводы о достаточности диапазонов регулирования трансформаторов.
8. Результаты расчетов представить в виде таблицы 7.4.

Таблица 7.3 – Параметры регулирования трансформатора

| Номер<br>ответвления | Добавка напряжения,<br>% | Напряжение ответвления,<br>% |
|----------------------|--------------------------|------------------------------|
|                      |                          |                              |
|                      |                          |                              |
|                      |                          |                              |
|                      |                          |                              |
|                      |                          |                              |
|                      |                          |                              |
|                      |                          |                              |

Таблица 7.4 – Результаты выбора ответвлений трансформатора

| Шины | Приведенное | Расчетное<br>напряжение | Стандартное<br>ответвление | Действительное | Отклонение<br>действитель- |
|------|-------------|-------------------------|----------------------------|----------------|----------------------------|
|------|-------------|-------------------------|----------------------------|----------------|----------------------------|

|                                  | напряже-<br>ние, кВ | ответвления,<br>кВ | кВ | % | напряжение,<br>кВ | ного напряже-<br>ния от желае-<br>мого, % |
|----------------------------------|---------------------|--------------------|----|---|-------------------|-------------------------------------------|
| <b>Режим наибольших нагрузок</b> |                     |                    |    |   |                   |                                           |
| 10 кВ                            |                     |                    |    |   |                   |                                           |
| 35 кВ                            |                     |                    |    |   |                   |                                           |
| <b>Режим наименьших нагрузок</b> |                     |                    |    |   |                   |                                           |
| 10 кВ                            |                     |                    |    |   |                   |                                           |
| 35 кВ                            |                     |                    |    |   |                   |                                           |

**Контрольные вопросы:**

1. Какие средства регулирования напряжения используют в распределительных сетях?
2. В чем различие трансформаторов с РПН и без РПН?
3. В чем заключается принцип встречного регулирования напряжения?
4. Какая информация необходима для выбора ответвлений двухобмоточных и трехобмоточных трансформаторов с РПН?
5. Как влияет установка компенсирующих устройств на потери мощности, потери напряжения?
6. Какими путями можно устранить в сети избыток реактивной мощности в сети?
7. Какие компенсирующие устройства могут работать как в режиме выдачи, так и в режиме потребления реактивной мощности?
8. В чем заключаются особенности конструкции устройства регулирования напряжения с РПН по сравнению с устройством без РПН?
9. Какое влияние оказывают режимы напряжений на потери активной мощности в элементах электрической сети?
10. Почему устройства РПН устанавливают преимущественно на стороне высшего напряжения трансформатора?

11. Каковы причины отклонения напряжения от номинального значения?

### ***Практическая работа №8***

#### ***Выбор и расчет параметров схем замещения линий электропередачи***

***Цель:*** научиться рассчитывать параметры линий электропередач

#### ***Основы теории:***

Выполнение расчетов симметричных установившихся режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) трехфазного переменного тока основано на применении однофазной линейной схемы замещения, параметры которой в общем случае являются комплексными величинами. Расчетная схема сети представляет собой последовательное соединение схем замещения линий электропередач и трансформаторов.

В практических расчетах ВЛ длиной до 300 км и КЛ представляются полными П-образными схемами замещения с сосредоточенными параметрами. Рекомендации по выбору схемы замещения в зависимости от типа ЛЭП и ее номинального напряжения представлены в таблице 1.1. Численные значения параметров схемы замещения рассчитываются по следующим выражениям.

Величина активного сопротивления участка сети рассчитывается:

$$R = r_0 \cdot l.$$

Активное сопротивление стальных проводов намного больше омического из-за поверхностного эффекта и наличия дополнительных потерь на гистерезис (перемагничивание) и от вихревых токов в стали:

$$r_0 = r_{0\text{пост}} + r_{0\text{доп}},$$

где  $r_{0\text{пост}}$  — омическое сопротивление одного километра провода;

$r_{0\text{доп}}$  — активное сопротивление, которое определяется переменным магнитным полем внутри проводника,  $r_{0\text{доп}} = r_{0\text{поверх.эф}} + r_{0\text{гистер.}} + r_{0\text{вихр.}}$

Переменный ток, проходя по проводу, образует вокруг него переменное магнитное поле, которое наводит в проводнике ЭДС обратного направ-

ления (ЭДС самоиндукции). Сопротивление току, обусловленное противодействием ЭДС самоиндукции, называется реактивным индуктивным сопротивлением.

Величина реактивного индуктивного сопротивления зависит как от значения тока в собственном проводе, так и от величины токов в соседних проводах. Чем дальше расположены фазные провода линии, тем меньше влияние соседних проводов – поток рассеяния и индуктивное сопротивление увеличиваются.

На величину индуктивного сопротивления оказывает влияние диаметр провода, магнитная проницаемость ( $\mu$ ) и частота переменного тока. Величина погонного индуктивного сопротивления рассчитывается по формуле:

$$x_0 = \omega \cdot (4,6 \lg \frac{D_{\text{ср}}}{R_{\text{пр}}} + 0,5\mu) \cdot 10^{-4} = x_0' + x_0'',$$

где  $\omega$  – угловая частота;  $\mu$  – магнитная проницаемость;  $D_{\text{ср}}$  – средне-геометрическое расстояние между фазами ЛЭП;  $R_{\text{пр}}$  – радиус провода.

Активная проводимость ( $G$ ) обусловлена потерями активной мощности в диэлектриках. Ее величина зависит от:

- тока утечки по изоляторам (малы, можно пренебречь);
- потерь мощности на корону.

Активная проводимость приводит к потерям активной мощности в режиме холостого хода ВЛЭП. Потери мощности на корону ( $\Delta P_{\text{кор}}$ ) обусловлены ионизацией воздуха вокруг проводов. Когда напряжённость электрического поля у провода становится больше электрической прочности воздуха (21,2кВ/см), на поверхности провода образуются электрические разряды. Из-за неровностей поверхности многопроволочных проводов, загрязнений и заусениц разряды появляются вначале только в отдельных точках провода – *местная корона*. По мере повышения напряжённости корона распространяется на большую поверхность провода и в конечном счёте охватывает провод целиком по всей длине – *общая корона*.

Потери мощности на корону зависят от погодных условий. Наибольшие потери мощности на корону происходят при различных атмосферных осадках. Например, на воздушных ЛЭП напряжением 330÷750кВ  $\Delta P_{\text{кор}}$  при снеге повышаются на 14%, дожде – на 47%, изморози – на 107% по сравнению с потерями при хорошей погоде. Корона вызывает коррозию проводов, создаёт помехи на линиях связи и радиопомехи.

Величину потерь мощности на корону можно рассчитать по формуле:

$$\Delta P_{\text{кор}} = \frac{0,18}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{R_{\text{пр}}}{D_{\text{ср}}}} \cdot (U_{\text{ф}} - U_{\text{кор ф}})^2, \text{ кВт/км}$$

где  $\delta$  – коэффициент, учитывающий барометрическое давление;  $U_{\text{ф}}$ , и  $U_{\text{кор ф}}$  – соответственно фазные рабочее напряжение ЛЭП и напряжение, при котором возникает корона.

Начальная напряжённость (в хорошую погоду), при которой возникает общая корона рассчитывается по формуле Пика:

$$E_0 = 30,3 \cdot m \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{R_{\text{пр}} \cdot \delta}}\right), \text{ кВ/см}$$

где  $m$  – коэффициент негладкости привода;  $R_{\text{пр}}$  – радиус провода, см;  $\delta$  – коэффициент, учитывающий барометрическое давление.

Для гладких цилиндрических проводов значение  $m = 1$ , для многопроволочных проводов –  $m = 0,82 \div 0,92$ .

Величина  $\delta$  рассчитывается по формуле:

$$\delta = \frac{0,386 \cdot P}{273 + \theta},$$

где  $P$  – давление, мм ртутного столба;

$\theta$  – температура воздуха, °С.

При нормальном атмосферном давлении (760 мм рт. ст.) и температуре 20 °С  $\delta = 1$ .

**Задание:**

**Задача №1.**

Определить удельные параметры воздушной и кабельной линий электропередачи напряжением 10 кВ, а также параметры схемы замещения этих линий при их длине 4 км. Воздушная линия выполнена проводами АС-50/8 при среднегеометрическом расстоянии между ними 2,5 м, кабельная линия – кабелем ААБ 3×50 при среднегеометрическом расстоянии между жилами кабеля 1,5 см. Максимальная мощность, передаваемая по воздушной линии, составляет 1000 кВА, по кабельной – 1600 кВА.

### ***Задача №2.***

Определить удельные параметры одноцепной воздушной линии 110 кВ с проводами марки АС 95/16, расположенными на П-образных деревянных опорах с расстоянием между проводами  $D_{ab} = D_{bc} = D = 4.3$  м, и вычислить параметры схемы замещения двухцепной линии длиной 100 км.

### ***Контрольные вопросы:***

1. Какие схемы замещения применяются для воздушных и кабельных линий?
2. Как изменяется индуктивное сопротивление линии при увеличении расстояния между проводами и уменьшении радиуса проводов?
3. Как снизить потери мощности на корону в линии электропередачи?

## ***Практическая работа №9***

### ***Выбор и расчет параметров схем замещения трансформаторов и автотрансформаторов***

***Цель:*** научиться рассчитывать параметры схем замещения трансформаторов и автотрансформаторов

### ***Основы теории:***

На электростанциях и подстанциях устанавливаются трехфазные и однофазные, двухобмоточные и трехобмоточные силовые трансформаторы и

авто-транс-форматоры, и силовые однофазные и трехфазные трансформаторы с расщепленной обмоткой низшего напряжения.

В аббревиатуре трансформатора последовательно (слева направо) приводится следующая информация:

- вид устройства (А – автотрансформатор, без обозначения – трансформатор);
- количество фаз (О – однофазный, Т – трехфазный);
- наличие расщепленной обмотки низшего напряжения – Р;
- система охлаждения (М – естественная циркуляция масла и воздуха, Д – принудительная циркуляция воздуха и естественная циркуляция масла, МЦ – естественная циркуляция воздуха и принудительная циркуляция масла, ДЦ – принудительная циркуляция воздуха и масла и др);
- количество обмоток (без обозначения – двухобмоточный, Т – трехобмоточный);
- наличие устройства регулирования напряжения под нагрузкой (РПН);
- исполнение (З – защитное, Г – грозоупорное, У – усовершенствованное, Л – с литой изоляцией);
- специфическая область применения (С – для систем собственных нужд электростанций, Ж – для электрификации железных дорог);
- номинальная мощность в  $\text{кВ} \cdot \text{А}$ ,
- класс напряжения обмоток (напряжения сети, к которой подключается трансформатор) в кВ.

На электрических схемах двухобмоточный трансформатор представляется следующим образом:

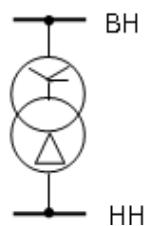


Рисунок 9.1 – Условное обозначение двухобмоточного трансформатора

В обмотках указывается схемы соединения обмоток (звезда, звезда с нулем, треугольник) и режим работы нейтрали:

- звезда – с изолированной нейтралью;
- звезда с нулем – имеется соединение нейтрали с землей.

В соответствии с принятой системой обозначений аббревиатура трансформатора ТДН-10000/110/10 расшифровывается: трансформатор трехфазный, двухобмоточный с принудительной циркуляцией воздуха и естественной циркуляцией масла, и системой регулирования напряжения под нагрузкой. Номинальная мощность – 10000 кВ·А, класс напряжения обмотки высшего напряжения – 110 кВ, низшего напряжения – 10 кВ.

В практических расчетах двухобмоточный трансформатор чаще всего представляется Г-образной схемой замещения (рис. 9.2).

Активное и реактивное сопротивления трансформатора (продольная ветвь) представляют собой сумму активных и реактивных сопротивлений обмотки высшего напряжения и приведенной к ней обмотки низшего напряжения:

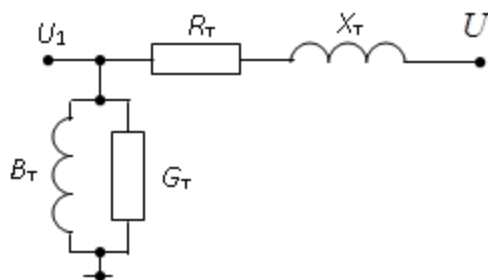


Рисунок 9.2 – Г – образная схема замещения двухобмоточного трансформатора

$$R_T = R_B + R_H^*;$$

$$X_T = X_B + X_H^*.$$

Поперечная ветвь схемы замещения представлена активной  $G_T$  и реактивной  $B_T$  проводимостями. Проводимости обычно подключают со стороны

первичной обмотки: для повышающих трансформаторов – со стороны обмотки низшего напряжения, для понижающих – со стороны обмотки высшего напряжения.

В такой схеме замещения отсутствует трансформация, то есть отсутствует идеальный трансформатор. Поэтому в расчетах вторичное напряжение  $U_2^*$  оказывается приведенным к напряжению первичной обмотки.

На электрических схемах трехобмоточный трансформатор представляется следующим образом (рис. 9.3):

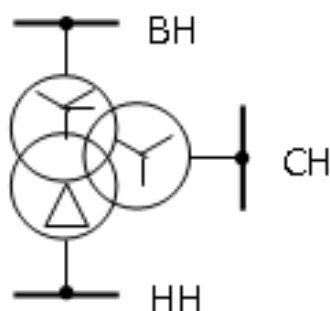


Рисунок 9.3 – Условное обозначение трехобмоточного трансформатора

В соответствии с принятой системой обозначений аббревиатура трансформатора ТДТН-25000/110/35/10 расшифровывается: трансформатор трехфазный, трехобмоточный с принудительной циркуляцией воздуха и естественной циркуляцией масла и системой регулирования напряжения под нагрузкой. Номинальная мощность – 25000 кВ·А, класс напряжения обмотки высшего напряжения – 110 кВ, среднего напряжения – 35 кВ, низшего напряжения – 10 кВ.

Обмотки трехобмоточного трансформатора могут иметь различные мощности. За номинальную мощность трансформатора принимается мощность, равная наибольшей из мощностей его обмоток. На эту мощность трансформатор рассчитывается по условиям нагрева.

Трансформаторы выполняются со следующим исполнением обмоток – 100 % / 100 % / 100 %, 100 % / 100 % / 66,7 % и 100 % / 66,7 % / 66,7 %.

В расчетах трехобмоточный трансформатор представляется схемой замещения в виде трехлучевой звезды (рис. 9.4).

Все сопротивления в схеме приведены к напряжению высшей обмотки.

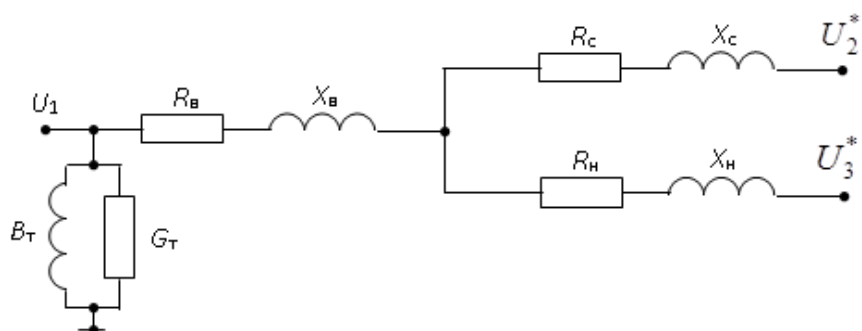


Рисунок 9.4 – Схема замещения трехобмоточного трансформатора

Для определения параметров схемы замещения трехобмоточного трансформатора нужно выполнить один опыт холостого хода и три опыта короткого замыкания. Из опыта холостого хода определяются данные для расчета активной и реактивной проводимостей. Они рассчитываются по тем же формулам, что и для двухобмоточного трансформатора.

Опыты короткого замыкания выполняются следующим образом – одна обмотка закорачивается, вторая находится на холостом ходу, а на третью обмотку подается напряжение короткого замыкания. В результате опытов определяют следующие паспортные данные:

- при закороченной обмотке низкого напряжения и питании со стороны обмотки высшего напряжения –  $U_{к\text{ вн}}, \Delta P_{к\text{ вн}}$ ;
- при закороченной обмотке низкого напряжения и питании со стороны обмотки среднего напряжения –  $U_{к\text{ сн}}, \Delta P_{к\text{ сн}}$ ;
- при закороченной обмотке среднего напряжения и питании со стороны обмотки высшего напряжения –  $U_{к\text{ вс}}, \Delta P_{к\text{ вс}}$ .

Учитывая условия проведения опытов, можно записать следующие системы уравнений:

$$\begin{cases} U_{KBH} = U_{KB} + U_{KH}; \\ U_{KBC} = U_{KB} + U_{KC}; \\ U_{KCH} = U_{KC} + U_{KHC}. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta P_{KBH} = \Delta P_{KB} + \Delta P_{KH}; \\ \Delta P_{KBC} = \Delta P_{KB} + \Delta P_{KC}; \\ \Delta P_{KCH} = \Delta P_{KC} + \Delta P_{KHC}. \end{cases}$$

Решая первую систему уравнений, определяем значение напряжения короткого замыкания каждой обмотки:

$$U_{KB} = 0,5 \cdot (U_{KBH} + U_{KBC} - U_{KCH});$$

$$U_{KC} = 0,5 \cdot (U_{KBC} + U_{KCH} - U_{KBH});$$

$$U_{KH} = 0,5 \cdot (U_{KBH} + U_{KCH} - U_{KBC}).$$

Индуктивные сопротивления обмоток трансформатора рассчитываются по той же формуле, что и для двухобмоточного трансформатора:

$$X_B = \frac{U_{KB} \cdot U_{B\text{НОМ}}^2}{100 \cdot S_{\text{НОМ}}};$$

$$X_C = \frac{U_{KC} \cdot U_{B\text{НОМ}}^2}{100 \cdot S_{\text{НОМ}}};$$

$$X_H = \frac{U_{KH} \cdot U_{B\text{НОМ}}^2}{100 \cdot S_{\text{НОМ}}}.$$

Решая первую систему уравнений, определяем значение потери активной мощности в каждой обмотке:

$$\Delta P_{KB} = 0,5 \cdot (\Delta P_{KBH} + \Delta P_{KBC} - \Delta P_{KCH});$$

$$\Delta P_{KC} = 0,5 \cdot (\Delta P_{KBC} + \Delta P_{KCH} - \Delta P_{KBH});$$

$$\Delta P_{KH} = 0,5 \cdot (\Delta P_{KBH} + \Delta P_{KCH} - \Delta P_{KBC}).$$

Активные сопротивления обмоток трансформатора рассчитываются по той же формуле, что и для двухобмоточного трансформатора:

$$R_B = \frac{\Delta P_{KB} \cdot U_{B\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2};$$

$$R_C = \frac{\Delta P_{KC} \cdot U_{B\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2};$$

$$R_{\text{н}} = \frac{\Delta P_{\text{кн}} \cdot U_{\text{в ном}}^2}{S_{\text{ном}}^2}.$$

На электрических схемах автотрансформатор изображается следующим образом (рис. 9.5).

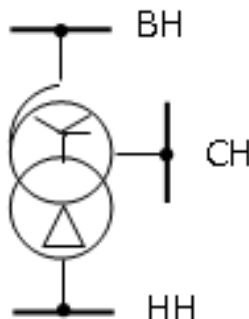


Рисунок 9.5 – Условное обозначение автотрансформатора

В соответствии с принятой системой обозначений аббревиатура автотрансформатора АТДЦТН-125000/ 220/110/10 расшифровывается: автотрансформатор трехфазный, трехобмоточный с принудительной циркуляцией воздуха и масла и системой регулирования напряжения под нагрузкой. Номинальная мощность – 25000 кВ·А, класс напряжения обмотки высшего напряжения – 220 кВ, среднего напряжения – 110 кВ, низшего напряжения – 10 кВ.

Автотрансформатор отличается от трехобмоточного трансформатора тем, что его обмотки высшего и среднего напряжений, кроме магнитной связи имеют еще электрическую связь (рис. 9.6). Обмотка среднего напряжения является частью обмотки высшего напряжения.

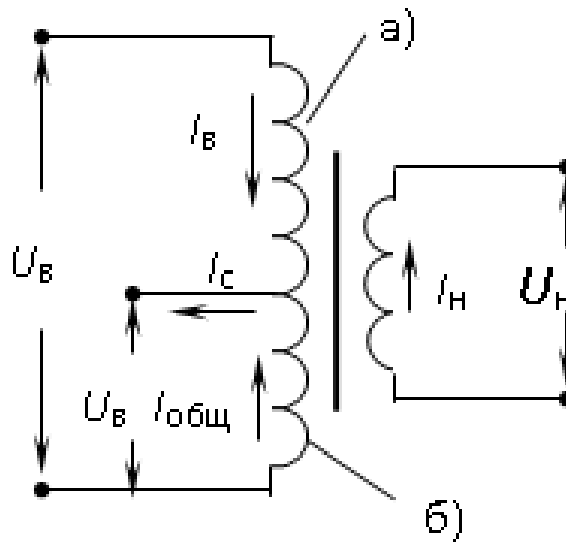


Рисунок 9.6 – Схема соединения обмоток автотрансформатора

Обмотка высшего напряжения состоит из двух частей – последовательной обмотки и общей обмотки.

Полная мощность, которая передается из обмотки высшего напряжения в обмотку среднего напряжения, называется номинальной мощностью автотрансформатора. Она рассчитывается как

$$S_{\text{НОМ}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{В НОМ}} \cdot I_{\text{В НОМ}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{С НОМ}} \cdot I_{\text{С НОМ}}.$$

Это выражение можно записать следующим образом:

$$S_{\text{НОМ}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{В НОМ}} \cdot I_{\text{В НОМ}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{В НОМ}} \cdot (U_{\text{В НОМ}} - U_{\text{С НОМ}}) =$$

$$= \underbrace{\sqrt{3} \cdot I_{\text{В НОМ}} \cdot (U_{\text{В НОМ}} - U_{\text{С НОМ}})}_{\text{ТРАНСФОРМАТОРНАЯ МОЩНОСТЬ, ПЕРЕДАВАЕМАЯ МАГНИТНЫМ ПУТЕМ ИЗ ОБМОТКИ ВЫСШЕГО НАПРЯЖЕНИЯ В ОБМОТКУ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ. НАЗЫВАЕТСЯ ТИПОВОЙ МОЩНОСТЬЮ. РАЗМЕРЫ МАГНИТОПРОВОДА ОПРЕДЕЛЯЮТСЯ ЭТОЙ МОЩНОСТЬЮ.}} + \underbrace{\sqrt{3} \cdot I_{\text{В НОМ}} \cdot U_{\text{С НОМ}}}_{\text{ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОЩНОСТЬ, ПЕРЕДАВАЕМАЯ ЗА СЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВЯЗИ ОБМОТОК. ЭТА МОЩНОСТЬ НЕ НАГРУЖАЕТ ОБЩУЮ ОБМОТКУ.}}$$

Типовая мощность меньше номинальной мощности. Выясним во сколько раз. Для этого возьмем отношение типовой мощности к номинальной:

$$\frac{S_{\text{ТИП}}}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\text{В НОМ}} \cdot (U_{\text{В НОМ}} - U_{\text{С НОМ}})}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{В НОМ}} \cdot U_{\text{В НОМ}}} = \frac{U_{\text{В НОМ}} - U_{\text{С НОМ}}}{U_{\text{В НОМ}}} = 1 - \frac{U_{\text{С НОМ}}}{U_{\text{В НОМ}}} = \alpha$$

Коэффициент  $\alpha$  называется коэффициентом выгодности. Выгодность автотрансформатора определяется по отношению к трехобмоточному трансформатору той же мощности.

Обмотка низшего напряжения имеет с обмотками высшего и среднего напряжений только магнитную связь. Мощность этой обмотки не может быть больше типовой мощности автотрансформатора. Иначе размеры магнитопровода автотрансформатора будут определяться мощностью обмотки низшего напряжения.

Учитывая изложенное, можно записать соотношение номинальных мощностей обмоток автотрансформатора:

$$100 \% / 100 \% / \alpha \ \%.$$

Преимущества автотрансформатора по сравнению с трехобмоточным трансформатором:

- меньший расход материалов (меди, стали, изоляции);
- меньшие габариты;
- меньшие потери активной мощности в режимах холостого хода и короткого замыкания;
- больший коэффициент полезного действия;
- более легкие условия охлаждения.

Недостатки:

- сложность выполнения независимого регулирования напряжения;
- опасность перехода атмосферных перенапряжений из обмотки высшего напряжения в обмотку среднего напряжения и обратно из-за электрической связи обмоток;
- необходимость обязательного глухого заземления нейтрали. Это приводит к тому, что ток однофазного короткого замыкания может быть больше тока трехфазного короткого замыкания. Если же разземлить нейтраль, то изоляцию обмоток нужно рассчитывать на линейное напряжение.

Автотрансформатор имеет такую же схему замещения, что и трехобмоточный трансформатор. Параметры схемы замещения рассчитываются аналогично. При этом следует учитывать, что часть паспортных данных может быть приведена не к номинальной мощности, а к типовой. Обмотка низшего напряжения рассчитывается на типовую мощность. Поэтому при коротком замыкании обмотки низшего напряжения напряжение поднимается до значения, определяющего ток в этой обмотке. В этом случае параметры  $\Delta P_{к\text{ вн}}$ ,  $\Delta P_{к\text{ сн}}$ ,  $U_{к\text{ вн}}$  и  $U_{к\text{ сн}}$  оказываются приведенными к типовой мощности автотрансформатора.

Если в паспортных данных отмечается эта особенность, то указанные параметры следует привести к номинальной мощности по формулам:

$$\Delta P_{к\text{ вн}} = \frac{\Delta P_{к\text{ вн}}^*}{\alpha^2};$$

$$\Delta P_{к\text{ сн}} = \frac{\Delta P_{к\text{ сн}}^*}{\alpha^2};$$

$$U_{к\text{ вн}} = \frac{U_{к\text{ вн}}^*}{\alpha}$$

$$U_{к\text{ сн}} = \frac{U_{к\text{ сн}}^*}{\alpha}$$

**Задание:**

**Задача №1.**

Определить параметры схемы замещения двухобмоточного трансформатора типа ТМ-40/6, приведенные к номинальным напряжениям первичной и вторичной обмоток.

**Задача №2.**

Определить параметры схемы замещения трехобмоточного трансформатора типа ТДНТ-10000/110, приведенные к стороне высшего напряжения.

**Контрольные вопросы:**

1. Какие схемы замещения применяются для трансформаторов и автотрансформаторов?
2. Как изменяются сопротивления трансформаторов и потери мощности в них с ростом номинального напряжения?
3. Как вычисляются потери мощности в трансформаторах?

### ***Практическая работа №10***

#### ***Расчетные нагрузки подстанций***

***Цель:*** научиться определить расчетные нагрузки подстанций

***Основы теории:***

На рисунке 10.1, а приведена схема электрической сети, состоящей из трех линий и трех трансформаторных подстанций. На рисунке 10.1, б приведена схема замещения этой же сети.

Для упрощения расчетов используются расчетные нагрузки подстанций. Расчетная нагрузка подстанции включает кроме мощности нагрузки потери в стали и меди трансформаторов подстанции, реактивную мощность, генерируемую в половине емкости линий, соединенных с данной подстанцией. Расчетная нагрузка, например, для подстанции 2 определяется следующим выражением:

$$S_{p2} = S_{2н} + \Delta S_{\Gamma 2} + \Delta S_{x2} - jQ_{C23}^H - jQ_{C12}^K$$

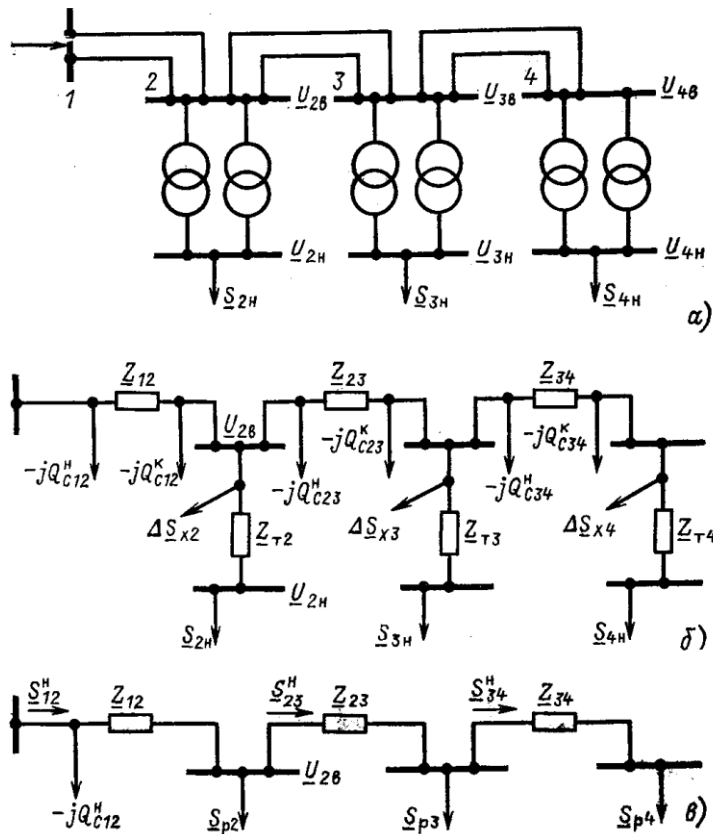


Рисунок 10.1 – Расчет режима радиальной сети с трансформаторами:  
 а – схема сети; б – схема замещения; в – упрощенная схема замещения  
 с расчетными нагрузками подстанций

В этом выражении  $S_{2H}$  – нагрузка второй подстанции;  $\Delta S_{Г2}$  – потери в меди трансформатора 2;  $\Delta S_{x2}$  – потери в стали трансформатора 2;  $Q_{C23}^H$  и  $Q_{C12}^K$  – реактивные мощности, генерируемые в конце линии 12 и начале линии 23. Таким образом, расчетная нагрузка подстанции включает кроме мощности нагрузки потери в стали и меди трансформаторов подстанции, реактивную мощность, генерируемую в половине емкости линий, соединенных с данной подстанцией.

Использование расчетных нагрузок подстанции существенно упрощает схему замещения и соответственно расчет, однако приводит к определенной погрешности расчета: расчетные нагрузки подстанций вычисляются до того, как выполнен электрический расчет, и напряжения НН и ВН подстанций неизвестны.

### Задание:

#### Задача №1.

Определить расчетные нагрузки подстанций, 2, 3, 4 (рисунок 4.2). Активные мощности нагрузок  $P_{2н}=22$  МВт,  $P_{3н}=17$  МВт,  $P_{4н}=30$  МВт, коэффициенты мощности всех нагрузок  $\cos \phi = 0,86$ . Длины участков и марки использованных проводов 110 кВ указаны на рисунке 10.2, а. На подстанциях 2–4 установлены по два трансформатора следующих типов: подстанция 2 – ТРДН-25000/110; подстанция 3 – ТДН-16000/110, подстанция 4 – ТРДН-40000/110.

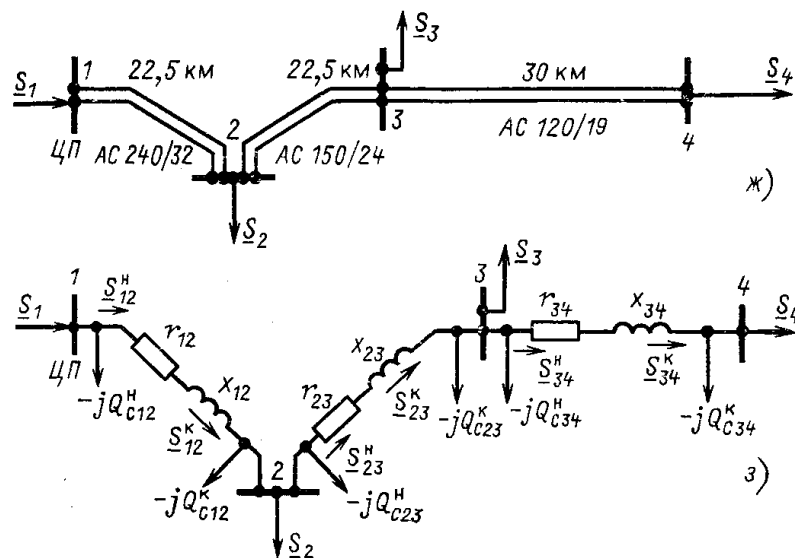


Рисунок 10.2 – Расчет режима разомкнутой питающей сети:

а – схема сети из трех линий; б – схема замещения сети из трех линий

### Контрольные вопросы:

1. Для чего в схему сети вводят расчетные нагрузки?
2. Как определить расчетные нагрузки подстанций?
3. Какие данные о нагрузке и сети необходимы для определения расчетных нагрузок?

### Практическая работа №11

#### Расчет разомкнутой сети 110 кВ с тремя подстанциями

**Цель:** научиться проводить электрический расчет разомкнутой сети

### Основы теории:

Известны (рисунок 11.1) мощности нагрузок  $S_k$  ( $k=2,3$ ), сопротивления и проводимости линий  $Z_{kj} = r_{kj} + jx_{kj}$  и  $b_{kj}$  ( $kj=12, 23$ ), напряжение источника питания  $U_1$  – напряжение в начале линии 12. Надо определить неизвестные напряжения в узлах  $U_k$  ( $k=2, 3$ ), потоки и потери мощности в линиях  $S_{kj}^K$ ,  $S_{kj}^H$ ,  $\Delta S_{kj}$  ( $kj= 12, 23$ ), а также мощность источника питания  $S_1$ .

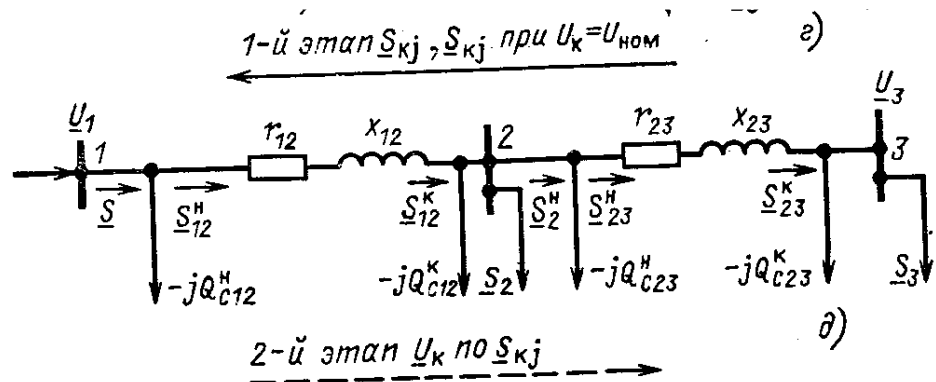


Рисунок 11.1 – Расчет режима разомкнутой питающей сети

$$S_{p2} = S_{2H} + \Delta S_{Г2} + \Delta S_{x2} - jQ_{C23}^H - jQ_{C12}^K$$

Расчет осуществляется методом итераций или последовательных приближений, он состоит из двух этапов.

1-й этап. Принимаем все напряжения в узлах равными  $U_{ном}$  и определяем потоки и потери мощности в линиях по первому закону Кирхгофа от последней нагрузки к источнику питания при

$$U_k = U_{ном}, k=2,3.$$

Определим  $-jQ_{C23}^K$ ,  $S_{23}^K$ ,  $\Delta S_{23}$ ,  $S_{23}^H$ , далее аналогично определим потоки и потери мощности в линии 12:  $-jQ_{C12}^K$ ,  $S_{12}^K$ ,  $\Delta S_{12}$ ,  $S_{12}^H$ . Запись первого закона Кирхгофа для узла 2 имеет следующий вид:

$$S_{12}^K = S_2 + S_2^H - jQ_{C12}^K$$

где  $S_2^H$  – мощность, текущая от узла 2 в линию 23.

2-й этап. Определяем напряжение  $U_2$  по известному напряжению  $U_1$  и потоку мощности  $S_{12}^H$ , определенному на 1-м этапе. Аналогично определяем  $U_3$ .

### ***Задание:***

#### ***Задача №1***

Рассчитать рабочие режимы линий питающей сети, схема которой изображена на рисунке 10.2, а. Мощности нагрузок на стороне ВН трансформаторов.  $S_2=22,117+j14,787$  МВА;  $S_3=17,103+j11,592$  МВА;  $S_4=30,136+j19,917$  МВА

### ***Контрольные вопросы:***

1. Каковы допущения при расчете сети в 2 этапа?
2. На какие параметры режима сети оказывают наибольшее влияние принимаемые допущения?
3. Возможно ли провести расчет в 2 этапа без определения расчетных нагрузок?

### ***Практическая работа №12***

#### ***Распределение потоков мощности и напряжений в простых замкнутых сетях без учета потерь мощности***

***Цель:*** изучить распределение потоков мощности и напряжений простых замкнутых сетей без учета потерь мощности

#### ***Основы теории:***

Рассмотрим линию с двухсторонним питанием, к которой преобразуется простая замкнутая сеть (рисунки 12.1, а).

Используем расчетные мощности нагрузок подстанции.

При определении потоков  $S_{12}$ ,  $S_{23}$ ,  $S_{43}$  пренебрежем потерями мощности. Следовательно, потоки мощности на головных участках определяются так:

$$S_{12} = \frac{\sum_{k=2}^{n-1} S_k Z_{kn}}{Z_{1n}}$$
$$S_{n,n-1} = \frac{\sum_{k=2}^{n-1} S_k Z_{1k}}{Z_{1n}}$$

Значение потока мощности  $S_{k,k+1}$  можно легко найти на основании первого закона Кирхгофа.

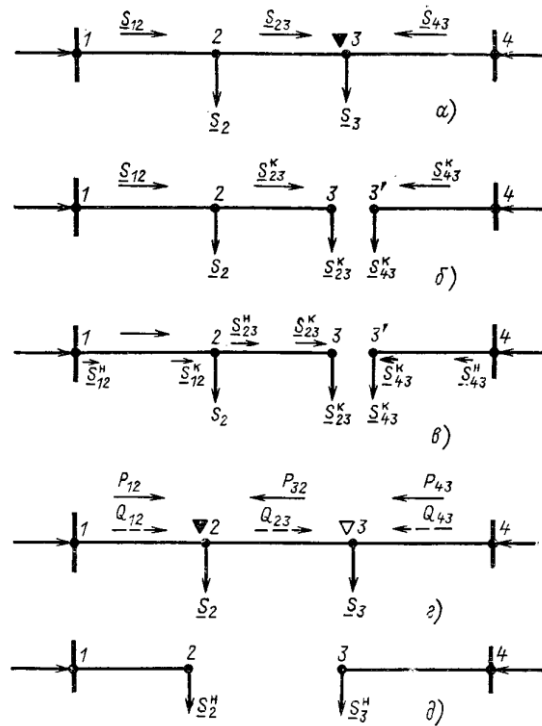


Рисунок 12.1 – Распределение потоков мощности в замкнутой сети  
а – исходная сеть; б – представление исходной сети в виде двух линий;  
в – условные обозначения для расчета потоков в линиях с учетом потерь мощности; г – направление потоков

### Задание:

#### Задача №1.

Кольцевая сеть (рисунок 12.2, а) напряжением 110 кВ связывает электростанцию 1 с понижающими подстанциями 2, 3, имеющими расчетные нагрузки  $S_2 = 28 + j23$  МВА и  $S_3 = 39,2 + j32,89$  МВА. Марки проводов, длины линий указаны на рисунке. Сопротивления их равны:  $Z_{12} = 3,6 + j12,15$  Ом;  $Z_{23} = 5 + j6$  Ом;  $Z_{13} = 8,1 + j20,65$  Ом. Напряжение на шинах электростанции равно 113 кВ. Определить мощность, которая поступает с шин электростанции. Расчет провести без учета потерь мощности

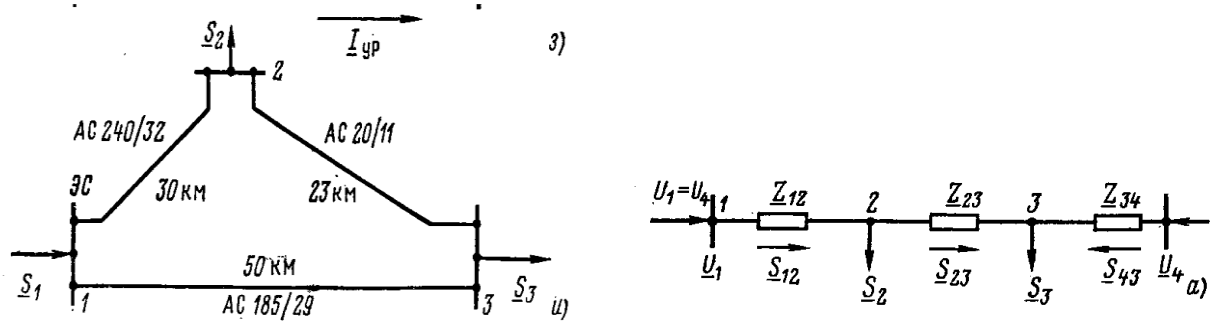


Рисунок 12.2 – Распределение потоков мощности в линии с двухсторонним питанием

а – схема кольцевой сети 110 кВ; б – схема замещения линии с четырьмя узлами

### Контрольные вопросы:

1. Как определить точку потококораздела в простой замкнутой сети?
2. Возможно ли провести расчет замкнутой сети без определения расчетных нагрузок?
3. Всегда ли точки потококораздела активной и реактивной мощности совпадают в однородной сети?

## Практическая работа №13

### Определение нагрузок, баланс реактивной мощности, расстановка компенсирующих устройств

**Цель:** изучить балансы активной и реактивной мощности в электроэнергетических системах

### Основы теории:

Передача электроэнергии по ЛЭП электромагнитными волнами осуществляется со скоростью, близкой к скорости света, т.е. практически мгновенно. Это приводит к тому, что производство, распределение и потребление электроэнергии происходит одновременно. Поэтому в любой момент времени установившегося режима системы должны вырабатывать мощность, равную мощности потребителей и потерям мощности в элементах системы. Дру-

гими словами, в энергосистеме должен иметь баланс выдаваемой и потребляемой мощности:

$$\begin{aligned}\sum P_{\Gamma} &= \sum P_{\Pi} = \sum P_{\Pi} + \sum \Delta P; \\ \sum Q_{\Gamma} &= \sum Q_{\Pi} = \sum Q_{\Pi} + \sum \Delta Q\end{aligned}$$

где  $\sum P_{\Gamma}$  – активная мощность, которая вырабатывается генераторами электростанций за вычетом мощности, расходуемой на собственные нужды электростанций;

$\sum P_{\Pi}$  – суммарная потребляемая активная мощность, которая складывается из мощности нагрузок  $\sum P_{\Pi}$  и потерь мощности  $\sum \Delta P$ ;

$\sum Q_{\Gamma}$  – реактивная мощность, которая вырабатывается генераторами электростанций за вычетом мощности, расходуемой на собственные нужды электростанций, а также реактивная мощность дополнительных источников реактивной мощности;

$\sum Q_{\Pi}$  – суммарная потребляемая реактивная мощность, которая складывается из мощности нагрузок  $\sum Q_{\Pi}$  и потерь мощности  $\sum \Delta Q$ .

Потери активной мощности включают в себя потери мощности в воздушных и кабельных ЛЭП, электромагнитных аппаратов и устройств управления режимами системы.

Суммарные потери реактивной мощности – это алгебраическая сумма потерь мощности в сопротивлениях и проводимостях воздушных и кабельных ЛЭП, трансформаторах, мощности намагничивания и рассеяния электромагнитных аппаратов.

При неизменном составе нагрузок активная и реактивная мощность, потребляемая системой, является функцией частоты и напряжения на шинах потребителей. Баланс мощности в системе отвечает некоторым определенным значениям частоты и напряжения. При изменении их значений изменяются в той или иной степени правая и левая части уравнения баланса (100.1) и наоборот.

Количественную оценку изменения величин, входящих в уравнение баланса, можно выполнить по статическим характеристикам нагрузки (потребителей)  $P_{\Pi}$  и  $Q_{\Pi}$ .

Статические характеристики представляют собой зависимости потребляемой активной и реактивной мощностей от частоты и напряжения ( $P_{\Pi} = F(U)$ ,  $P_{\Pi} = F(f)$ ,  $Q_{\Pi} = F(U)$  и  $Q_{\Pi} = F(f)$ ) при таких малых их изменениях, что каждый новый режим может считаться установившимся. Они приведены на рис. 13.1.

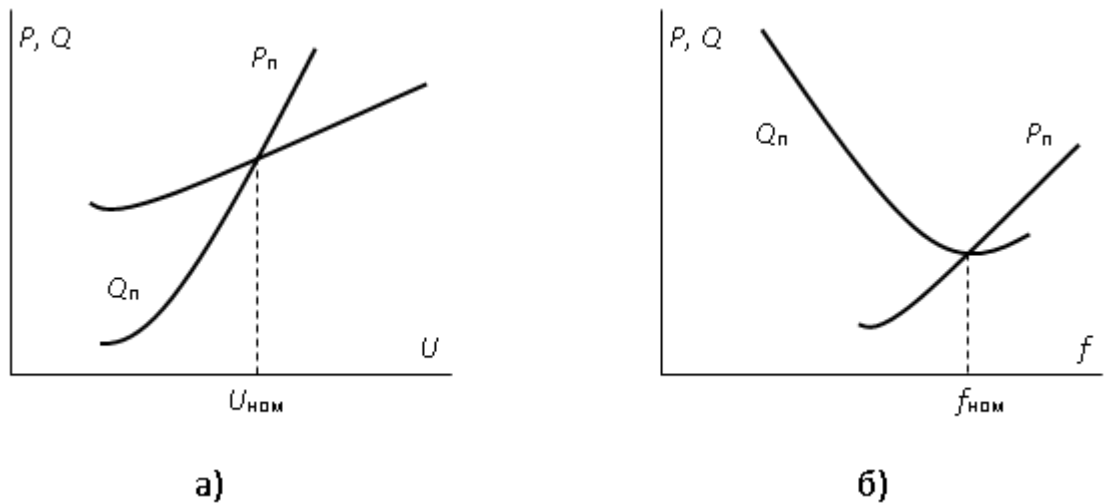


Рисунок 13.1 – Статические характеристики мощности

а – по напряжению; б – по частоте

Проанализируем величины производных  $\frac{\partial P_{\Pi}(U, f)}{\partial U}$ ,  $\frac{\partial Q_{\Pi}(U, f)}{\partial U}$ ,  $\frac{\partial P_{\Pi}(U, f)}{\partial f}$  и  $\frac{\partial Q_{\Pi}(U, f)}{\partial f}$  при незначительных изменениях напряжения и частоты в окрестностях точки  $(U_{\text{ном}}, f_{\text{ном}})$ :

$$\frac{\partial P_{\Pi}(U, f)}{\partial U} > 0;$$

$$\frac{\partial Q_{\Pi}(U, f)}{\partial U} > 0;$$

$$\frac{\partial P_{\Pi}(U, f)}{\partial f} > 0$$

$$\frac{\partial Q_{\text{п}}(U, f)}{\partial f} < 0.$$

Исходя из вида статических характеристик, можно записать:

$$\left| \frac{\partial Q_{\text{п}}(U, f)}{\partial U} \right| \gg \left| \frac{\partial Q_{\text{п}}(U, f)}{\partial f} \right|$$

$$\left| \frac{\partial P_{\text{п}}(U, f)}{\partial f} \right| \gg \left| \frac{\partial P_{\text{п}}(U, f)}{\partial U} \right|.$$

Предположим, что в первоначальном режиме уравнение баланса выполняется при значениях напряжения и частоты равных  $U_0$  и  $f_0$ :

$$P_{\text{п}}(U_0, f_0) = P_{\text{г}}(U_0, f_0);$$

$$Q_{\text{п}}(U_0, f_0) = Q_{\text{г}}(U_0, f_0).$$

При незначительном изменении мощности источников на величину  $\Delta \underline{S}_{\text{г}} = \Delta P_{\text{г}} + j\Delta Q_{\text{г}}$  изменятся и уравнения баланса.

При разложении в ряд Тейлора функций  $P_{\text{п}}(U, f)$  и  $Q_{\text{п}}(U, f)$  в окрестностях точки  $(U_0, f_0)$  при учете только производных первого порядка, получим:

$$\frac{\partial P_{\text{п}}(U, f)}{\partial U} \cdot \Delta U + \frac{\partial P_{\text{п}}(U, f)}{\partial f} \cdot \Delta f = \Delta P_{\text{г}};$$

$$\frac{\partial Q_{\text{п}}(U, f)}{\partial U} \cdot \Delta U + \frac{\partial Q_{\text{п}}(U, f)}{\partial f} \cdot \Delta f = \Delta Q_{\text{г}}.$$

Запишем в матричной форме систему

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial P_{\text{п}}(U, f)}{\partial U} & \frac{\partial P_{\text{п}}(U, f)}{\partial f} \\ \frac{\partial Q_{\text{п}}(U, f)}{\partial U} & \frac{\partial Q_{\text{п}}(U, f)}{\partial f} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta U \\ \Delta f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta P_{\text{г}} \\ \Delta Q_{\text{г}} \end{pmatrix}.$$

Решаем уравнение (14.6) относительно приращений  $\Delta U, \Delta f$ :

$$\Delta U = \frac{1}{\Delta} \cdot \left( \frac{\partial Q_{\text{п}}(U, f)}{\partial f} \cdot \Delta P_{\text{г}} - \frac{\partial P_{\text{п}}(U, f)}{\partial f} \cdot \Delta Q_{\text{г}} \right);$$

$$\Delta f = \frac{1}{\Delta} \cdot \left( -\frac{\partial Q_{\text{п}}(U, f)}{\partial U} \cdot \Delta P_{\text{г}} + \frac{\partial P_{\text{п}}(U, f)}{\partial U} \cdot \Delta Q_{\text{г}} \right),$$

где определитель матрицы равен

$$\Delta = \frac{\partial P_{\Pi}(U, f)}{\partial U} \cdot \frac{\partial Q_{\Pi}(U, f)}{\partial f} - \frac{\partial P_{\Pi}(U, f)}{\partial f} \cdot \frac{\partial Q_{\Pi}(U, f)}{\partial U}.$$

**Задание:**

**Задача №1**

На рисунке 13.2 показана схема географического расположения источника питания района и пунктов потребления электроэнергии. Нагрузки подстанций равны  $P_2=36$  МВт,  $P_3=39$  МВт,  $P_4=22$  МВт,  $P_5=17$  МВт,  $P_6=41$  МВт. Определить мощности нагрузок, рассчитать баланс активной мощности в сети и расставить компенсирующие устройства на шинах 10 кВ понижающих подстанций.

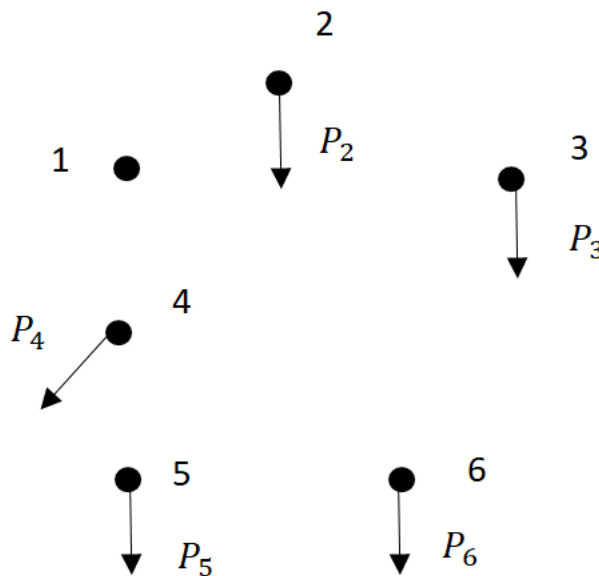


Рисунок 13.2 – Схема географического расположения

**Контрольные вопросы:**

1. Какова связь между балансом активной мощности и регулированием частоты?
2. Каково назначение батарей конденсаторов и синхронных компенсаторов в электрических сетях?
3. Каковы критерии расстановки КУ?

## Практическая работа №14

### Расчет потокораспределения активной мощности, выбор номинального напряжения сети

**Цель:** научиться выбирать номинальное напряжение сети

#### Основы теории:

Номинальное напряжение линии определяется ее длиной и активной мощностью, передаваемой по линии. Длины линий известны.

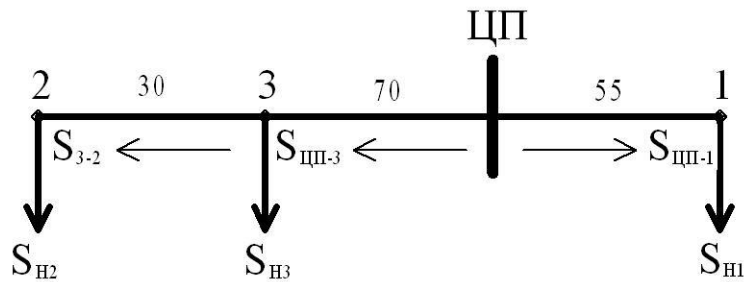


Рисунок 14.1 – Принципиальная схема разомкнутой сети

Мощности, протекающие по участкам сети составляют:

$$S_{ЦП-1} = S_{H1};$$

$$S_{3-2} = S_{H2};$$

$$S_{ЦП-3} = S_{H3} + S_{H2}.$$

Приведем расчет замкнутой электрической сети (рис. 14.2). Определим предварительное потокораспределение в сети. Представим кольцевую схему сетью с двухсторонним питанием от источников А и В и зададимся произвольно направлениями мощностей в линиях (рис. 14.1).



Рисунок 14.2 – Представление принципиальной схемы сети кольцевого типа сетью с двухсторонним питанием

Мощность, протекающая по головному участку А1, составляет:

$$S_{A1} = \sum_{i=1}^3 P_i L_{iB} / L_{AB} + j \sum_{i=1}^3 Q_i L_{iB} / L_{AB}$$

Мощности остальных участков электрической сети найдем по первому закону Кирхгофа, предварительно задавшись направлениями мощностей (рис. 14.1)

$$S_{12} = S_{A1} - S_{H1}; S_{23} = S_{12} - S_{H2}; S_{B3} = S_{23} + S_{H3}.$$

Для выбора напряжения электрической сети воспользуемся формулой Залесского, Стилла и Илларионова Напряжение участка сети А1 составляет:

– формула Залесского

$$U_{цп-1} = 16 \cdot \sqrt[4]{P \cdot L}$$

– формула Стилла

$$U_{номA1} = 4,34 \sqrt{L + 0,016P}$$

– формула Илларионова

$$U_{цп-1} = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{L} + \frac{2500}{P}}}.$$

**Задание:**

**Задание №1**

Определить потокораспределение активной мощности и номинальное напряжение линий для схемы варианта 1 рисунок 14.3.

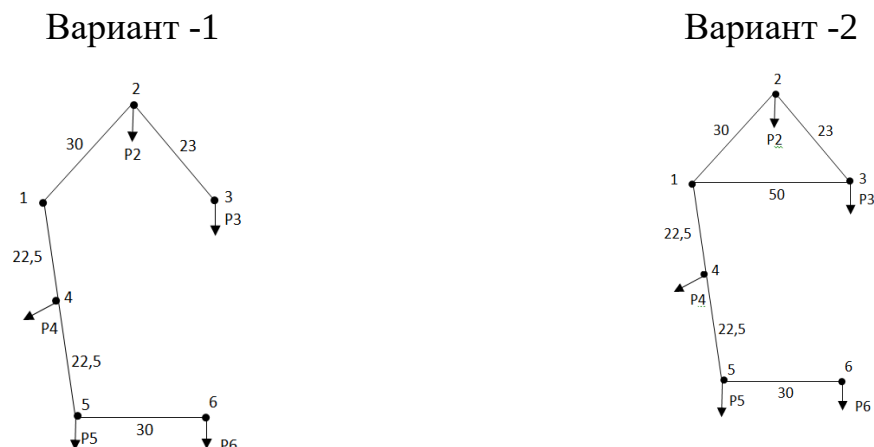


Рисунок 14.3 – Варианты схемы сети

## ***Задание №2***

Определить потокораспределение активной мощности и номинальное напряжение линий для схемы варианта 2 рисунок 14.1.

### ***Контрольные вопросы:***

1. От каких факторов зависит экономически целесообразное номинальное напряжение проектируемой сети?
2. Каковы преимущества применения более высокого номинального напряжения?
3. Каковы недостатки применения более высокого номинального напряжения?

## ***Практическая работа №15***

### ***Баланс реактивной мощности. Расчет потокораспределения реактивной мощности***

***Цель:*** изучить устройства компенсации реактивной мощности

#### ***Основы теории:***

Из баланса реактивной мощности в энергосистеме следует, что в случае, когда генерация реактивной мощности превышает ее потребление, напряжение в сети возрастает. При дефиците реактивной мощности – напряжение уменьшается. Этот вывод мы уже получали, когда рассматривали векторную диаграмму линии электропередачи напряжением 110 кВ. Емкостный ток ЛЭП, работающей на холостом ходу, или, другими словами, мощность, генерируемая ЛЭП, повышает напряжение в конце ЛЭП.

В отличие от баланса активной мощности, баланс реактивной мощности не может в полной мере определить требования, которые предъявляются к источникам реактивной мощности. Если активную мощность вырабатывают только генераторы электростанций, то реактивную мощность можно получить от дополнительных источников, которые могут устанавливаться

вблизи потребителей. Эти дополнительные источники называются компенсирующими установками.

При проектировании электрической сети нужно проверять баланс реактивной мощности как в целом по энергосистеме, так и в отдельных ее частях. При этом следует учитывать и необходимость резерва реактивной мощности.

Баланс реактивной мощности следует предусматривать отдельно для каждого режима сети. Характерными режимами в системе являются:

- режим наибольшей реактивной нагрузки. Для режима характерно наибольшее потребление реактивной мощности и наибольшая мощность компенсирующих устройств;
- режим наибольшей активной нагрузки. Режим связан с наибольшей загрузкой генераторов активной мощности при наименьшей выработке реактивной мощности;
- режим наименьшей активной нагрузки. В этом режиме часть генераторов отключают. Выработка реактивной мощности генераторами электростанций уменьшается;
- послеаварийные и ремонтные режимы. В этих режимах наибольшие ограничения по передаче реактивной мощности.

Если в энергосистеме наблюдается дефицит активной мощности, то он покрывается за счет избытка активной мощности в других системах. Для покрытия недостатка реактивной мощности ее экономичнее генерировать компенсирующими устройствами, которые устанавливаются в данной энергосистеме, а не передавать из соседних систем.

В отличие от активной мощности реактивная мощность может генерироваться не только генераторами электростанций, но и устройствами, которые называются компенсирующими (КУ). Эти устройства располагают в непосредственной близости от потребителей. К ним относятся:

- синхронные компенсаторы (СК);
- батареи конденсаторов (БК);
- статические источники реактивной мощности (СТК или ИРМ).

Опыт эксплуатации показывает, что при номинальной нагрузке генераторы ЭС вырабатывают около 60 % требуемой реактивной мощности, 20 % генерируется линиями электропередач высокого напряжения, 20 % вырабатывают компенсирующие устройства.

Выработка 1 кВар реактивной мощности на ЭС стоит в несколько раз дешевле, чем ее выработка с помощью КУ. Но технико-экономические расчеты показывают, что большая часть реактивной мощности должна вырабатываться КУ. Это объясняется внедрением мощных генераторов с относительно высоким  $\cos \varphi$ , ростом протяженности и напряжения передачи. Поэтому снижается экономичность выработки реактивной мощности генераторами ЭС.

Компенсация реактивной мощности применяется для следующих целей:

- для выполнения баланса реактивной мощности;
- для снижения потерь мощности и электроэнергии;
- для регулирования напряжения.

При использовании КУ необходимо учитывать ограничения их мощности по техническим и режимным требованиям. Мощность КУ должна удовлетворять:

- необходимому резерву мощности в узлах нагрузки;
- располагаемой реактивной мощности на ЭС;
- отклонению напряжения на шинах потребителей;
- пропускной способности ЛЭП.

Для уменьшения перетоков реактивной мощности по ЛЭП и трансформаторам КУ должны размещаться вблизи мест потребления реактивной мощности. При этом элементы сети разгружаются по реактивной мощности. Это приводит к уменьшению потерь мощности и напряжения.

Из анализа работы синхронного генератора следует, что увеличить выработку реактивной мощности можно только за счет снижения выработки ак-

тивной мощности. Этот принцип реализован в синхронном компенсаторе (СК).

Синхронный компенсатор – это синхронный двигатель, который работает в режиме холостого хода, то есть практически без активной нагрузки на валу. Таким образом, СК загружен только реактивным током.

Схема замещения СК приведена на рис. 15.1.



Рисунок 15.1 – Схема замещения СК

Как и синхронный двигатель, СК может работать в двух режимах: перевозбуждения и недовозбуждения. При перевозбуждении ЭДС СК больше напряжения в точке его подключения

$$\underline{E}_q > \underline{U}_c.$$

Синхронный компенсатор генерирует в сеть реактивную мощность. Ток СК опережает напряжение на  $90^\circ$ . Векторная диаграмма режима перевозбуждения СК приведена на рис. 15.2 а.

Уменьшая ток возбуждения, можно получить режим недовозбуждения. В этом режиме ЭДС СК меньше напряжения в точке его подключения  $\underline{E}_q < \underline{U}_c$  и ток СК отстает от напряжения на  $90^\circ$ . Векторная диаграмма режима недовозбуждения СК приведена на рис. 15.2 б. В этом режиме СК потребляет реактивную мощность, получая ее из сети.

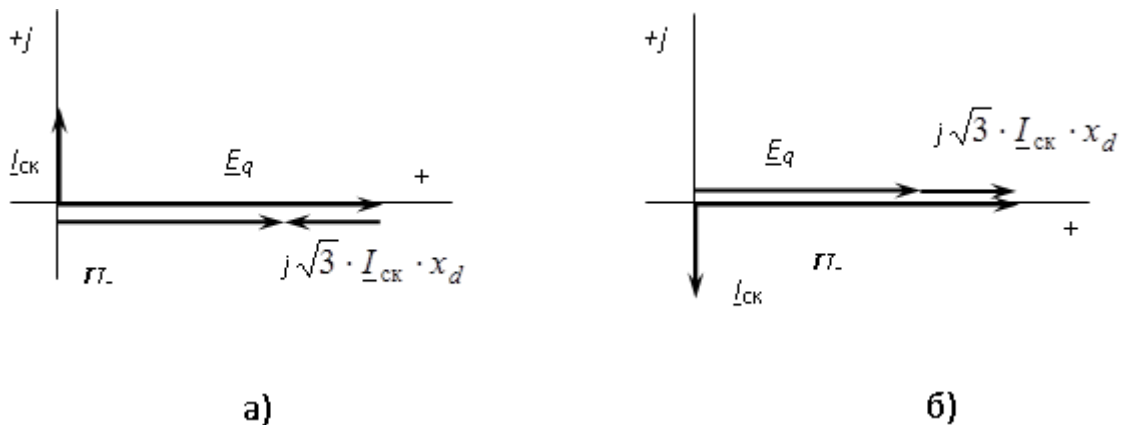


Рисунок 15.2 – Векторные диаграммы СК

а – в режиме перевозбуждения;

б – в режиме недовозбуждения

Номинальная мощность СК указывается для режима перевозбуждения.  
В режиме недовозбуждения

$$Q_{\text{СК}}^{\text{нед}} = 0,5 \cdot Q_{\text{СК ном}}.$$

Это связано, во-первых, с нагревом в лобовых частях СК – в режиме недовозбуждения потоки складываются (рис. 15.2 б). Во-вторых, из-за нарушения устойчивой работы СК нельзя значительно снижать ток возбуждения.

Достоинства СК:

- возможность увеличения генерируемой мощности при снижении напряжения в сети за счет регулирования тока возбуждения;
- возможность плавного и автоматического регулирования реактивной мощности.

Батареи конденсаторов применяются:

- для генерации реактивной мощности в узлах сети – поперечная компенсация. Батареи конденсаторов называют шунтовыми (ШБК);
- для уменьшения индуктивного сопротивления ЛЭП – продольная компенсация. Батареи конденсаторов называют устройствами продольной компенсации (УПК).

Шунтовые БК включают на шины ПС параллельно нагрузке, УПК включают в рассечку ЛЭП.

Батареи конденсаторов комплектуются из отдельных конденсаторов, которые соединяются последовательно и параллельно. Конденсаторы выпускаются в однофазном и трехфазном исполнении на номинальное напряжение от 0,22 до 10,5 кВ. Единичная мощность конденсаторов изменяется от 10 до 125 кВар. Увеличение напряжения достигается за счет увеличения числа последовательно включенных конденсаторов, увеличение мощности – за счет параллельного включения конденсаторов (рис. 15.3).

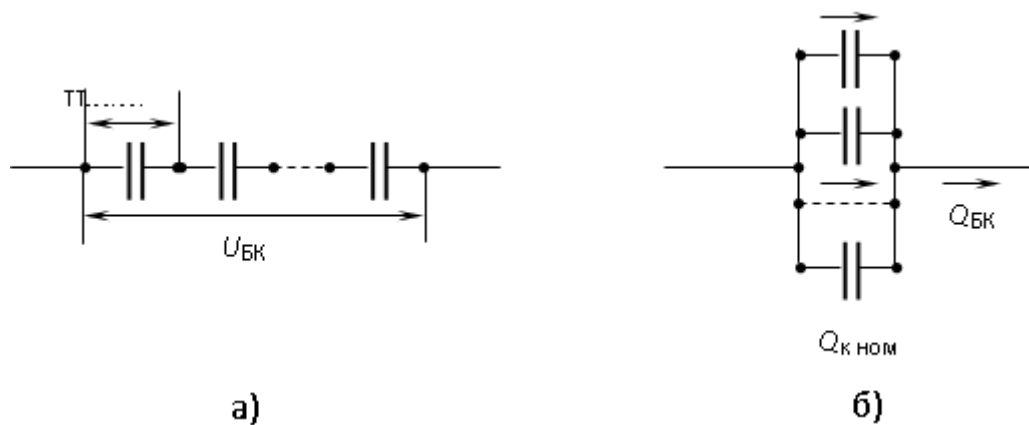


Рисунок 15.3 – Соединение конденсаторов

а – последовательное; б – параллельное

Число последовательно включенных конденсаторов определяется по формуле:

$$n = \frac{U_{БК \max}}{\sqrt{3} \cdot U_{К \text{ ном}} \cdot k_p},$$

Число последовательно включенных конденсаторов равно:

$$n = \frac{Q_{БК}}{Q_{К \text{ ном}}},$$

При соединении конденсаторов звездой мощность батареи равна

$$Q_{БК} = \frac{3 \cdot U_{\phi}^2}{x_c} = 3 \cdot U_{\phi}^2 \cdot \omega \cdot C = U_{\text{ном}}^2 \cdot \omega \cdot C = \frac{U_{\text{ном}}^2}{x_c}$$

При соединении в треугольник при использовании таких же конденсаторов мощность БК будет

$$Q_{БК} = \frac{3 \cdot U_{\phi}^2}{x_c / 3} = 9 \cdot U_{\phi}^2 \cdot \omega \cdot C = 9 \cdot U_{\phi}^2 \cdot \omega \cdot C$$

Преимущества:

- простота устройства и его обслуживания;
- отсутствие вращающихся частей дает безопасность обслуживания;
- малые потери активной мощности - 0,003 МВт/Мвар.

Недостатки:

- зависимость мощности БК от напряжения;
- ступенчатое регулирование мощности БК и ее напряжения;
- чувствительность к искажению кривой формы напряжения;
- недостаточная электрическая прочность конденсаторов и малый срок их эксплуатации.

***Задание:***

***Задача №1***

Оценить баланс реактивной мощности для сети варианта 1 и определить потокораспределение реактивной мощности. Коэффициент мощности системы, в которую входит проектируемая сеть, равен  $\cos \varphi_{\Sigma} = 0,9$

***Задача №2***

Оценить баланс реактивной мощности для сети варианта 2 и определить потокораспределение реактивной мощности. Коэффициент мощности системы, в которую входит проектируемая сеть, равен  $\cos \varphi_{\Sigma} = 0,9$

***Контрольные вопросы:***

1. Какова связь между балансом реактивной мощности и регулированием напряжения?
2. При каком условии в линиях 110 кВ допускается принимать равными величины потерь и генерации реактивной мощности?
3. В электрических сетях двух номинальных напряжений (например, 220/110 кВ) следует в первую очередь устанавливать компенсирующие устройства на шинах 10 кВ подстанций сети более низкого номинального напряжения (110 кВ) или более высокого (220 кВ)?

***Практическая работа №16***

***Выбор сечений и марок проводов воздушных линий. Проверка сечений проводов по условиям технических ограничений***

**Цель:** научиться выбирать сечение и марку проводов воздушных линий.

**Основы теории:**

Сечение проводов и кабелей определяют, исходя из допустимого нагрева с учетом нормального и аварийного режимов, а также неравномерного распределения токов между отдельными линиями, поскольку, нагрев изменяет физические свойства проводника, повышает его сопротивление, увеличивает бесполезный расход электрической энергии на нагрев токопроводящих частей и сокращает срок службы изоляции. Чрезмерный нагрев опасен для изоляции и контактных соединений и может привести к пожару и взрыву.

Электрической воздушной линией электропередачи называется устройство для передачи электрической энергии по проводам, расположенным на открытом воздухе и прикрепленным при помощи изоляторов и арматуры к опорам или кронштейнам инженерных сооружений. Главные элементы воздушной ЛЭП:

- провода, которые служат для передачи электроэнергии;
- грозозащитные тросы для защиты от атмосферных перенапряжений (грозовых разрядов). Они монтируются в верхней части опор;
- опоры, поддерживающие провода и тросы на определенной высоте над поверхностью;
- изоляторы, изолирующие провода от тела опоры;
- арматура, при помощи которой провода закрепляются на изоляторах, а изоляторы на опоре.

По типу опоры ВЛЭП делятся на промежуточные и анкерные. Промежуточные и анкерные различаются способом подвески проводов. На промежуточной опоре провод подвешивается с помощью поддерживающих гирлянд изоляторов. На анкерных опорах провода закреплены жестко и натянуты до заданного натяжения при помощи натяжной гирлянды изоляторов (см. рис. 16.1).

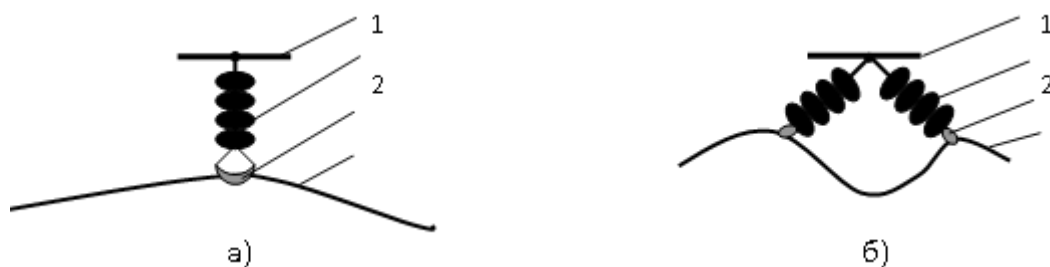


Рисунок 16.1 – Крепление проводов в фазе на промежуточной (а) и анкерной (б) опорах:

1 – траверса; 2 – гирлянда изоляторов; 3 – зажим.

По назначению различают опоры угловые, концевые, специального назначения.

По материалу опор различают деревянные (до 220 кВ), железобетонные (35 – 330 кВ) и металлические (35 кВ и выше).

На ВЛЕП применяют голые провода и тросы. Находясь на открытом воздухе, они подвергаются атмосферным воздействиям. Поэтому материал проводов, кроме хорошей проводимости, должен быть устойчивым к коррозии, обладать механической прочностью. Для проводов применяют следующие материалы:

- медь;
- алюминий;
- сталь;
- сплавы алюминия и меди с другими металлами (железом, магнием, кремнием).

Медь имеет удельную проводимость  $\text{См} \cdot \text{км} / \text{мм}^2$ . Отличается механической прочностью. Пленка окиси защищает ее от коррозии и химических воздействий. Обладает устойчивостью контакта.

Алюминий имеет удельную проводимость  $\text{См} \cdot \text{км} / \text{мм}^2$ . Механическая прочность хуже, чем у меди. Следовательно, чаще следует ставить опоры. Пленка окиси защищает ее от коррозии. Плохо противостоит химическим воздействиям. Не обладает устойчивостью контакта.

Стальные провода имеют плохую проводимость. Отличаются большой механической прочностью. Не обладают устойчивостью к коррозии. Активное сопротивление зависит от протекающего тока.

Выполняют провода и из двух металлов – стали и алюминия. Сталь находится внутри провода и служит для увеличения механической прочности. Алюминий находится снаружи и является токопроводящей частью.

В маркировке проводов сначала указывается материал, а затем сечение в мм<sup>2</sup>. Медные провода маркируют буквой М, алюминиевые провода – буквой А, стальные провода – буквами ПС и ПСО и сталеалюминиевые – буквами АС. В маркировке сталеалюминиевых проводов сначала указывают сечение алюминия, а затем стали. Например, АС-120/19. Провода марки АС выпускаются с различным отношением сечений алюминия и стали при одном и том же сечении алюминия. В зависимости от этого отношения различают провода облегченной конструкции, средней, усиленной и особо усиленной прочности.

Для защиты проводов марки АС от коррозии и химических воздействий используют специальные защитные средства. Тип защиты отражается в маркировке провода:

- марки АСКС, АСКП – провод сталеалюминиевый коррозионно-стойкий с заполнением стального сердечника (С) или всего провода (П) смазкой;
- марка АСК – как и АСКС, стальной сердечник изолирован полиэтиленовой пленкой.

За рубежом применяются изолирующие самонесущие провода. Представляют собой систему изолированных жил, скрученных вокруг несущего троса. Скрутка выполняется таким образом, что вся механическая нагрузка воспринимается только несущим тросом. Такие провода прокладываются без изоляторов. На опоре могут быть смонтированы несколько ЛЭП различных напряжений.

По конструкции проводов различают:

- однопроволочные, состоящие из одной проволоки сплошного сечения;
- многопроволочные из одного металла, состоящие в зависимости от сечения провода из нечетного количества проволок (от 7 до 61);
- многопроволочные из двух металлов. Количество проводов стального сердечника – нечетное (1, 7 или 19). Количество проволок токопроводящей части – четное.

Провода ВЛЭП располагают на опоре различными способами:

- на одноцепных опорах – треугольником или горизонтально (рис. 16.2, а, б);
- на двухцепных опорах – обратной елкой или шестиугольником в виде “бочки” (рис. 16.2, в, г).

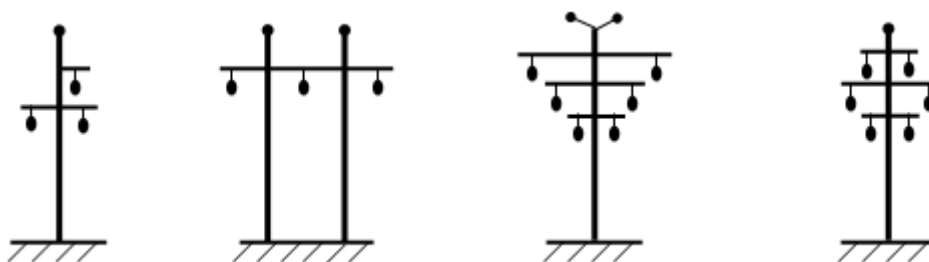


Рисунок 16.2 – Расположение проводов на опорах

Горизонтальное расположение провода – наилучшее по условиям эксплуатации, т.к. позволяет применять более низкие опоры и исключает склестывание проводов при сбрасывании гололеда или пляске проводов. Пляска проводов – это колебания проводов с малой частотой и большой амплитудой).



Рисунок 16.3 – Транспозиция на ВЛЭП

**Задание:**

**Задача №1**

Выбрать экономически целесообразные сечения проводов для схемы варианта 1, принимая для всех подстанций одно и то же время наибольшей нагрузки  $T_{наб}=3800$  ч. Действительные мощности нагрузок подстанций принять по результатам выполнения задачи 1 практической работы №15.

### ***Задача №2***

Выбрать экономически целесообразные сечения проводов для схемы варианта 1, принимая для всех подстанций одно и то же время наибольшей нагрузки  $T_{наб}=3800$  ч. Действительные мощности нагрузок подстанций принять по результатам выполнения задачи 2 практической работы №15.

### ***Задача №3***

Произвести проверку выбранных сечений в задаче №1: по условию длительно допустимого нагрева; по допустимым потерям напряжения. Район проектирования сети Северный Кавказ.

### ***Задача №4***

Произвести проверку выбранных сечений в задаче №2: по условию длительно допустимого нагрева; по допустимым потерям напряжения. Район проектирования сети Северный Кавказ.

### ***Контрольные вопросы:***

1. От каких факторов зависит расчетная токовая нагрузка?
2. В чем сущность метода экономической плотности тока для определения сечений проводов?
3. Каковы условия проверки выбранных проводов?
4. Чем обусловлена допустимая температура для кабелей и проводов?
5. Какие режимы работы проводов должны проверяться по допустимому току?

## ***Практическая работа №17***

### ***Выбор номинальной мощности и числа трансформаторов на подстанции***

***Цель:*** научиться выбирать трансформаторы по номинальной мощности

***Основы теории:***

При отсутствии подробной информации о графиках нагрузки проектируемых подстанций, в соответствии с существующей практикой проектирования, допускается упрощённый выбор мощности трансформаторов из условия допустимой перегрузки трансформаторов в послеаварийных режимах:

$$S_{\text{тр.пер}} \geq \frac{S_{\text{нб}}}{k_{\text{пер}}(n_{\text{т}} - 1)}$$

В соответствии с ГОСТом 14209-97 в послеаварийном режиме допускается перегрузка двухобмоточных трансформаторов на 40 % номинальной мощности, т.е.  $k_{\text{пер}}=1,4$ . В соответствии с ТУ №3411-001-498-90-270-2005 в после аварийном режиме допускается перегрузка автотрансформатора на 20 % номинальной мощности, т.е.  $k_{\text{пер}}=1,2$ . Такие перегрузки допускаются на время максимума нагрузки продолжительностью не более 4 часов в сутки на протяжении 5 суток при условии, что коэффициент загрузки трансформатора в режиме, предшествующему послеаварийному, составлял не более 0,8 (0,7 для автотрансформаторов)

***Задание:***

#### ***Задача №1***

Выбрать силовые трансформаторы для проектируемой сети вариант 1 и вариант 2. Определение потерь мощности в нормальном режиме наибольших нагрузок для варианта 1 и 2. В состав потребителей всех подстанций входят потребители 1 категории.

***Контрольные вопросы:***

1. Чем определяется выбор числа трансформаторов на подстанции?
2. Что такое перегрузочная способность трансформаторов?

3. От каких параметров работы зависит его перегрузочная способность?

## **5. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### **5.1. Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины**

#### **5.1.1 Перечень основной литературы:**

1. Кобелев А.В. Режимы работы электроэнергетических систем [Электронный ресурс] : учебное пособие для бакалавров и магистров направления «Электроэнергетика» / А.В. Кобелев, С.В. Кочергин, Е.А. Печагин. — Электрон. текстовые данные. — Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2015. — 80 с. — 978-5-8265-1411-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/64564.html>

2. Ананичева, С. С. Анализ электроэнергетических сетей и систем в примерах и задачах : учебное пособие / С. С. Ананичева, С. Н. Шелюг. — Екатеринбург : Уральский федеральный университет, ЭБС АСВ, 2016. — 176 с. — ISBN 978-5-7996-1784-4. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/65910.html>

3. Моделирование в электроэнергетике [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.Ф. Шаталов [и др.]. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь: Ставропольский государственный аграрный университет, АГРУС, 2014. — 140 с. — 978-5-9596-1059-3. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/47317.html>

4. Короткевич, М. А. Эксплуатация электрических сетей : учебник / М. А. Короткевич. — Минск : Вышэйшая школа, 2014. — 351 с. — ISBN 978-985-06-2397-3. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/35574.html>

### ***5.1.2. Перечень дополнительной литературы:***

1. Фадеева, Г. А. Проектирование распределительных электрических сетей : учебное пособие / Г. А. Фадеева, В. Т. Федин ; под редакцией В. Т. Федин. — Минск : Вышэйшая школа, 2009. — 365 с. — ISBN 978-985-06-1597-8. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/20124.html>

2. Русина, А. Г. Балансы мощности и выработки электроэнергии в электроэнергетической системе : учебно-методическое пособие / А. Г. Русина, Т. А. Филиппова. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2012. — 55 с. — ISBN 978-5-7782-1935-9. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/45078.html>.

### ***5.2. Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине***

1. Методические рекомендации для подготовки к практическим занятиям.
2. Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов.

### ***5.3. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины***

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"
2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks
3. <http://e.lanbooks.com> - Электронно-библиотечная система Лань
4. <http://docs.cntd.ru/> Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации ТЕХЭКСПЕРТ
- 5.Профессиональные справочные системы Техэксперт <http://vuz.kodeks.ru/>

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Пятигорский институт (филиал) СКФУ

**Методические указания**  
по выполнению лабораторных работ  
по дисциплине «ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ»  
для студентов направления подготовки  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Пятигорск 2026 г.

## Содержание

| №<br>п/п | Стр                                                                                                                              |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|          | .                                                                                                                                |
|          | Введение                                                                                                                         |
| 1.       | Цель и задачи изучения дисциплины                                                                                                |
| 2.       | Оборудование и материалы                                                                                                         |
| 3.       | Наименование лабораторных работ                                                                                                  |
| 4.       | Содержание лабораторных работ                                                                                                    |
| 4.1      | Лабораторная работа №1 УСТАНОВИВШИЕСЯ РЕЖИМЫ ЭЛЕМЕНТОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ                                      |
| 4.1.1    | Часть 1. Натурное моделирование установившегося режима работы однофазного трансформатора                                         |
| 4.1.2    | Часть 2. Натурное моделирование установившегося режима работы фазы линии электропередачи                                         |
| 4.1.3    | Часть 3. Снятие статических характеристик мощности по напряжению статической нагрузки                                            |
| 4.2      | Лабораторная работа №2 УСТАНОВИВШИЕСЯ РЕЖИМЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ                                               |
| 4.2.1    | Часть 1. Натурное моделирование установившегося режима работы фазы распределительной электрической сети с односторонним питанием |
| 4.2.2    | Часть 2. Натурное моделирование установившегося режима работы фазы распределительной электрической сети с двусторонним питанием  |
| 4.3      | Лабораторная работа №3 РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ                                          |
| 4.3.1    | Часть 1. Встречное регулирование напряжения                                                                                      |
| 4.3.2    | Часть 2. Регулирование напряжения путем поперечной компенсации реактивной мощности с помощью конденсаторной батареи              |

- 4.4    Лабораторная работа №4 ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА МЕСТНОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ
  - 4.4.1    Часть 1. Определение потери активной мощности в местной распределительной электрической сети, выполненной по петлевой схеме
  - 4.4.2    Часть 2 Оценка влияния разницы напряжений на шинах центров питания на потери активной мощности в местной распределительной электрической сети, выполненной по петлевой схеме, при ее работе в замкнутом режиме
  - 4.4.3    Часть 3 Оценка влияния места разрыва (разреза) местной распределительной электрической сети, выполненной по петлевой схеме, на потерю в ней активной мощности
  - 4.4.4    Часть 4 Определение точки нормального (оптимального) разрыва (разреза) в местной распределительной электрической сети, выполненной по петлевой схеме, по критерию минимума потери активной мощности
  - 4.4.5    Часть 5 Работа местной распределительной электрической сети, выполненной по петлевой схеме, в режиме автоматического выбора точки нормального разрыва (разреза) по критерию минимума потери активной мощности
- 4.5    Лабораторная работа №5 ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА РАЙОННОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ
  - 4.5.1    Часть 1 Измерение и определение параметров режима замкнутой (кольцевой) районной распределительной электрической сети
  - 4.5.2    Часть 2 Определение оптимальной мощности компенсирующих конденсаторов в замкнутой (кольцевой) районной распределительной электрической сети по критерию минимума потери активной мощности

Приложение 1

## **Введение**

Целью работы в лаборатории является углубление и закрепление приобретенных теоретических знаний путем экспериментальной проверки теоретических положений, а также знакомство с конструкцией электрических сетей, оборудованием, измерительными приборами и аппаратурой, используемыми в лаборатории.

В результате выполнения лабораторных работ студенты должны приобрести умения и навыки по сборке и исследованию электрических схем сетей, измерениям электрических величин. Тематика лабораторных работ полностью соответствует содержанию основных разделов курса, изучаемого в высших технических учебных заведениях.

В предлагаемом методическом указании описано пять лабораторных работ. В описании каждой лабораторной работы сформулирована ее цель, изложены основные теоретические положения, описана схема установки для проведения экспериментального исследования, даны рекомендации по проведению опытов и обработке результатов измерений, а также контрольные вопросы.

### **1. Цель и задачи изучения дисциплины**

Целью изучения дисциплины является изучение элементов электроэнергетических систем и способов передачи и распределения электрической энергии, знакомство с устройством, электрооборудованием и режимами работы электроэнергетических систем и сетей и овладение основами расчета установившихся режимов электроэнергетических систем и сетей.

### **2. Оборудование и материалы**

Аппаратные средства:

Комплект типового лабораторного оборудования «Умная местная распределительная электрическая сеть» УМРЭС1-С-К.

Учебная аудитория для проведения учебных занятий, оснащена оборудованием и техническими средствами обучения. Переносной ноутбук, проектор, доска магнитно-маркерная.

### **3. Наименование лабораторных работ**

| № Темы дисциплины | Наименование тем дисциплины, их краткое содержание                                                                                                                                                                     | Объем часов | Из них практическая подготовка, часов |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|---------------------------------------|
|                   | 5 семестр                                                                                                                                                                                                              |             |                                       |
| 9-32              | №1 УСТАНОВИВШИЕСЯ РЕЖИМЫ ЭЛЕМЕНТОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ<br>Часть 1. Натурное моделирование установившегося режима работы однофазного трансформатора                                                    | 2           |                                       |
|                   | Часть 2. Натурное моделирование установившегося режима работы фазы линии электропередачи                                                                                                                               | 2           |                                       |
|                   | Часть 3. Снятие статических характеристик мощности по напряжению статической нагрузки                                                                                                                                  | 2           |                                       |
|                   | Лабораторная работа №2 УСТАНОВИВШИЕСЯ РЕЖИМЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ<br>Часть 1. Натурное моделирование установившегося режима работы фазы распределительной электрической сети с односторонним питанием | 2           |                                       |
|                   | Часть 2. Натурное моделирование установившегося режима работы фазы распределительной электри-                                                                                                                          | 4           |                                       |

|      |                                                                                                                                                                                                                       |    |   |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|---|
|      | ческой сети с двусторонним питанием                                                                                                                                                                                   |    |   |
|      | Лабораторная работа №3 РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ<br>Часть 1. Встречное регулирование напряжения                                                                                | 4  |   |
|      | Часть 2. Регулирование напряжения путем поперечной компенсации реактивной мощности с помощью конденсаторной батареи                                                                                                   | 2  |   |
|      | Итого за 5 семестр                                                                                                                                                                                                    | 18 |   |
|      | 6 семестр                                                                                                                                                                                                             |    |   |
| 9-32 | Лабораторная работа №4 ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА МЕСТНОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ<br>Часть 1. Определение потери активной мощности в местной распределительной электрической сети, выполненной по петлевой схеме | 4  |   |
|      | Часть 2 Оценка влияния разницы напряжений на шинах центров питания на потери активной мощности в местной распределительной электрической сети, выполненной по петлевой схеме, при ее работе в замкнутом режиме        | 4  |   |
|      | Часть 3 Оценка влияния места разрыва (разреза) местной распределительной электрической сети, выполненной по петлевой схеме, на потерю в ней активной мощности                                                         | 4  |   |
|      | Часть 4 Определение точки нормального (оптимального) разрыва (разреза) в местной распределительной электрической сети, выполненной по петлевой схеме, по критерию минимума потери активной мощности                   | 4  | 4 |
|      | Часть 5 Работа местной распределительной электрической сети, выполненной по петлевой схеме, в режиме автоматического выбора точки нормального разрыва (разреза) по критерию минимума потери активной мощности         | 4  |   |
|      | Лабораторная работа №5 ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА РАЙОННОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ<br>Часть 1 Измерение и определение параметров режима замкнутой (кольцевой) районной распределительной электрической сети      | 8  |   |
|      | Часть 2 Определение оптимальной мощности компенсирующих конденсаторов в замкнутой (кольцевой) районной распределительной электрической сети по критерию минимума потери активной мощности                             | 8  |   |

#### 4. Содержание лабораторных работ

##### Лабораторная работа №1

##### Установившиеся режимы элементов распределительной электрической сети

**Цель работы:** приобрести навыки измерения параметров установившегося режима работы трансформатора и электрической сети.

##### Основы теории:

На электрических схемах двухобмоточный трансформатор представляется следующим образом (рисунок 1.1):

В обмотках указывается схемы соединения обмоток (звезда, звезда с нулем, треугольник) и режим работы нейтрали:

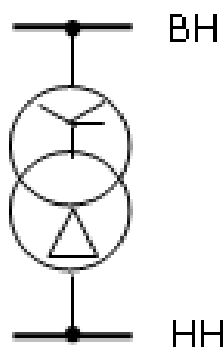


Рисунок 1.1 – Условное обозначение двухобмоточного трансформатора

- звезда – с изолированной нейтралью;
- звезда с нулем – имеется соединение нейтрали с землей.

В соответствии с принятой системой обозначений аббревиатура трансформатора ТДН-10000/110/10 расшифровывается: трансформатор трехфазный, двухобмоточный с принудительной циркуляцией воздуха и естественной циркуляцией масла, и системой регулирования напряжения под нагруз-

кой. Номинальная мощность – 10000 кВ·А, класс напряжения обмотки высшего напряжения – 110 кВ, низшего напряжения – 10 кВ.

В практических расчетах двухобмоточный трансформатор чаще всего представляется Г-образной схемой замещения (рисунок 1.2).

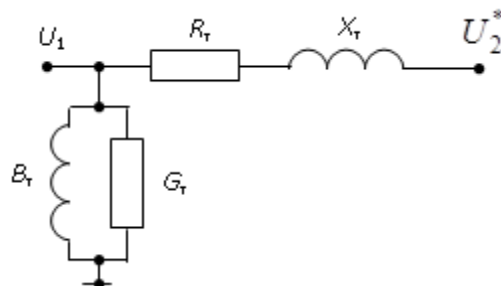


Рисунок 1.2 – Г-образная схема замещения двухобмоточного трансформатора

Активное и реактивное сопротивления трансформатора (продольная ветвь) представляют собой сумму активных и реактивных сопротивлений обмотки высшего напряжения и приведенной к ней обмотки низшего напряжения:

$$R_T = R_B + R_H^*;$$

$$X_T = X_B + X_H^*.$$

Поперечная ветвь схемы замещения представлена активной  $G_T$  и реактивной  $B_T$  проводимостями. Проводимости обычно подключают со стороны первичной обмотки: для повышающих трансформаторов – со стороны обмотки низшего напряжения, для понижающих – со стороны обмотки высшего напряжения.

В такой схеме замещения отсутствует трансформация, то есть отсутствует идеальный трансформатор. Поэтому в расчетах вторичное напряжение оказывается приведенным к напряжению первичной обмотки.

Активная проводимость обусловлена потерями активной мощности в стали трансформатора на перемагничивание и вихревые токи, реактивная проводимость – намагничивающей мощностью. В расчетах режимов элек-

трической сети проводимости заменяются нагрузкой, равной потерям холостого хода.

Параметры схемы замещения трансформатора определяются из двух опытов – холостого хода и короткого замыкания. В опытах определяют следующие величины, которые указывают в паспортных данных трансформатора:

- потери активной мощности в режиме холостого хода  $\Delta P_x$  в кВт;
- потери активной мощности в режиме короткого замыкания  $\Delta P_k$  в кВт;
- напряжение короткого замыкания  $U_k$ , в %;
- ток холостого хода  $I_x$ , в %.

Потери активной и реактивной мощности в трансформаторах и автотрансформаторах разделяются на потери в стали и потери в меди (нагрузочные потери). Потери в стали – это потери в проводимостях трансформаторов. Они зависят от приложенного напряжения. Нагрузочные потери – это потери в сопротивлениях трансформаторов. Они зависят от тока нагрузки.

Потери активной мощности в стали трансформаторов – это потери на перемагничивание и вихревые токи. Определяются потерями холостого хода трансформатора  $\Delta P_x$ , которые приводятся в его паспортных данных.

Потери реактивной мощности в стали определяются по току холостого хода трансформатора, значение которого в процентах приводится в его паспортных данных:

$$\Delta Q_{ст} = \Delta Q_x = \frac{I_x}{100} S_{ном}.$$

Потери мощности в обмотках трансформатора можно определить двумя путями:

- по параметрам схемы замещения;
- по паспортным данным трансформатора.

Потери мощности по параметрам схемы замещения определяются по тем же формулам, что и для ЛЭП:

$$\Delta P_{\text{мд}} = \frac{S^2}{U^2} R_{\text{т}};$$

$$\Delta Q_{\text{мд}} = \frac{S^2}{U^2} X_{\text{т}}$$

где:  $S$  – мощность нагрузки;

$U$  – линейное напряжение на вторичной стороне трансформатора.

Для трехобмоточного трансформатора или автотрансформатора потери в меди определяются как сумма потерь мощности каждой из обмоток. Получим выражения для определения потерь мощности по паспортным данным двухобмоточного трансформатора.

Потери короткого замыкания, приведенные в паспортных данных, определены при номинальном токе трансформатора:

$$\Delta P_{\text{к}} = 3 \cdot I_{\text{ном}}^2 \cdot R_{\text{т}} = \frac{S_{\text{ном}}^2}{U_{\text{ном}}^2} R_{\text{т}}.$$

При любой другой нагрузке потери в меди трансформатора равны:

$$\Delta P_{\text{мд}} = 3 \cdot I^2 \cdot R_{\text{т}} = \frac{S^2}{U_{\text{ном}}^2} R_{\text{т}}.$$

Разделив эти выражение, получим:

$$\frac{\Delta P_{\text{к}}}{\Delta P_{\text{мд}}} = \frac{S_{\text{ном}}^2}{S^2}.$$

Откуда найдем  $\Delta P_{\text{мд}}$ :

$$\Delta P_{\text{мд}} = \Delta P_{\text{к}} \left( \frac{S}{S_{\text{ном}}} \right)^2.$$

Если в выражение для расчета  $\Delta Q_{\text{мд}}$ , подставить выражение для определения реактивного сопротивления трансформатора, то получим:

$$\Delta Q_{\text{мд}} = \frac{S^2}{U_{\text{ном}}^2} X_{\text{т}} = \frac{S^2}{U_{\text{ном}}^2} \cdot \frac{U_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}} = \frac{U_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{S^2}{S_{\text{ном}}}.$$

Таким образом, полные потери мощности в двухобмоточном трансформаторе равны:

$$\Delta P_T = \Delta P_x + \Delta P_k \left( \frac{S}{S_{\text{НОМ}}} \right)^2;$$

$$\Delta Q_T = \Delta Q_x + \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S^2}{S_{\text{НОМ}}}.$$

Если на подстанции с суммарной нагрузкой  $S$  работает параллельно  $n$  одинаковых трансформаторов, то их эквивалентные сопротивления в  $n$  раз меньше, а проводимости в  $n$  раз больше, тогда:

$$\Delta P_T = n \cdot \Delta P_x + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_k \left( \frac{S}{S_{\text{НОМ}}} \right)^2;$$

$$\Delta Q_T = n \cdot \Delta Q_x + \frac{1}{n} \cdot \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S^2}{S_{\text{НОМ}}}.$$

Для  $n$  параллельно работающих одинаковых трехобмоточных трансформаторов (автотрансформаторов) потери мощности рассчитываются по формулам:

$$\Delta P_T = n \cdot \Delta P_x + \frac{1}{n} \left[ \Delta P_{\text{кв}} \left( \frac{S_B}{S_{\text{НОМ}}} \right)^2 + \Delta P_{\text{кс}} \left( \frac{S_c}{S_{\text{НОМ}}} \right)^2 + \Delta P_{\text{кн}} \left( \frac{S_H}{S_{\text{НОМ}}} \right)^2 \right];$$

$$\Delta Q_T = n \cdot \Delta Q_x + \frac{1}{100 \cdot n \cdot S_{\text{НОМ}}} (U_{\text{кв}} \cdot S_B^2 + U_{\text{кс}} \cdot S_c^2 + U_{\text{кн}} \cdot S_H^2),$$

где:  $S_B$ ,  $S_c$ ,  $S_H$  – соответственно мощности, проходящие через обмотки высшего, среднего и низшего напряжений трансформатора.

### ***Перечень используемого оборудования:***

| Обозначение | Наименование                    | Тип   | Параметры          |
|-------------|---------------------------------|-------|--------------------|
| G1          | Однофазный источник питания     | 218.9 | ~ 220 В / 16 А     |
| G2          | Источник бесперебойного питания | 1456  | 1000 ВА<br>~ 230 В |
| G3          | Однофазный источник питания     | 218.5 | ~ 220 В / 10 А     |

|         |                                               |       |                                              |
|---------|-----------------------------------------------|-------|----------------------------------------------|
| A1      | Однофазный трансформатор                      | 372.1 | 80 ВА<br>220 / 198...242 В                   |
| A3...A6 | Модель трансформаторной подстанции и нагрузки | 3356  | ~ 220 В / 0...20 ВТ / 0...20 ВА <sub>р</sub> |
| A7      | Модель линии электропередачи                  | 313.3 | ~ 220 В / 0,3 А                              |
| A12     | Емкостная нагрузка                            | 317.3 | ~ 220 В / 0...30 ВА <sub>р</sub>             |
| A14     | Удлинитель переносной четырехместный          | -     | ~ 220 В / 16 А                               |
| P1, P2  | Измеритель параметров однофазной сети         | 542   | 0...500 В / 0...5 А / 2500 ВА                |

***Указания по технике безопасности при выполнении лабораторной работы представлены в Приложении 1.***

### ***Указания по выполнению лабораторной работы:***

#### ***Часть 1. Натурное моделирование установившегося режима работы однофазного трансформатора***

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления "" устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" однофазного источника питания G1 (G3).
3. Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рис. 1.3.
4. Установите переключателем желаемое значение коэффициента трансформации трансформатора A1, например, равным 1,0.

5. Установите переключателями желаемые параметры нагрузок в моделях А3...А6 равными, например, 10 Вт и 0 ВАр.
6. Включите источник G1. О наличии напряжения на его выходе должна сигнализировать светящаяся лампочка.
7. Включите выключатели «СЕТЬ» измерителей параметров Р1, Р2 и моделей А3...А6.
8. Включите источник бесперебойного питания G2 и дождитесь выхода его на установившийся режим работы (светодиоды на его лицевой панели должны перестать мигать).
9. Включите однофазный источник питания G3.
10. Кнопкой « < » измерителей Р1 и Р2 выбирайте и фиксируйте отображаемые параметры режима на первичной и вторичной сторонах трансформатора А1 (напряжения, токи, активные, реактивные и полные мощности, коэффициенты мощности, частоту напряжения).
11. По завершении эксперимента отключите однофазный источник питания G3, источник бесперебойного питания G2, выключатели «СЕТЬ» измерителей параметров Р1, Р2 и моделей А3...А6, однофазный источник питания G1.

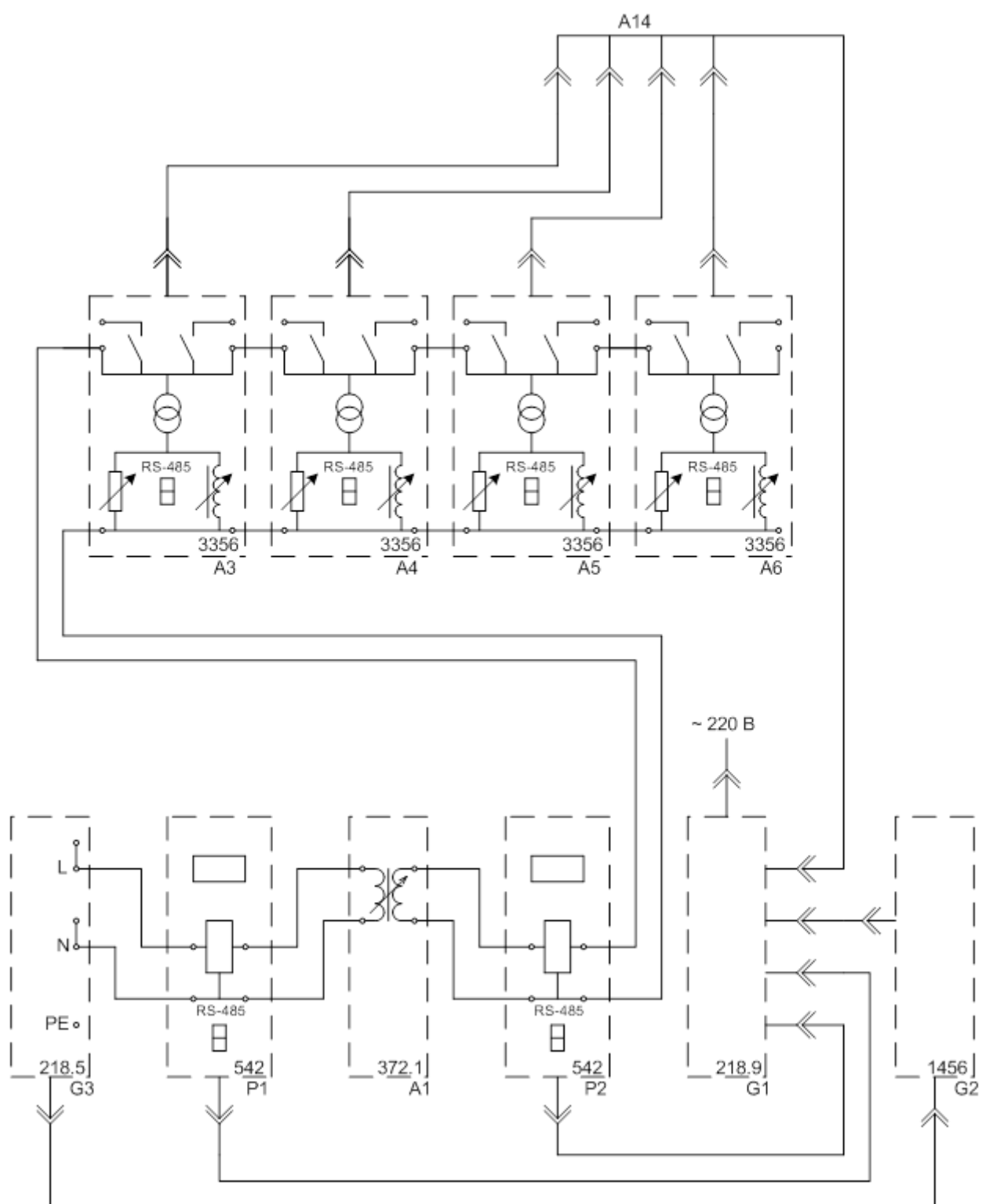


Рисунок 1.3 – Схема для измерения параметров установившегося режима работы однофазного трансформатора

## ***Часть 2. Натурное моделирование установившегося режима работы фазы линии электропередачи***

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления " $\oplus$ " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" однофазного источника питания G1 (G3).
3. Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рис. 1.4.
4. Установите переключателем желаемое значение коэффициента трансформации трансформатора A1, например, равным 1,0.
5. Установите переключателями желаемые параметры модели A7, линии электропередачи и нагрузок в моделях A3...A6 соответственно равными, например, 50 Ом; 0,15 Гн и 10 Вт, 10 ВАр.
6. Включите источник G1. О наличии напряжения на его выходе должна сигнализировать светящаяся лампочка.
7. Включите выключатели «СЕТЬ» измерителей параметров P1, P2 и моделей A3...A5.
8. Включите источник бесперебойного питания G2 и дождитесь выхода его на установившийся режим работы (светодиоды на его лицевой панели должны перестать мигать).
9. Включите однофазный источник питания G3.
10. Кнопкой « < » измерителей P1 и P2 выбирайте и фиксируйте отображаемые параметры режима в начале и конце модели A7 линии электропередачи (напряжения, токи, активные, реактивные и полные мощности).
11. По завершении эксперимента отключите однофазный источник питания G3, источник бесперебойного питания G2, выключатели «СЕТЬ» измерителей параметров P1, P2 и моделей A3...A5, однофазный источник питания G1.

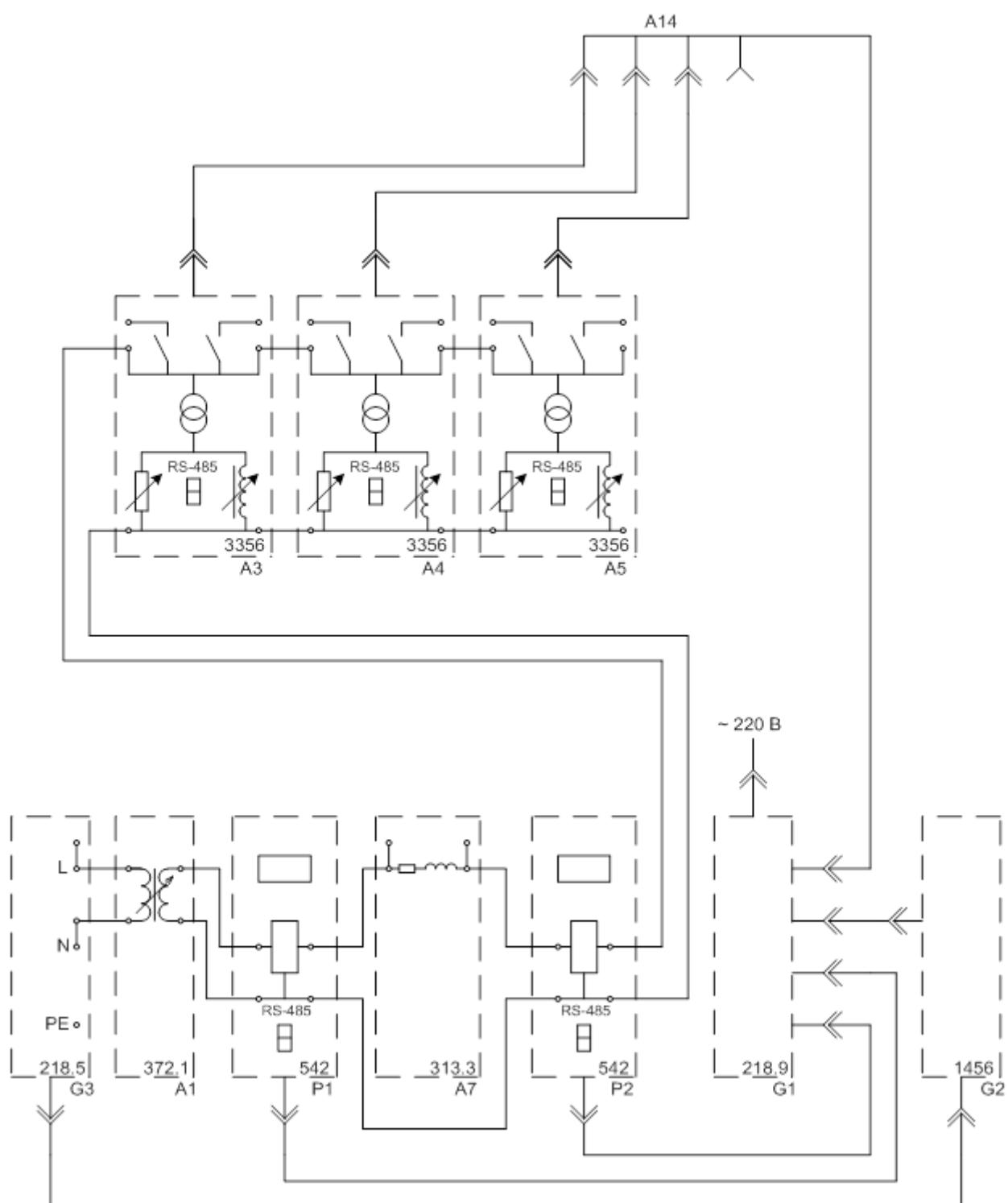


Рисунок 1.4 – Схема для измерения параметров установившегося режима работы фазы линии электропередачи.

### ***Часть 3. Снятие статических характеристик мощности по напряжению статической нагрузки***

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления " $\oplus$ " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" однофазного источника питания G1 (G3).
3. Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рис. 1.3.
4. Установите переключателем желаемое значение коэффициента трансформации трансформатора A1, например, равным 1,0.
5. Установите переключателями параметры модели A7, линии электропередачи соответственно равными 50 Ом и 0,15 Гн.
6. Установите переключателями желаемые параметры нагрузок в модели A3, например, соответственно равными 10 Вт, 10 Вар.
7. Установите переключателями желаемую емкостную нагрузку A12, например, 0 %.
8. Включите источник G1. О наличии напряжения на его выходе должна сигнализировать светящаяся лампочка.
9. Включите выключатели «СЕТЬ» измерителя параметров P1 и модели A3.
10. Включите источник бесперебойного питания G2 и дождитесь выхода его на установившийся режим работы (светодиоды на его лицевой панели должны перестать мигать).
11. Включите однофазный источник питания G3.
12. Варьируя коэффициент трансформации трансформатора A1, изменяйте напряжение **U** на нагрузке A3, A12 и заносите показания измерителя P1 (напряжение **U**, активную **P** и реактивную мощность **Q**, потребляемую нагрузкой) в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Результаты снятия показаний

|               |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|---------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| <b>U, В</b>   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>P, Вт</b>  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>Q, ВАр</b> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

По завершении эксперимента отключите однофазный источник питания G3, источник бесперебойного питания G2, выключатели «СЕТЬ» измерителя параметров P1 и модели A3, однофазный источник питания G1.

Используя данные таблицы 1.1, постройте искомые статические характеристики мощности нагрузки **P(U)** и **Q(U)**.

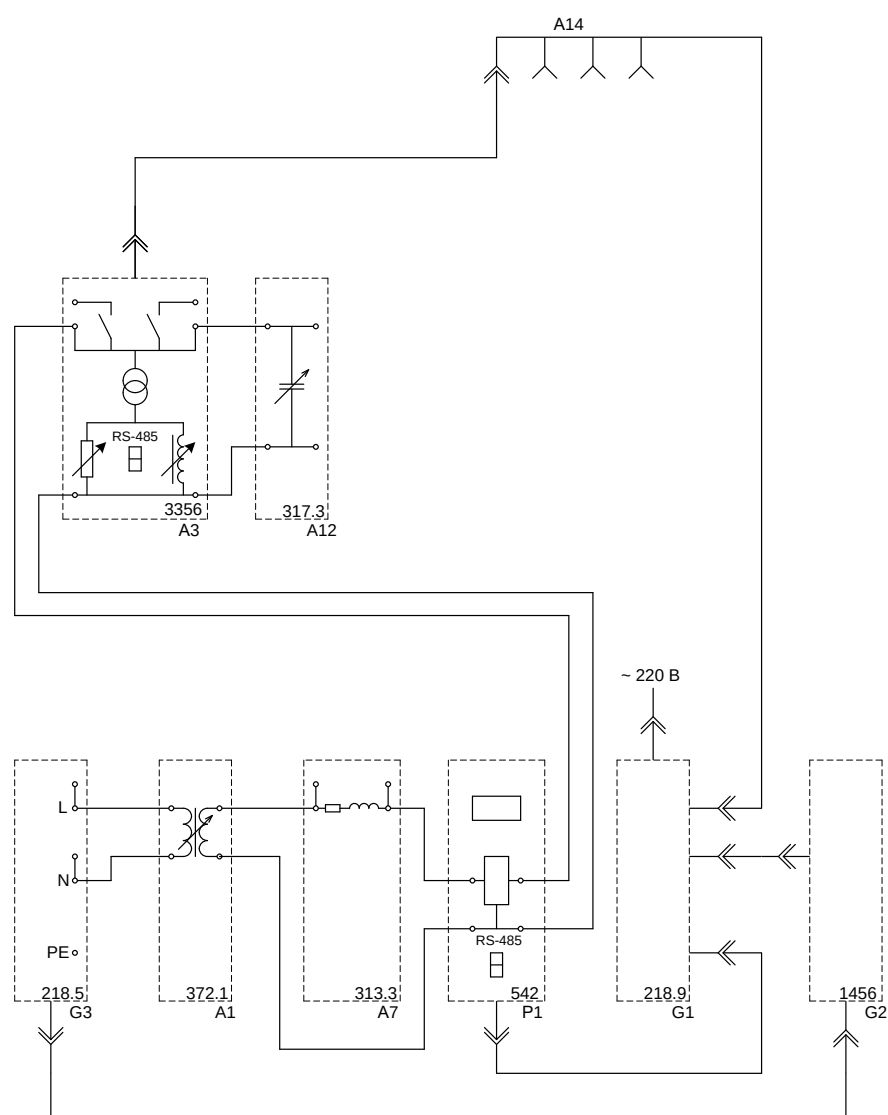


Рисунок 1.5 – Схема для снятия статической характеристики мощности по напряжению статической нагрузки.

### ***Содержание отчета:***

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

### ***Контрольные вопросы:***

1. Какие схемы замещения применятся для моделирования и расчетов трансформаторов?
2. Какие данные необходимы для вычисления активного сопротивления схемы замещения трансформатора?
3. От чего зависят потери холостого хода трансформатора?
4. В каких случаях применяют П-образные схемы замещения трансформатора?
5. Какими параметрами характеризуется установившийся режим работы

## **Лабораторная работа № 2**

### ***Установившиеся режимы распределительных электрических сетей.***

***Цель работы:*** Приобрести навыки измерения параметров установившегося режима работы линии электропередач.

### ***Основы теории:***

Измерения и расчёты установившихся режимов выполняют для того, чтобы определить, насколько приемлем рассматриваемый режим с точки

зрения качества доставляемой потребителю электрической энергии и соответствия токов в линиях допустимым токам.

В результате расчёта таких режимов находят потоки мощности на участках сети и напряжения в узловых точках.

Для расчёта вручную легче пользоваться методом контурных уравнений, хотя в программах для ЭВМ используется метод узловых напряжений.

Расчёт по методу контурных уравнений ведется в два этапа. Сначала определяется потокораспределение мощностей по участкам без учета потерь мощности по уравнению:

$$\sum_{i=1}^n S_i^* Z_i = 0,$$

где:  $S_i$  – комплекс полной мощности, протекающей по  $i$ -му участку сети;

$Z_i^*$  – комплексно-сопряжённое сопротивление  $i$ -го участка сети;

$n$  – число участков сети в контуре.

Это уравнение в комплексных числах можно заменить двумя уравнениями с вещественными величинами:

$$\sum_{i=1}^n (P_i R_i + Q_i X_i) = 0; \quad \sum_{i=1}^n (P_i X_i - Q_i R_i) = 0,$$

где:  $P_i$  и  $Q_i$  – соответственно активная и реактивная мощности, протекающие по  $i$ -му участку сети;

$R_i$  и  $X_i$  – соответственно активное и реактивное сопротивления  $i$ -го участка.

В результате расчёта по уравнениям находится потокораспределение без учета потерь мощности.

На втором этапе рассчитывается потокораспределение с учетом потерь мощности и напряжения в узлах сети. Для этого из всех найденных на первом этапе потоков мощности в качестве истинных принимаются два вблизи точки потокораздела, по ним находят потери мощности на участках и потоки

в начале и конце каждого участка, двигаясь в направлении от точки потоко-раздела к опорному (балансирующему) узлу.

$$\Delta P_{23} = \frac{(P_{23}^K)^2 + (Q_{23}^K)^2}{U_{ном}^2} R_{23}; \quad \Delta Q_{23} = \frac{(P_{23}^K)^2 + (Q_{23}^K)^2}{U_{ном}^2} X_{23}.$$

Мощность в начале участка 2 - 3:

$$P_{23}^H = P_{23}^K + \Delta P_{23}; \quad Q_{23}^H = Q_{23}^K + \Delta Q_{23}.$$

Мощность в конце следующего участка 1 – 2:

$$P_{12}^K = P_{23}^H + P_{2p}; \quad Q_{12}^K = Q_{23}^H + Q_{2p},$$

где:  $P_{2p}$ ,  $Q_{2p}$  – расчётные мощности в узле 2.

Аналогичным образом, двигаясь в обе стороны от точки потоко-раздела в направлении балансирующего узла, производят расчёт всех потоков мощности в сети.

Определив мощность вблизи балансирующего узла, можно найти напряжения во всех точках сети. Например, если известны мощности в начале участка 1-2  $P_{12}^H$  и  $Q_{12}^H$ , можно определить напряжение в узле 2:

$$U_2 = \sqrt{\left( U_1 - \frac{P_{12}^H R_{12} + Q_{12}^H X_{12}}{U_1} \right)^2 + \left( \frac{P_{12}^H X_{12} - Q_{12}^H R_{12}}{U_1} \right)^2}.$$

### ***Перечень используемого оборудования:***

| Обозначение | Наименование                    | Тип   | Параметры          |
|-------------|---------------------------------|-------|--------------------|
| G1          | Однофазный источник питания     | 218.9 | ~ 220 В / 16 А     |
| G2          | Источник бесперебойного питания | 1456  | 1000 ВА<br>~ 230 В |
| G3          | Однофазный источник питания     | 218.5 | ~ 220 В / 10 А     |
| A1, A2      | Однофазный трансформатор        | 372.1 | 80 ВА              |

|         |                                               |       |                                  |
|---------|-----------------------------------------------|-------|----------------------------------|
|         |                                               |       | 220 / 198...242<br>В             |
| A3, A4  | Модель трансформаторной подстанции и нагрузки | 3356  | ~ 220 В / 0...20 Вт / 0...20 ВАр |
| A7...A9 | Модель линии электропередачи                  | 313.3 | ~ 220 В / 0,3 А                  |
| A15     | Коммутатор измерителя мощностей               | 349   | 5 положений                      |
| P1, P2  | Измеритель параметров однофазной сети         | 542   | 0...500 В / 0...5 А / 2500 ВА    |

***Указания по технике безопасности при выполнении лабораторной работы представлены в Приложении 1.***

***Указания по выполнению лабораторной работы:***

***Часть 1. Натурное моделирование установившегося режима работы фазы распределительной электрической сети с односторонним питанием***

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления " " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" однофазного источника питания G1 (G3).
3. Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рис. 2.1.
4. Установите переключателем желаемое значение коэффициента трансформации трансформатора A1, например, равным 1,0.
5. Установите переключателями желаемые параметры моделей A7, A8 линий электропередачи и нагрузок в моделях A3, A4 соответственно равными, например, 50 Ом, 0,15 Гн и 10 Вт, 10 ВАр.
6. Включите источник G1. О наличии напряжения на его выходе должна сигнализировать светящаяся лампочка.

7. Включите выключатели «СЕТЬ» измерителя параметров Р1 и моделей А3, А4.

8. Включите источник бесперебойного питания G2 и дождитесь выхода его на установившийся режим работы (светодиоды на его лицевой панели должны перестать мигать).

9. Включите однофазный источник питания G3.

10. Меняя положение переключателя коммутатора А15, с помощью измерителя Р1, манипулируя кнопкой «<», определяйте величины напряжения, потоков активной, реактивной и полной мощностей на интересующих участках исследуемой сети (при положениях 1, 2, 3, 4, 5 переключателя коммутатора А15 измеряются параметры режима соответственно на входе трансформатора А1, в начале и конце линии электропередачи А7, начале и конце линии электропередачи А8).

11. По завершении эксперимента отключите однофазный источник питания G3, источник бесперебойного питания G2, выключатели «СЕТЬ» измерителя параметров Р1 и моделей А3, А4, однофазный источник питания G1.

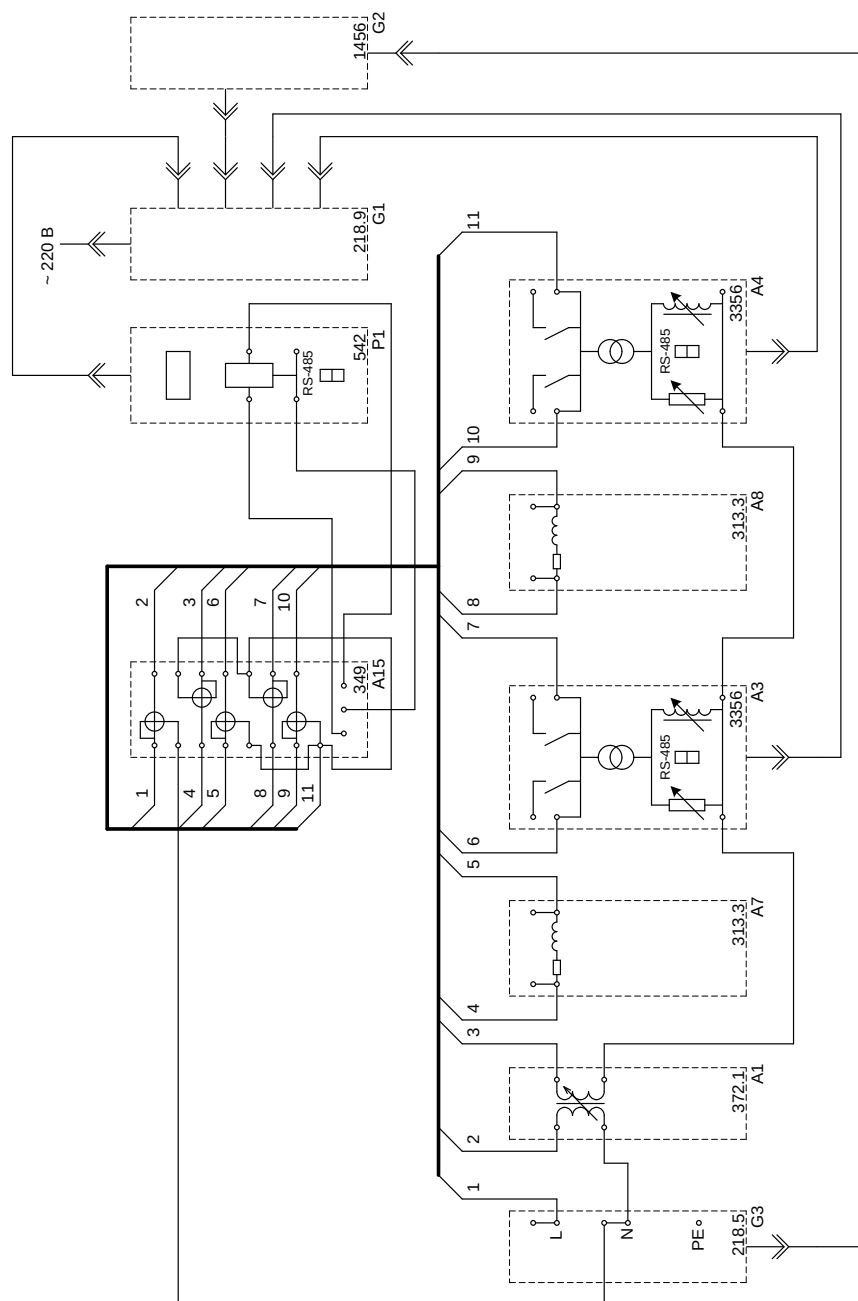
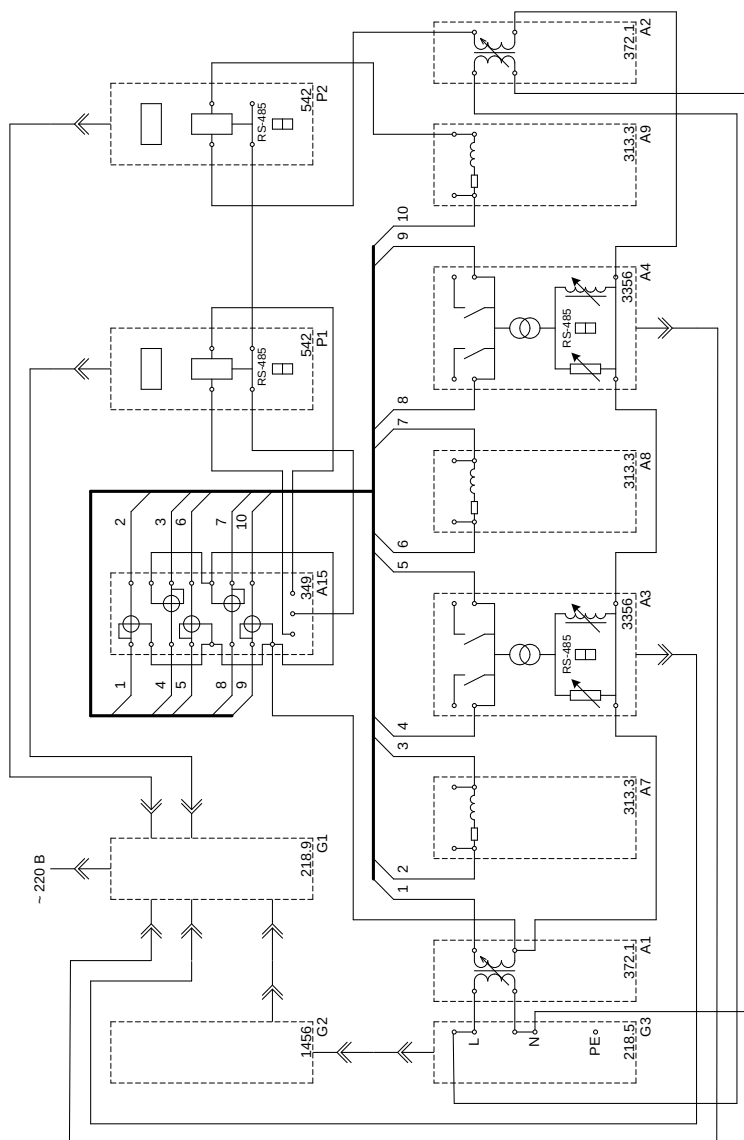


Рисунок 2.1 – Схема для измерения параметров установившегося режима работы фазы распределительной электрической сети с одно-  
сторонним питанием.

***Часть 2. Натурное моделирование установившегося режима работы фазы распределительной электрической сети с двусторонним питанием***

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления " $\oplus$ " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" однофазного источника питания G1 (G3).
3. Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рис. 2.2.
4. Установите переключателями желаемые значения коэффициентов трансформации трансформаторов A1 и A2, например, равными 1,0.
5. Установите переключателями желаемые параметры моделей A7...A9 линий электропередачи и нагрузок моделей A3, A4 соответственно равными, например, 50 Ом, 0,15 Гн и 10 Вт, 10 ВАр.
6. Включите источник G1. О наличии напряжения на его выходе должна сигнализировать светящаяся лампочка.
7. Включите выключатели «СЕТЬ» измерителей параметров P1, P2 и моделей A3, A4.
8. Включите источник бесперебойного питания G2 и дождитесь выхода его на установившийся режим работы (светодиоды на его лицевой панели должны перестать мигать).
9. Включите однофазный источник питания G3.
10. Меняя положение переключателя коммутатора A15, с помощью измерителя P1, манипулируя кнопкой «<», определяйте величины напряжения, потоков активной, реактивной и полной мощностей на интересующих участках исследуемой сети (при положениях 1, 2, 3, 4, 5 переключателя коммутатора A15 измеряются параметры режима соответственно в начале и конце линии электропередачи A7, начале и конце линии электропередачи A8, начале линии электропередачи A9).

12. По завершении эксперимента отключите однофазный источник питания G3, источник бесперебойного питания G2, выключатели «СЕТЬ» измерителей параметров P1, P2 и моделей A3, A4, однофазный источник питания G1.



Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

***Контрольные вопросы:***

6. Какая точка в сети называется точкой потоко раздела?
7. В чем отличие расчёта замкнутых сетей от разомкнутых?

***Лабораторная работа №3***

***Регулирование напряжения в распределительных электрических сетях***

***Цель:*** Приобрести навыки регулирования в распределительных электрических сетях

***Основы теории:***

Режим замкнутой электрической сети двух номинальных напряжений (потоки мощности в ветвях сети, напряжения в узлах) зависит от коэффициентов трансформации трансформаторов связи, с помощью которых

$$\underline{E} = E' + jE'' = U_1 \left( 1 - \prod_{i=1}^m k_{\pi i} \right),$$

где  $E'$  и  $E''$  – соответственно продольная и поперечная составляющие ЭДС;

$m$  – количество трансформаторов в контуре.

Если в контуре имеются трансформаторы только с продольным регулированием (обычные трансформаторы с ответвлениями), то:

$$\underline{E} = E' = U_1 \left( 1 - \prod_{i=1}^m k_{Ti} \right).$$

Эта ЭДС будет создавать уравнительную мощность:

$$\underline{S}_{yp} = P_{yp} + jQ_{yp} = \sqrt{3} U_1 I_{yp}^* = \sqrt{3} U_1 \frac{E^*}{\sqrt{3} Z_K^*} = \frac{U_1 E^*}{Z_K^*},$$

Если в контуре создаётся только продольная ЭДС, то:

$$\underline{S}_{yp} = P_{yp} + jQ_{yp} = \frac{U_1 E'}{Z_K^*} = \frac{U_1^2 \left( 1 - \prod_{i=1}^m k_{Ti} \right)}{Z_K^*}.$$

***Перечень используемого оборудования:***

| Обозначение | Наименование                                  | Тип   | Параметры                           |
|-------------|-----------------------------------------------|-------|-------------------------------------|
| G1          | Однофазный источник питания                   | 218.9 | ~ 220 В / 16 А                      |
| G2          | Источник бесперебойного питания               | 1456  | 1000 ВА<br>~ 230 В                  |
| G3          | Однофазный источник питания                   | 218.5 | ~ 220 В / 10 А                      |
| A1          | Однофазный трансформатор                      | 372.1 | 80 ВА<br>220 / 198...242<br>В       |
| A3          | Модель трансформаторной подстанции и нагрузки | 3356  | ~ 220 В / 0...20<br>Вт / 0...20 ВАр |
| A7, A8      | Модель линии электропередачи                  | 313.3 | ~ 220 В / 0,3 А                     |
| A12         | Емкостная нагрузка                            | 317.3 | ~ 220 В /<br>0...30 ВАр             |
| P1, P2      | Измеритель параметров однофазной сети         | 542   | 0...500 В / 0...5<br>А / 2500 ВА    |

***Указания по технике безопасности при выполнении лабораторной работы представлены в Приложении 1.***

***Указания по выполнению лабораторной работы:***

***Часть 1. Встречное регулирование напряжения***

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления " $\oplus$ " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" однофазного источника питания G1 (G3).
3. Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рис. 3.7.
4. Установите переключателем желаемое значение коэффициента трансформации трансформатора A1, например, равным 1,0.
5. Установите переключателями желаемые параметры моделей A7, A8 линий электропередачи и нагрузок модели A3 соответственно равными, например, 50 Ом; 0,15 Гн и 10 Вт, 10 ВАр.
6. Включите источник G1. О наличии напряжения на его выходе должна сигнализировать светящаяся лампочка.
7. Включите выключатели «СЕТЬ» измерителей параметров P1, P2 и модели A3.
8. Включите источник бесперебойного питания G2 и дождитесь выхода его на установившийся режим работы (светодиоды на его лицевой панели должны перестать мигать).
9. Включите однофазный источник питания G3.
10. С помощью измерителя P2 измеряйте напряжения в интересующих точках исследуемой сети.
11. С помощью измерителя P1 определяйте величины активной, реактивной и полной мощностей, потребляемых нагрузкой.

13. По завершении эксперимента отключите однофазный источник питания G3, источник бесперебойного питания G2, выключатели «СЕТЬ» измерителей параметров P1, P2 и модели A3, однофазный источник питания G1.

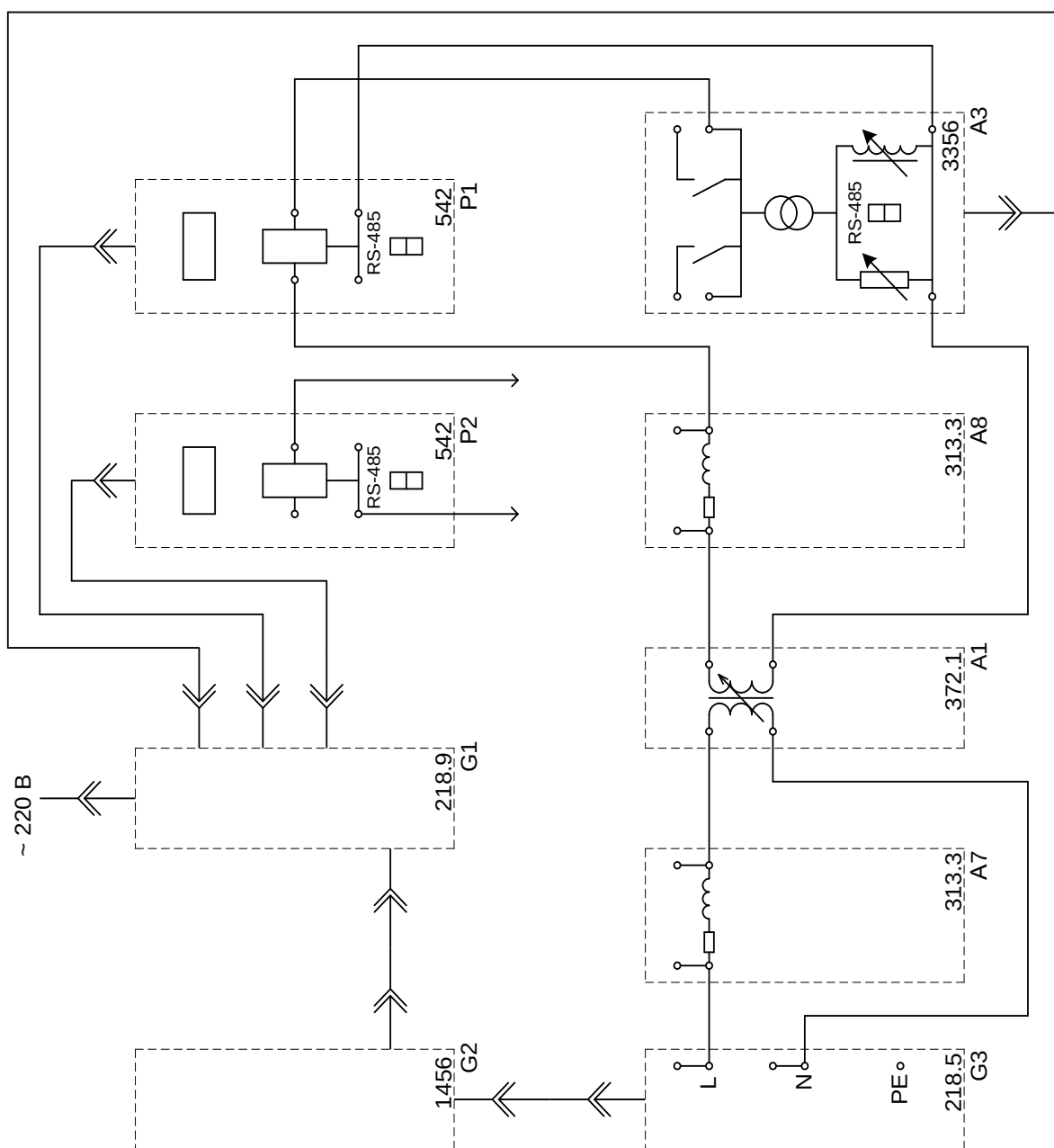


Рисунок 3.7 – Схема для изучения встречного регулирования напряжения.

## ***Часть 2. Регулирование напряжения путем поперечной компенсации реактивной мощности с помощью конденсаторной батареи***

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления " $\oplus$ " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" однофазного источника питания G1 (G3).
3. Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рис. 3.8.
4. Установите переключателем желаемое значение коэффициента трансформации трансформатора A1, например, равным 1,0.
5. Установите переключателями желаемые параметры моделей A7, A8 линий электропередачи и нагрузок модели A3 соответственно равными, например, 50 Ом; 0,15 Гн и 10 Вт, 10 ВАр.
6. Переключатель емкостной нагрузки A12 установите в положение «0».
7. Включите источник G1. О наличии напряжения на его выходе должна сигнализировать светящаяся лампочка.
8. Включите выключатели «СЕТЬ» измерителей параметров P1, P2 и модели A3.
9. Включите источник бесперебойного питания G2 и дождитесь выхода его на установившийся режим работы (светодиоды на его лицевой панели должны перестать мигать).
10. Включите однофазный источник питания G3.
11. С помощью измерителя P2 измеряйте напряжения в интересующих точках исследуемой сети.
12. С помощью измерителя P1 определяйте величины активной, реактивной и полной мощностей, потребляемых нагрузкой.
13. Регулирование напряжения осуществляйте изменением реактивной мощности, генерируемой емкостной нагрузкой A12.

14. По завершении эксперимента отключите однофазный источник питания G3, источник бесперебойного питания G2, выключатели «СЕТЬ» измерителей параметров P1, P2 и модели A3, однофазный источник питания G1.

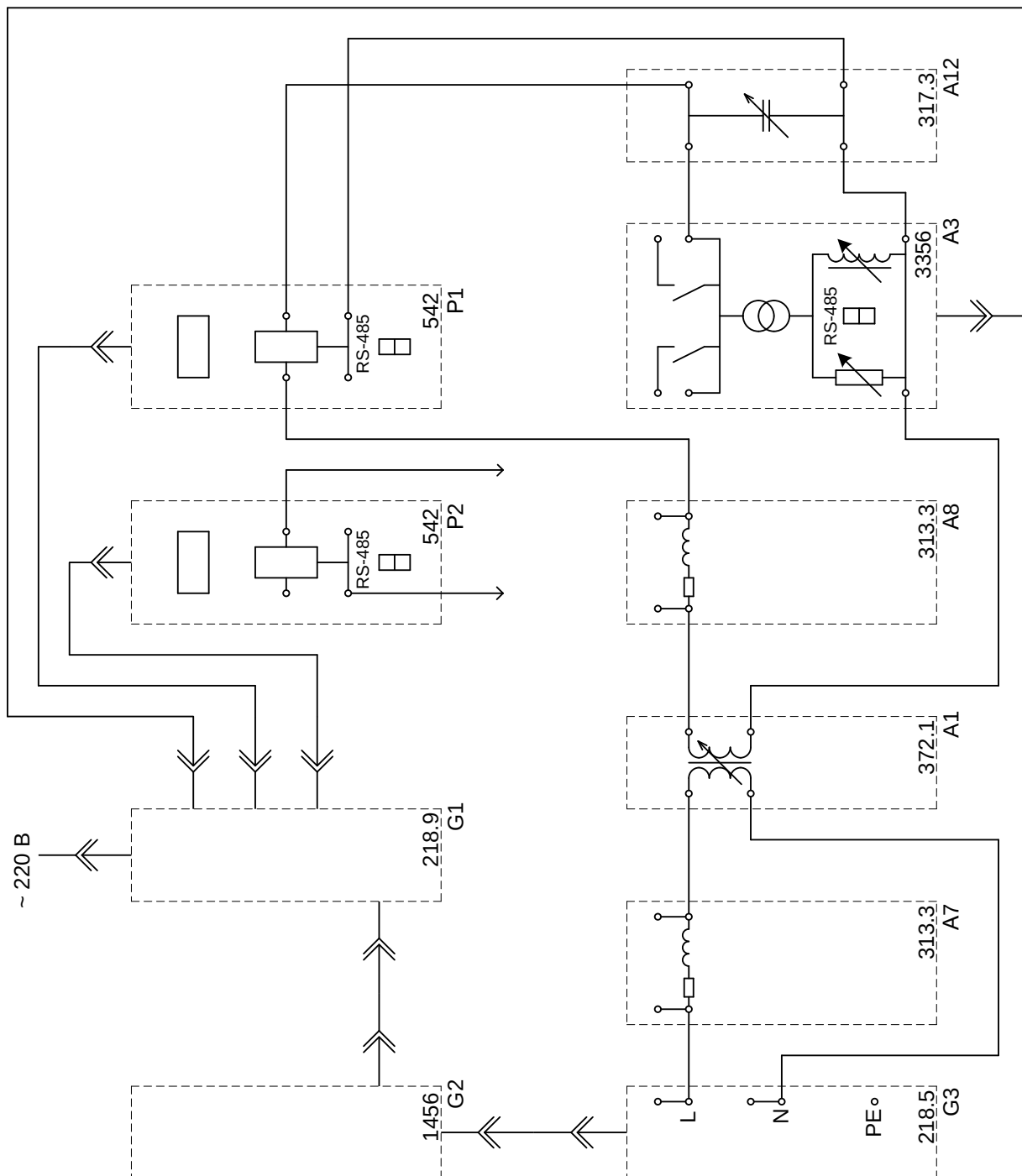


Рисунок 3.8 – Схема для изучения регулирования напряжения путем попеременной компенсации реактивной мощности.

**Содержание отчета:**

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

***Контрольные вопросы:***

1. Какая последовательность вычислений применяется при расчетах разомкнутых сетей?
2. Какие преобразования используют при упрощении схем замещения электрических сетей?
3. В чем отличие расчёта замкнутых сетей от разомкнутых?

***Лабораторная работа №4***

***Оптимизация режима местной распределительной электрической сети***

***Цель:*** Приобрести навыки оптимального управления нормальными режимами в ЭС

***Основы теории:***

Оптимальное управление нормальными режимами (НР) в ЭС заключается в том, чтобы за рассматриваемый период времени обеспечить надежное электроснабжение потребителя ЭЭ требуемым количеством при минимальных эксплуатационных затратах за этот период.

Оптимизация режимов соответствует требованиям достижения наибольшего народно-хозяйственного эффекта по критерию минимального расхода условного топлива (у.т).

Оптимизация режимов по принципам оперативно-диспетчерского управления ЭС осуществляется на различных временных и территориальных уровнях.

Оптимизация текущего режима – оптимизация режима за отрезок времени не более одного часа, при этом параметры режима в течение рассматриваемого отрезка времени постоянны. Оптимизация текущего режима (ОТР) применяется в ЭС не содержащих ГЭС и ТЭЦ с ограниченным запасом топлива, т.е. при условии, что нет ограничения на количество энергоносителя за некоторый период времени. При этом каждый момент времени можно рассматривать независимо от других, т.е. свести задачу управления ЭС в течение некоторого периода времени (суток) к последовательности независимых задач управления в каждый момент времени.

В действительности от момента сбора информации, расчета на ЭВМ до реализации режима проходит время. Поэтому можно говорить лишь о темпе выдачи управляющих воздействий (ежечасной, через каждые 10 минут, каждую минуту).

В качестве (минимизируем) целевой функции принимаются издержки за интервал времени между двумя, управляющими воздействиями, либо (при равенстве этих интервалов) издержки в единицу времени.

Допустимый режим должен удовлетворять условиям надежности электроснабжения и качества электроэнергии, выраженных в виде ограничений-равенств и неравенств на контролируемые параметры режима.

Оптимальный режим – такой из допустимых, при котором обеспечивается минимум суммарного расхода у.т. при заданном полезном отпуске электроэнергии.

Три вида задач оптимизации режимов:

- 1) оптимизация энергии энергосистемы по активной мощности ТЭС (распределение  $P$  между электростанциями);
- 2) оптимизация режима электрической сети, уменьшение  $\Delta P$  при оптимизации режима по  $U$ ,  $Q$  и  $n$ ;

3) более общая задача комплексной оптимизации режима ЭС.

1) Первая задача позволяет найти  $P$  электростанций, соответствующие минимуму суммарного расхода у.т. с приближенным учетом потерь в сети при заданных нагрузках потребителей.

Если не учитывать ограничения-неравенства на  $P$  электростанций и сетей, то в математической постановке – это задача на условный экстремум, решаемая методом Лагранжа.

При учете ограничений-неравенств на  $P$  станций и линий – это задача нелинейного программирования.

2) Оптимизация режима электрических сетей приводит к уменьшению  $\Delta P$  в результате оптимального выбора напряжения узлов,  $Q$  источников и коэффициентов трансформации регулируемых трансформаторов при учете технических ограничений.

3) Комплексная оптимизация режима позволяет находить значения  $P$  станций, генерируемых  $Q$ , такие модули и фазы  $U$  в узлах сети при учете технических ограничений.

***Перечень используемого оборудования:***

| Обозначение | Наименование                                  | Тип   | Параметры                                |
|-------------|-----------------------------------------------|-------|------------------------------------------|
| G1          | Однофазный источник питания                   | 218.9 | $\sim 220$ В / 16 А                      |
| G2          | Источник бесперебойного питания               | 1456  | 1000 ВА<br>$\sim 230$ В                  |
| G3          | Однофазный источник питания                   | 218.5 | $\sim 220$ В / 10 А                      |
| A1, A2      | Однофазный трансформатор                      | 372.1 | 80 ВА<br>220 / 198...242<br>В            |
| A3...A6     | Модель трансформаторной подстанции и нагрузки | 3356  | $\sim 220$ В / 0...20<br>Вт / 0...20 ВАр |
| A7...A11    | Модель линии электропередачи                  | 313.3 | $\sim 220$ В / 0,3 А                     |

|        |                                             |      |                                  |
|--------|---------------------------------------------|------|----------------------------------|
| A14    | Удлинитель переносной четырех-<br>местный   | -    | ~ 220 В / 16 А                   |
| A16    | Преобразователь интерфейсов<br>USB / RS-485 | 3305 | ОВЕН АС4                         |
| A17    | Нетбук                                      | 1420 | -                                |
| P1, P2 | Измеритель параметров<br>однофазной сети    | 542  | 0...500 В / 0...5<br>А / 2500 ВА |

***Указания по технике безопасности при выполнении лабораторной работы представлены в Приложении 1.***

***Указания по выполнению лабораторной работы:***

***Часть 1. Определение потери активной мощности в местной распределительной электрической сети, выполненной по петлевой схеме***

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления " " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" однофазного источника питания G1 (G3).
3. Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рис.4.1.
4. Установите переключателями желаемые значения коэффициентов трансформации трансформаторов A1 и A2, например, равными 1,0.
5. Установите переключателями желаемые параметры моделей A7...A11 линий электропередачи равными, например, 50 Ом; 0,09 Гн.
6. Установите переключателями желаемые параметры нагрузок моделей A3...A6 равными, например, 20 Вт и 10 ВАр.
7. Включите источник G1. О наличии напряжения на его выходе должна сигнализировать светящаяся лампочка.

8. Включите выключатели «СЕТЬ» измерителей параметров  $P_1$ ,  $P_2$  и моделей  $A_3 \dots A_6$ .

9. Включите источник бесперебойного питания  $G_2$  и дождитесь выхода его на установившийся режим работы (светодиоды на его лицевой панели должны перестать мигать).

10. Включите однофазный источник питания  $G_3$ .

11. С помощью измерителей  $P_1$  и  $P_2$  измерьте активные мощности  $P_1$  и  $P_2$ , поступающие в электрическую сеть соответственно через трансформаторы  $A_1$  и  $A_2$  первого и второго центров питания.

12. С помощью измерителей моделей трансформаторных подстанций  $A_3 \dots A_6$  измерьте соответствующие активные мощности  $P_3 \dots P_6$ , потребляемые нагрузками этих подстанций.

13. Вычислите искомую потерю активной мощности в электрической сети в именованных единицах по выражению

$$\Delta P = (P_1 + P_2) - (P_3 + P_4 + P_5 + P_6).$$

14. Вычислите искомую потерю активной мощности в электрической сети в относительных единицах (процентах) по выражению

$$\Delta P^* = 100 \times \Delta P / (P_1 + P_2).$$

15. По завершении эксперимента отключите однофазный источник питания  $G_3$ , источник бесперебойного питания  $G_2$ , выключатели «СЕТЬ» измерителей параметров  $P_1$ ,  $P_2$  и моделей  $A_3 \dots A_6$ , однофазный источник питания  $G_1$ .

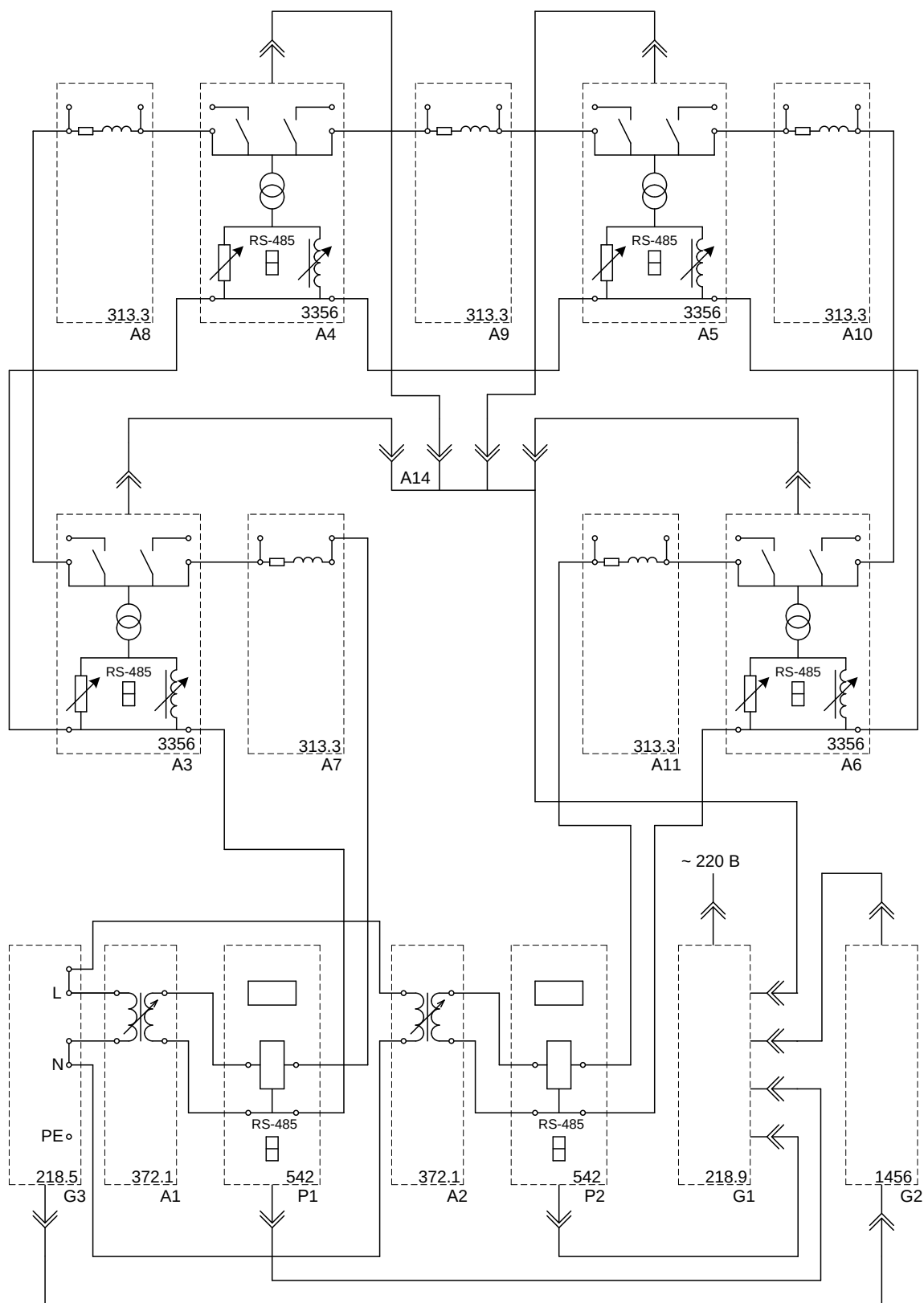


Рисунок 4.1 – Схема для определения точки нормального (оптимально-го) разрыва (разреза) в местной распределительной электрической сети.

***Часть 2. Оценка влияния разницы напряжений на шинах центров питания на потери активной мощности в местной распределительной электрической сети, выполненной по петлевой схеме, при ее работе в замкнутом режиме***

1. Определите согласно п. 4.1 настоящих указаний при одинаковых коэффициентах трансформации трансформаторов А1 и А2, например, равных 1,0, потерю активной мощности в электрической сети в относительных единицах (процентах)  $\Delta P^*_1$ .
2. Определите согласно п. 4.1 настоящих указаний при разных коэффициентах трансформации трансформаторов А1 и А2, например, равных 1,0 и 0,9, потерю активной мощности в электрической сети в относительных единицах (процентах)  $\Delta P^*_2$ .
3. Сравните потери активной мощности  $\Delta P^*_1$  и  $\Delta P^*_2$ , определенные при различных напряжениях на шинах центров питания и сделайте вывод о влиянии разницы этих напряжений на потерю мощности в электрической сети.

***Часть 3. Оценка влияния места разрыва (разреза) местной распределительной электрической сети, выполненной по петлевой схеме, на потерю в ней активной мощности***

1. Определите согласно п. 4.1 настоящих указаний, потерю активной мощности в электрической сети в относительных единицах (процентах)  $\Delta P^*_1$  при разрыве (разрезе) электрической сети между моделью трансформаторной подстанции А3 и моделью линии электропередачи А7.
2. Определите согласно п. 4.1 настоящих указаний, потерю активной мощности в электрической сети в относительных единицах (процентах)  $\Delta P^*_2$  при разрыве (разрезе) электрической сети между моделью трансформаторной подстанции А4 и моделью линии электропередачи А8.
3. Определите согласно п. 4.1 настоящих указаний, потерю активной мощности в электрической сети в относительных единицах (процентах)

$\Delta P^*_3$  при разрыве (разрезе) электрической сети между моделью трансформаторной подстанции А4 и моделью линии электропередачи А9.

4. Определите согласно п. 4.1 настоящих указаний, потерю активной мощности в электрической сети в относительных единицах (процентах)  $\Delta P^*_4$  при разрыве (разрезе) электрической сети между моделью трансформаторной подстанции А5 и моделью линии электропередачи А10.

5. Определите согласно п. 4.1 настоящих указаний, потерю активной мощности в электрической сети в относительных единицах (процентах)  $\Delta P^*_5$  при разрыве (разрезе) электрической сети между моделью трансформаторной подстанции А6 и моделью линии электропередачи А11.

6. Сравните потери активной мощности  $\Delta P^*_1... \Delta P^*_5$ , определенные при устройстве разрывов (разрезов) в различных местах электрической сети и сделайте вывод о влиянии этого места на потерю мощности в электрической сети.

***Часть 4. Определение точки нормального (оптимального) разрыва (разреза) в местной распределительной электрической сети, выполненной по петлевой схеме, по критерию минимума потери активной мощности***

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

2. Соедините гнезда защитного заземления " $\oplus$ " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" однофазного источника питания G1 (G3).

3. Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рис.4.1.

4. Установите переключателями желаемые значения коэффициентов трансформации трансформаторов А1 и А2, например, равными 1,0.

5. Установите переключателями желаемые параметры моделей А7...А11 линий электропередачи соответственно равными, например,  $R_7 = 50$  Ом и  $L_7 = 0,03$  Гн,  $R_8 = 50$  Ом и  $L_8 = 0,03$  Гн,  $R_9 = 50$  Ом и  $L_9 = 0,03$  Гн,  $R_{10} = 100$  Ом и  $L_{10} = 0,06$  Гн,  $R_{11} = 100$  Ом и  $L_{11} = 0,06$  Гн.

6. Установите переключателями желаемые параметры нагрузок моделей А3...А6 соответственно равными, например, 10 Вт и 8 Вар, 10 Вт и 8 Вар, 20 Вт и 16 Вар, 20 Вт и 16 Вар.

7. Выполните разрыв (разрез) в электрической сети между моделью подстанции А4 и моделью линии электропередачи А9, принимая его нормальным (оптимальным) в предшествующем режиме работы сети.

8. Включите источник G1. О наличии напряжения на его выходе должна сигнализировать светящаяся лампочка.

9. Включите выключатели «СЕТЬ» измерителей параметров P1, P2 и моделей А3...А6.

10. Включите источник бесперебойного питания G2 и дождитесь выхода его на установившийся режим работы (светодиоды на его лицевой панели должны перестать мигать).

11. Включите однофазный источник питания G3.

12. С помощью измерителей P1 и P2 измерьте полные мощности  $S_1$  и  $S_2$ , поступающие в электрическую сеть соответственно через трансформаторы А1 и А2 первого и второго центров питания.

13. С помощью измерителей моделей трансформаторных подстанций А3...А6 измерьте соответствующие полные мощности  $S_3... S_6$ , потребляемые нагрузками этих подстанций.

14. Вычислите поток полной мощности от первого центра питания (трансформатора А1) по модели линии электропередачи А7 к модели подстанции и нагрузок А3 по выражению

$$S_{13} = (S_3(R_8+R_9+R_{10}+R_{11})+S_4(R_9+R_{10}+R_{11})+S_5(R_{10}+R_{11})+S_6R_{11}) / (R_7+R_8+R_9+R_{10}+R_{11})$$

15. Вычислите поток полной мощности от второго центра питания (трансформатора A2) по модели линии электропередачи A11 к модели подстанции и нагрузок A6 по выражению

$$S_{26} = (S_6(R_7+R_8+R_9+R_{10})+S_5(R_7+R_8+R_9)+S_4(R_7+R_8)+S_3R_7) / (R_7+R_8+R_9+R_{10}+R_{11})$$

16. Вычислите поток полной мощности по модели линии электропередачи A8 от модели подстанции A3 к модели подстанции A4 по выражению

$$S_{34} = S_{13} - S_3$$

17. Вычислите поток полной мощности по модели линии электропередачи A9 от модели подстанции A4 к модели подстанции A5 по выражению

$$S_{45} = S_{34} - S_4$$

18. Вычислите поток полной мощности по модели линии электропередачи A10 от модели подстанции A5 к модели подстанции A6 по выражению

$$S_{56} = S_{45} - S_5$$

19. Выявите поток мощности из числа  $S_{34}$ ,  $S_{45}$ ,  $S_{56}$  с отрицательным знаком, что означает его противоположное направление предварительно выбранному.

20. Определите узел потокораспределения – узел, к которому мощности притекают с разных сторон.

21. В качестве точки нормального (оптимального) разрыва (разреза) электрической сети выберите точку, примыкающую к узлу потокоораздела со стороны меньшего потока мощности.

22. Определите согласно п. 4.1 настоящих указаний, потерю активной мощности в электрической сети в относительных единицах (процентах)  $\Delta P^*_1$  при разрыве (разрезе) электрической сети в точке нормального (оптимального) разрыва (разреза).

***Часть 5. Работа местной распределительной электрической сети, выполненной по петлевой схеме, в режиме автоматического выбора***

***точки нормального разрыва (разреза) по критерию минимума потери активной мощности***

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления " $\oplus$ " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" однофазного источника питания G1 (G3).
3. Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рис.4.1.
4. Установите переключателями желаемые значения коэффициентов трансформации трансформаторов A1 и A2, например, равными 1,0.
5. Установите переключателями желаемые параметры моделей A7...A11 линий электропередачи соответственно равными, например,  $R_7 = 50$  Ом и  $L_7 = 0,03$  Гн,  $R_8 = 50$  Ом и  $L_8 = 0,03$  Гн,  $R_9 = 50$  Ом и  $L_9 = 0,03$  Гн,  $R_{10} = 100$  Ом и  $L_{10} = 0,06$  Гн,  $R_{11} = 100$  Ом и  $L_{11} = 0,06$  Гн.
6. Установите переключателями желаемые параметры нагрузок моделей A3...A6 соответственно равными, например, 10 Вт и 8 Вар, 10 Вт и 8 Вар, 20 Вт и 16 Вар, 20 Вт и 16 Вар.
7. Включите источник G1. О наличии напряжения на его выходе должна сигнализировать светящаяся лампочка.
8. Включите выключатели «СЕТЬ» измерителей параметров P1, P2 и моделей A3...A6.
9. Включите источник бесперебойного питания G2 и дождитесь выхода его на установившийся режим работы (светодиоды на его лицевой панели должны перестать мигать).
10. Включите однофазный источник питания G3.

Примечание: установите программное обеспечение на ПК, если это не было сделано ранее.

11. Приведите в рабочее состояние персональный компьютер и запустите прикладную программу «Распределительная сеть».

12. С помощью выпадающих списков на экране ПК установите значения активных сопротивлений линий электропередачи равными реальным активным сопротивлениям моделей А7...А11 линий электропередачи.

13. Дистанционно управляйте выключателями моделей подстанций А3...А6 и определяйте потери активной мощности в сети.

14. Переведите программу в автоматический режим работы соответствующим переключателем.

15. Изменяйте параметры моделей А7...А11 линий электропередачи и параметры нагрузок моделей А3...А6 подстанций соответствующими ручками и наблюдайте процесс автоматического выбора точки разреза сети.

#### ***Содержание отчета:***

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

#### ***Контрольные вопросы:***

1. Характеристика системы распределения электрической энергии
2. Активная проводимость ВЛ
3. Схемы замещения линий электропередач
4. Кабельные линии электропередачи
5. Номинальные напряжения и классификация электрических сетей

## **Лабораторная работа №5**

### **Оптимизация режима районной распределительной электрической сети**

**Цель:** Исследовать влияние компенсации реактивной мощности с помощью конденсаторной батареи на параметры установившегося режима разомкнутой распределительной электрической сети

#### **Основы теории:**

Компенсирующие устройства (КУ), устанавливаемые в узлах электрической сети, оказывают комплексное влияние на параметры режима. Их влияние проявляется в том, что изменяются потоки реактивной мощности по сети. Следствием этого является изменение напряжений в узлах, что, в свою очередь, приводит к изменению генерируемой зарядной мощности линий. В результате все эти факторы в совокупности оказывают влияние на потери активной и реактивной мощности в сети. Для простейшего случая сети, состоящей из одного элемента с подключённым в узле нагрузки КУ, генерирующей реактивную мощность, взаимосвязи указанных параметров режима определяются следующими соотношениями:

– потери активной мощности

$$\Delta P = \frac{P^2 + (Q - Q_{\text{ку}})^2}{U^2} R;$$

– потери реактивной мощности

$$\Delta Q = \frac{P^2 + (Q - Q_{\text{ку}})^2}{U^2} X;$$

– зарядная мощность

$$Q_c = U^2 B;$$

– потеря напряжения

$$\Delta U = \frac{PR + (Q - Q_{\text{ку}})X}{U},$$

где:  $P$  и  $Q$  – активная и реактивная мощности нагрузки;

$R$  и  $X$  – активное и реактивное сопротивления элемента сети;

$U$  – напряжение;

$B$  – ёмкостная проводимость линии.

В сложных сетях со многими элементами проявляется взаимосвязь всех узлов и ветвей.

***Перечень используемого оборудования:***

| Обозначение | Наименование                                  | Тип   | Параметры                           |
|-------------|-----------------------------------------------|-------|-------------------------------------|
| G1          | Однофазный источник питания                   | 218.9 | ~ 220 В / 16 А                      |
| G2          | Источник бесперебойного питания               | 1456  | 1000 ВА<br>~ 230 В                  |
| G3          | Однофазный источник питания                   | 218.5 | ~ 220 В / 10 А                      |
| A1, A2      | Однофазный трансформатор                      | 372.1 | 80 ВА<br>220 / 198...242<br>В       |
| A3, A4      | Модель трансформаторной подстанции и нагрузки | 3356  | ~ 220 В / 0...20<br>Вт / 0...20 ВАр |
| A7...A9     | Модель линии электропередачи                  | 313.3 | ~ 220 В / 0,3 А                     |
| A12, A13    | Ёмкостная нагрузка                            | 317.3 | ~ 220 В /<br>0...30 ВАр             |
| A14         | Удлинитель переносной четырех-местный         | -     | ~ 220 В / 16 А                      |
| A15         | Коммутатор измерителя мощностей               | 349   | 5 положений                         |
| P1, P2      | Измеритель параметров однофазной сети         | 542   | 0...500 В / 0...5<br>А / 2500 ВА    |

***Указания по технике безопасности при выполнении лабораторной работы представлены в Приложении 1.***

***Указания по выполнению лабораторной работы:***

## ***Часть 1. Измерение и определение параметров режима замкнутой (кольцевой) районной распределительной электрической сети***

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления " $\oplus$ " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" однофазного источника питания G1 (G3).
3. Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рис. 5.1.
4. Установите переключателями желаемые значения коэффициентов трансформации трансформаторов A1 и A2, например, равными 1,0.
5. Установите переключателями желаемые параметры моделей A7...A9 линий электропередачи и нагрузок моделей A3, A4 соответственно равными, например, 50 Ом, 0,15 Гн и 20 Вт, 10 ВАр.
6. Включите источник G1. О наличии напряжения на его выходе должна сигнализировать светящаяся лампочка.
7. Включите выключатели «СЕТЬ» измерителей параметров P1, P2 и моделей A3, A4.
8. Включите источник бесперебойного питания G2 и дождитесь выхода его на установившийся режим работы (светодиоды на его лицевой панели должны перестать мигать).
9. Включите однофазный источник питания G3.
10. Меняя положение переключателя коммутатора A15, с помощью измерителя P1, манипулируя кнопкой « < », измеряйте величины напряжения, потоков активной, реактивной и полной мощностей на интересующих участках исследуемой сети (при положениях 1, 2, 3, 4, 5 переключателя коммутатора A15 измеряются параметры режима соответственно в начале и конце линии электропередачи A7, начале и конце линии электропередачи A8, начале линии электропередачи A9).

11. С помощью измерителя Р2, манипулируя кнопкой « < », измеряйте величины напряжения, потоков активной, реактивной и полной мощностей в конце линии электропередачи А9.

12. С помощью измерителей моделей подстанции А4, А4 , манипулируя кнопкой « < », измеряйте величины напряжения, активной, реактивной и полной мощностей нагрузок.

13. Потерю активной (реактивной) мощности  $\Delta P$  ( $\Delta Q$ ) в электрической сети определяйте как разницу между суммой активных (реактивных) мощностей, поступающих в сеть от источника питания через трансформаторы А1 и А2 и суммой активных (реактивных) мощностей, потребляемых нагрузками моделей А3 и А4.

14. По завершении эксперимента отключите однофазный источник питания G3, источник бесперебойного питания G2, выключатели «СЕТЬ» измерителей параметров Р1, Р2 и моделей А3, А4, однофазный источник питания G1.

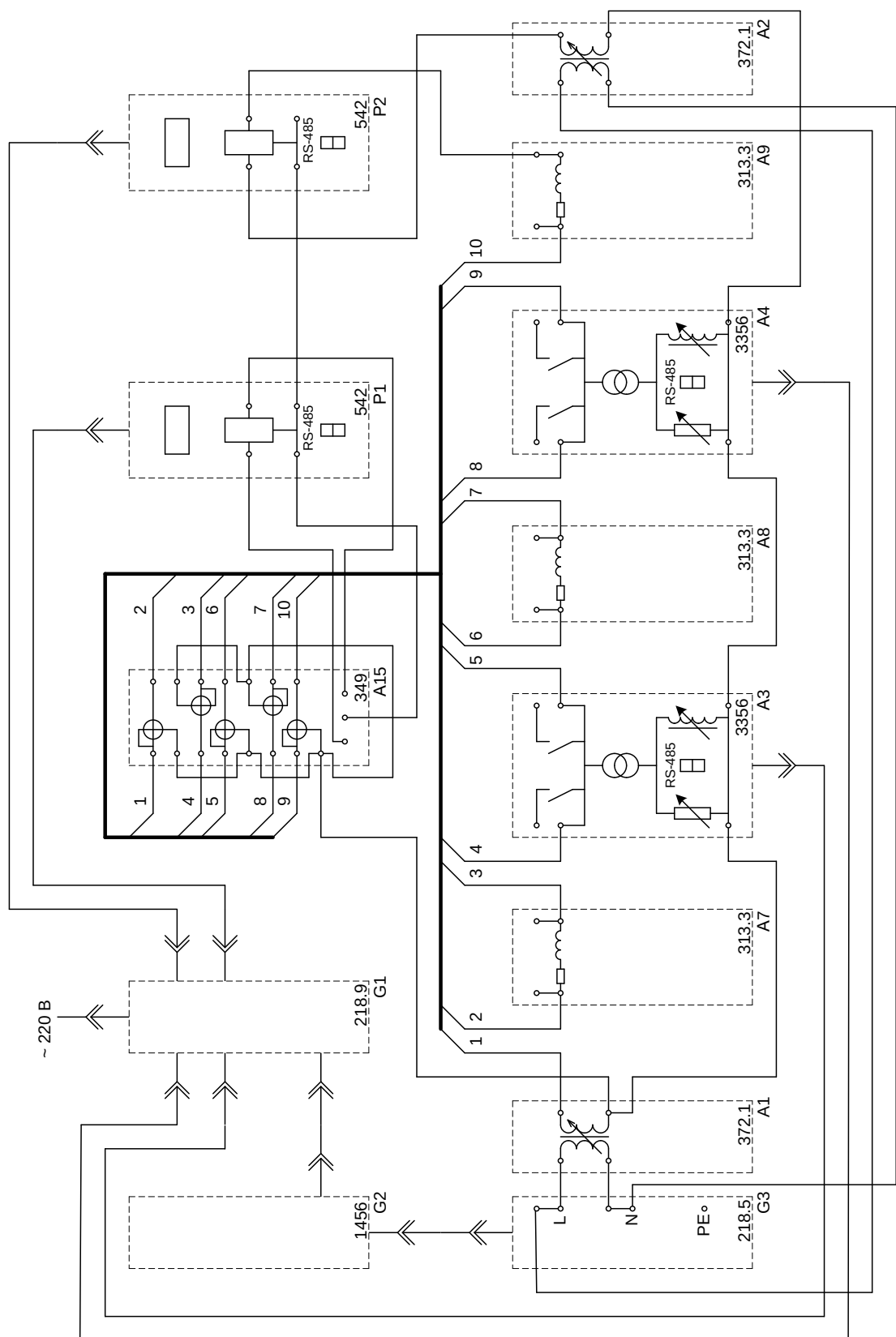


Рисунок 5.1 – Схема для измерения потоков распределения и определения потерь мощности в замкнутой (кольцевой) распределительной электрической сети.

***Часть 2. Определение оптимальной мощности компенсирующих конденсаторов в замкнутой (кольцевой) районной распределительной электрической сети по критерию минимума потери активной мощности***

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления " $\oplus$ " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" однофазного источника питания G1 (G3).
3. Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рис. 5.2.
4. Установите переключателями желаемые значения коэффициентов трансформации трансформаторов A1 и A2, например, равными 1,0.
5. Установите переключателями желаемые параметры моделей A7...A9 линий электропередачи равными, например, 50 Ом и 0,15 Гн.
6. Установите переключатели емкостных нагрузок A12 и A13 в крайнее против часовой стрелки положение.
7. Установите переключателями желаемые параметры нагрузок моделей A3, A4 соответственно равными, например, 15 Вт, 10 ВАр и 20 Вт, 15 ВАр.
8. Включите источник G1. О наличии напряжения на его выходе должна сигнализировать светящаяся лампочка.
9. Включите выключатели «СЕТЬ» измерителей параметров P1, P2 и моделей A3, A4.
10. Включите источник бесперебойного питания G2 и дождитесь выхода его на установившийся режим работы (светодиоды на его лицевой панели должны перестать мигать).
11. Включите однофазный источник питания G3.

12. Меняя положение переключателя емкостной нагрузки A12, увеличивайте ее мощность  $Q_{12}$ , определяйте согласно п. 5.1 настоящего руководства потерю мощности  $\Delta P$  в сети и заносите их в таблицу 5.2.1.

Таблица 5.2.1

|                       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-----------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $Q_{12}, \text{ВАр}$  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $\Delta P, \text{Вт}$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

13. Верните переключатель емкостной нагрузки A12 в крайнее против часовой стрелки положение.

14. Меняя положение переключателя емкостной нагрузки A13, увеличивайте ее мощность  $Q_{12}$ , определяйте согласно п. 5.1 настоящего руководства потерю мощности  $\Delta P$  в сети и заносите их в таблицу 5.2.2.

Таблица 5.2.2

|                       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-----------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $Q_{12}, \text{ВАр}$  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $\Delta P, \text{Вт}$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

15. По завершении эксперимента отключите однофазный источник питания G3, источник бесперебойного питания G2, выключатели «СЕТЬ» измерителей параметров P1, P2 и моделей A3, A4, однофазный источник питания G1.

16. Определите оптимальные мощности компенсирующих конденсаторов, как мощности емкостных нагрузок A12 и A13 из таблиц 5.2.1 и 5.2.2, при которых потеря мощности  $\Delta P$  минимальна.

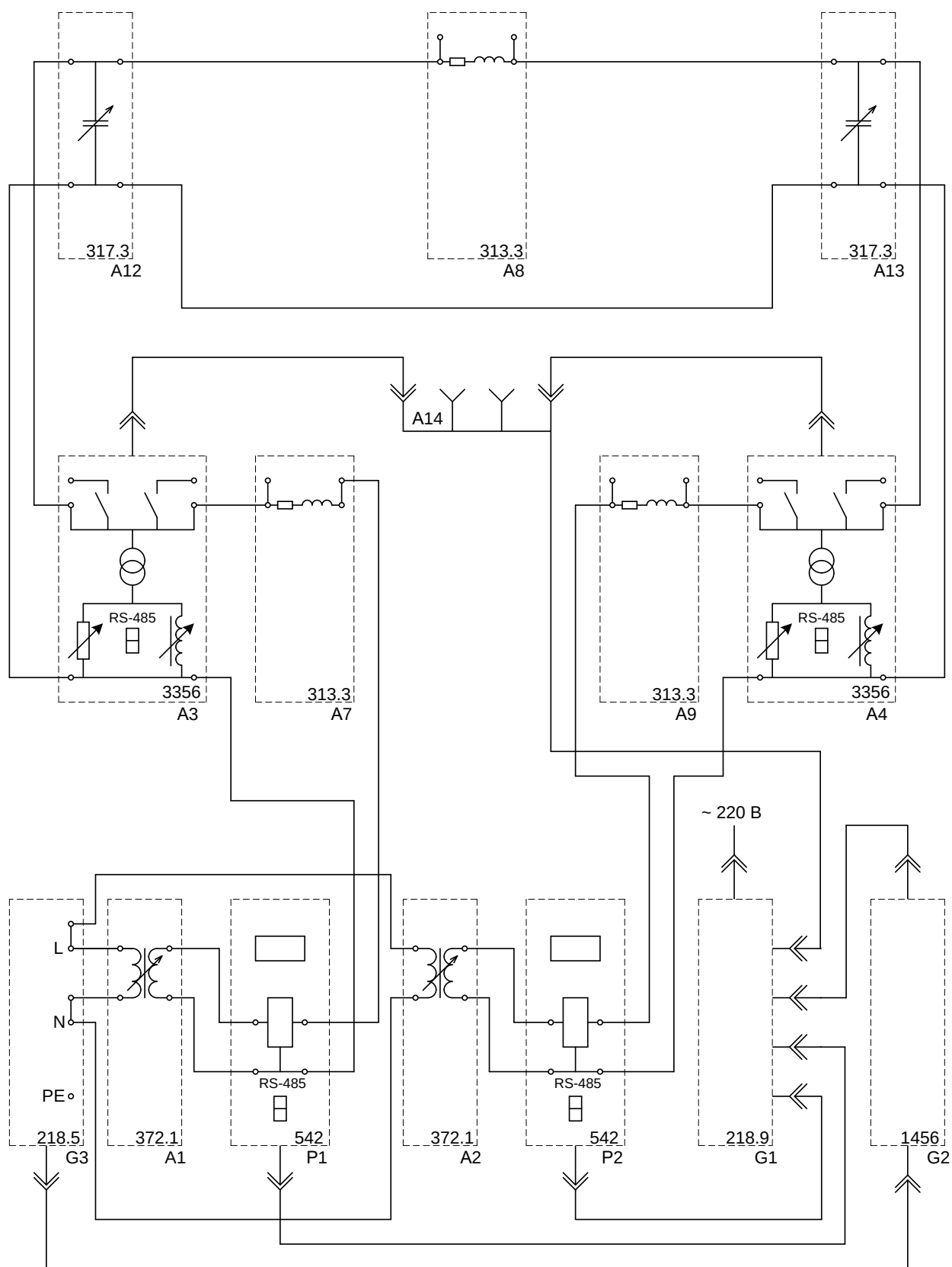


Рисунок 5.2 – Схема для определения оптимальной мощности компенсирующих конденсаторов устройств в замкнутой (кольцевой) районной распределительной электрической сети.

### ***Содержание отчета:***

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

### ***Контрольные вопросы:***

1. Что понимается под компенсирующим устройством? Какие бывают виды компенсирующих устройств?
2. Для чего устанавливают компенсирующие устройства в электрической сети?
3. Как влияет установка компенсирующих устройств на потери мощности и напряжения в узлах сети? Почему?
4. Чем объясняется, что мощность по линиям изменяется при изменении мощности компенсирующих устройств?
5. Почему эффект по потерям мощности в сети зависит от места установки компенсирующего устройства?

## ***5. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины***

### ***5.1. Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины***

#### ***5.1.1 Перечень основной литературы:***

5. Кобелев А.В. Режимы работы электроэнергетических систем [Электронный ресурс] : учебное пособие для бакалавров и магистров направления

«Электроэнергетика» / А.В. Кобелев, С.В. Кочергин, Е.А. Печагин. — Электрон. текстовые данные. — Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2015. — 80 с. — 978-5-8265-1411-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/64564.html>

6. Ананичева, С. С. Анализ электроэнергетических сетей и систем в примерах и задачах : учебное пособие / С. С. Ананичева, С. Н. Шелюг. — Екатеринбург : Уральский федеральный университет, ЭБС АСВ, 2016. — 176 с. — ISBN 978-5-7996-1784-4. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/65910.html>

7. Моделирование в электроэнергетике [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.Ф. Шаталов [и др.]. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь: Ставропольский государственный аграрный университет, АГРУС, 2014. — 140 с. — 978-5-9596-1059-3. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/47317.html>

8. Короткевич, М. А. Эксплуатация электрических сетей : учебник / М. А. Короткевич. — Минск : Вышэйшая школа, 2014. — 351 с. — ISBN 978-985-06-2397-3. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/35574.html>

### ***5.1.2. Перечень дополнительной литературы:***

3. Фадеева, Г. А. Проектирование распределительных электрических сетей : учебное пособие / Г. А. Фадеева, В. Т. Федин ; под редакцией В. Т. Федина. — Минск : Вышэйшая школа, 2009. — 365 с. — ISBN 978-985-06-1597-8. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/20124.html>

4. Русина, А. Г. Балансы мощности и выработки электроэнергии в электроэнергетической системе : учебно-методическое пособие / А. Г. Русина, Т. А. Филиппова. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2012. — 55 с. — ISBN 978-5-7782-1935-9. — Текст : элек-

тронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/45078.html>.

### ***5.2. Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине***

1. Методические рекомендации для подготовки к практическим занятиям.
2. Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов.

### ***5.3. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины***

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"
2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks
3. <http://e.lanbooks.com> - Электронно-библиотечная система Лань
4. <http://docs.cntd.ru/> Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации ТЕХЭКСПЕРТ
- 5.Профессиональные справочные системы Техэксперт <http://vuz.kodeks.ru/>

**Указание по технике безопасности:**

До начала работы студенты обязаны изучить правила техники безопасности при работе с электроустановками. Об изучении правил техники безопасности и получении инструктажа студенты расписываются в специальном журнале. Студенты, не изучившие правила техники безопасности и не прошедшие инструктаж, к выполнению лабораторных работ не допускаются.

Учебная группа (или подгруппа) разбивается на бригады, число которых указывается преподавателем, а состав бригад комплектуется студентами на добровольных началах. Список группы (подгруппы), разбитой на бригады, староста предоставляет преподавателю, ведущему лабораторные занятия.

Каждая из бригад выполняет лабораторную работу в соответствии с графиком, находящемся в лаборатории.

Перед каждым занятием студент обязан подготовиться к выполнению лабораторной работы по данному методическому пособию и рекомендуемой литературе. Перед началом работы преподаватель проверяет знания студентов по содержанию выполняемой работы. Плохо подготовленные студенты к выполнению лабораторной работы не допускаются.

Работая в лаборатории, необходимо соблюдать следующие правила:

К выполнению лабораторной работы следует приступать только после полного уяснения ее содержания и получения допуска к ней.

2. Начинать работу следует с ознакомления с приборами и оборудованием, применяемыми в данной работе.

3. На лабораторном столе должны находиться только предметы, необходимые для выполнения данной работы.

4. Расположение аппаратуры на рабочем столе должно быть таким, чтобы схема соединений получилась наиболее простой, наглядной и работа с аппаратурой была удобной.

5. Желательно, чтобы схему собирал один из членов бригады, а другие контролировали.

6. При сборке сложных схем следует вначале соединить главную, последовательную цепь, начиная сборку от одного зажима источника тока и заканчивая на другом, а затем уже подключить параллельные цепи.

7. После того, как схема будет собрана, необходимо убедиться в правильной установке движков реостатов, автотрансформаторов и рукояток других регулирующих устройств.

8. Собранная схема обязательно должна быть проверена преподавателем или старшим лаборантом и только с их разрешения может быть включена под напряжение.

9. При включении схемы особое внимание следует обратить на показания амперметров и других измерительных приборов. В случае резкого движения стрелки амперметра к концу шкалы схему необходимо немедленно отключить от источника напряжения.

10. Необходимо бережно относиться к аппаратуре, используемой в работе. Обо всех замеченных неисправностях или повреждениях студент должен немедленно сообщить преподавателю или лаборанту.

11. После выполнения работы студент обязан, не разбирая схемы показать полученные данные преподавателю. Если результаты измерений верны, то преподаватель их подписывает. Эксперимент с неправильными результатами следует повторить.

12. Схему следует разбирать только после ее отключения от сети.

13. Категорически запрещается:

- трогать руками оголенные провода и части приборов, находящиеся под напряжением, даже если оно невелико;
- производить изменения в схеме при подключенном источнике питания;
- заменять или брать оборудование, или приборы с других рабочих мест
- без разрешения преподавателя или лаборанта;

- отходить от приборов и машин, находящихся под напряжением или оставлять схему под напряжением при обработке результатов измерений;

- перегружать приборы током или напряжением, превышающим номинальное значение.

Проверку наличия, подаваемого к схеме или элементам схемы напряжения необходимо производить только контрольной лампочкой или вольтметром, соблюдая правила техники безопасности.

При работе в лаборатории следует строго соблюдать меры предосторожности, так как электрический ток, проходящий через тело человека, величиной в 0,025 А уже является опасным для жизни.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Пятигорский институт (филиал) СКФУ

**Методические указания**  
по выполнению контрольной работы  
по дисциплине «ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ»  
для студентов направления подготовки  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Пятигорск 2026 г.

Контрольная работа состоит из ответов на два теоретических вопроса по дисциплине «Электроэнергетические системы и сети» и решения задачи.

Вариант задания выбирается по последней цифре зачетной книжки студента.

Оформление контрольной работы должно соответствовать утверждённой форме.

## ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ВЫРАЖЕНИЯ

1. Активное погонное сопротивление:

$$r_0 = \frac{\rho}{F}, \text{ Ом/км},$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала провода,  $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{км}$ ;

$F$  – сечение фазного провода (жила),  $\text{мм}^2$ .

Для технического алюминия в зависимости от его марки можно принять

$$\rho = 29,5 - 31,5 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{км},$$

для меди –  $\rho = 18,0 - 19,0 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{км}$ .

2. Индуктивное погонное сопротивление фазы воздушной линии:

$$x_0 = 0,144 \lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{пр}}} + 0,0157, \text{ Ом/км},$$

где  $r_{\text{пр}}$  – радиус провода, см;

$D_{\text{ср}}$  – среднегеометрическое расстояние между фазами А, В и С, см.

$$D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{D_{\text{AB}} \cdot D_{\text{BC}} \cdot D_{\text{CA}}};$$

$D_{\text{AB}}, D_{\text{BC}}, D_{\text{CA}}$  – расстояние между проводами соответственно фаз А, В, С.

3. Потери мощности на корону:

$$\Delta P_{\text{к}} = \Delta P_{\text{к0}} \cdot l,$$

где  $\Delta P_{\text{к0}}$  – удельные среднегодовые потери мощности на корону,  $\text{кВт/км}$ .

4. Удельная активная проводимость линии:

$$g_0 = \frac{\Delta P_{\text{к0}}}{U_{\text{н}}^2}, \text{ См/км},$$

где  $U_{\text{н}}$  – номинальное напряжение ЛЭП в кВ.

5. Удельная емкостная проводимость линии:

$$b_0 = \frac{7,58}{\lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{пр}}}} \cdot 10^{-6}, \text{ См/км.}$$

6. Зарядная мощность линии:

$$Q_c = b_0 \cdot l \cdot U_{\text{н}}^2, \text{ Мвар.}$$

7. Активное сопротивление двухобмоточного трансформатора:

$$R_{\text{т}} = \frac{\Delta P_{\text{к}} U_{\text{вн}}^2}{S_{\text{н}}^2} \cdot 10^{-3}, \text{ Ом,}$$

где  $\Delta P_{\text{к}}$  – потери мощности короткого замыкания, кВт:

$U_{\text{вн}}$  – номинальное напряжение обмотки высшего напряжения трансформатора, кВ;

$S_{\text{н}}$  – номинальная мощность трансформатора, МВ·А.

8. Индуктивное сопротивление двухобмоточного трансформатора:

$$X_{\text{т}} = \frac{U_{\text{к}} \% U_{\text{вн}}^2}{100 S_{\text{н}}}, \text{ Ом,}$$

где  $U_{\text{к}}$  – напряжение короткого замыкания, %.

9. Потери короткого замыкания лучей схемы замещения трехобмоточного трансформатора:

$$\Delta P_{\text{кв}} = 0,5(\Delta P_{\text{кв-с}} + \Delta P_{\text{кв-н}} - \Delta P_{\text{кс-н}});$$

$$\Delta P_{\text{кс}} = 0,5(\Delta P_{\text{кв-с}} + \Delta P_{\text{кс-н}} - \Delta P_{\text{кв-н}});$$

$$\Delta P_{\text{кн}} = 0,5(\Delta P_{\text{кв-н}} + \Delta P_{\text{кс-н}} - \Delta P_{\text{кв-с}}),$$

где  $\Delta P_{\text{кв-с}}$ ,  $\Delta P_{\text{кв-н}}$ ,  $\Delta P_{\text{кс-н}}$  – потери короткого замыкания для пар обмоток трехобмоточного трансформатора, кВт.

10. Напряжение короткого замыкания лучей схемы замещения трехобмоточного трансформатора:

$$U_{\text{кв}} = 0,5(U_{\text{кв-с}} + U_{\text{кв-н}} - U_{\text{кс-н}});$$

$$U_{\text{кс}} = 0,5(U_{\text{кв-с}} + U_{\text{кс-н}} - U_{\text{кв-н}});$$

$$U_{\text{кн}} = 0,5(U_{\text{кв-н}} + U_{\text{кс-н}} - U_{\text{кв-с}}),$$

где  $U_{\text{кв-с}}$ ,  $U_{\text{кв-н}}$ ,  $U_{\text{кс-н}}$  – напряжения короткого замыкания для пар обмоток трехобмоточного трансформатора.

11. Активная проводимость трансформатора:

$$G_{\text{т}} = \frac{\Delta P_{\text{х}}}{U_{\text{вн}}^2} \cdot 10^{-3}, \text{ См,}$$

где  $\Delta P_{\text{х}}$  – потери активной мощности холостого хода, кВт.

12. Потери реактивной мощности холостого хода в трансформаторе:

$$\Delta Q_{\text{х}} = \frac{I_{\text{х}} \% \cdot S_{\text{н}}}{100}, \text{ квар,}$$

где  $I_{\text{х}}$  – ток холостого хода %;

$S_n$  – номинальная мощность трансформатора, кВ·А.

13. Реактивная проводимость трансформатора:

$$B_T = \frac{\Delta Q_x}{U_{BH}^2} \cdot 10^{-3}, \text{ См.}$$

14. Нагрузочные потери активной мощности:

$$\Delta P_n = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R = 3I^2 R,$$

где  $R$  – активное сопротивление, Ом;

$P, Q$  – активная и реактивная мощности.

15. Нагрузочные потери реактивной мощности:

$$\Delta Q_n = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} X = 3I^2 X,$$

где  $X$  – индуктивное сопротивление, Ом.

16. Падение напряжения:

$$\Delta \underline{U} = \Delta U + j\delta U = \frac{PR + QX}{U} + j \frac{PX - QR}{U},$$

где  $\Delta U$  – продольная составляющая падения напряжения;

$\delta U$  – поперечная составляющая падения напряжения.

17. Нагрузочные потери активной мощности в трансформаторе:

$$\Delta P_{HT} = \Delta P_K \left( \frac{S}{S_n} \right)^2.$$

18. Нагрузочные потери реактивной мощности в трансформаторе:

$$\Delta Q_{HT} = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{S^2}{S_n}.$$

19. Время использования наибольшей полной мощности:

$$T_{H6} = \frac{\sum S_j \cdot \Delta t_j}{S_{H6}},$$

где  $S_j$  – мощность нагрузки в  $j$ -ом режиме;

$\Delta t_j$  – продолжительность  $j$ -го режима;

$S_{H6}$  – мощность в режиме наибольших нагрузок.

20. Время использование наибольшей активной мощности:

$$T_{H6a} = \frac{\sum P_j \cdot \Delta t_j}{P_{H6}}.$$

21. Потери электроэнергии холостого хода (годовые):

$$\Delta W_x = \Delta P_x \cdot 8760.$$

22. Потери электроэнергии по методу графического интегрирования:

$$\Delta W_n = \sum \Delta P_j \cdot \Delta t_j.$$

23. Потери электроэнергии по методу среднеквадратичной мощности:

$$\Delta W_{\text{н}} = \frac{S_{\text{ср.кв}}^2}{U_{\text{н}}^2} R \cdot 8760.$$

24. Среднеквадратичная мощность:

$$S_{\text{ср.кв}} \approx \sqrt{\frac{\sum S_j^2 \cdot \Delta t_j}{8760}}; S_{\text{ср.кв}} = S_{\text{нб}} (0,12 + T_{\text{нб}} \cdot 10^{-4}).$$

25. Потери электроэнергии по методу наибольших потерь:

$$\Delta W_{\text{н}} = \frac{S_{\text{нб}}^2}{U^2} R \cdot \tau.$$

26. Время наибольших потерь:

$$\tau = (0,124 + T_{\text{нб}} \cdot 10^{-4})^2 \cdot 8760,$$

где  $T_{\text{нб}}$  – в часах.

27. Энергия:

$$W = P_{\text{нб}} T_{\text{нба}}.$$

28. Мощность на головных участках в линии с двухсторонним питанием:

$$\underline{S}_{\text{А}} = \frac{U_{\text{А}} - U_{\text{В}}}{Z_{\text{АВ}}} U_{\text{н}} + \frac{\sum \underline{S}_i Z_{i\text{В}}^*}{Z_{\text{АВ}}};$$

$$\underline{S}_{\text{В}} = \frac{U_{\text{В}} - U_{\text{А}}}{Z_{\text{АВ}}} U_{\text{н}} + \frac{\sum \underline{S}_i Z_{i\text{А}}^*}{Z_{\text{АВ}}}.$$

29. Мощность на головном участке в однородной линии с двухсторонним питанием:

$$\underline{S}_{\text{А}} = \frac{\sum \underline{S}_i l_{i\text{В}}}{l_{\text{АВ}}}.$$

30. Экономическое номинальное напряжение линии:

$$U_{\text{нэ}} = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{l} + \frac{2500}{P}}}, \text{ кВ},$$

где  $P$  – в МВт,  $l$  – в км.

31. Экономическое сечение проводников фазы:

$$F_{\text{э}} = \frac{I_{\text{нб}}}{J_{\text{эк}}}, \text{ мм}^2,$$

где  $J_{\text{эк}}$  – экономическая плотность тока, А/мм<sup>2</sup>.

32. Ток:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} U_{\text{н}}}.$$

33. Средневзвешенное время использования наибольшей нагрузки:

$$T_{\text{нб ср.взв}} = \frac{\sum P_{\text{нб}} T_{\text{нб}}}{\sum P_{\text{нб}}}.$$

34. Расчетное сечение линий, соответствующее допустимой потере напряжения:

при постоянном сечении вдоль линии

$$F_{\text{расч}} = \frac{\rho \sum_{i=1}^n P_{i\text{л}} l_{i\text{л}}}{\Delta U_{\text{а доп}} U_{\text{н}}};$$

при одинаковой плотности тока на всех участках линии

$$F_{i\text{л}} = \frac{I_{i\text{л}}}{J_{\Delta U}}; J_{\Delta U} = \frac{\Delta U_{\text{а доп}}}{\sqrt{3} \rho \sum_{i=1}^n l_{i\text{л}} \cos \varphi_{i\text{л}}};$$

при минимальном расходе проводникового материала

$$F_{i\text{л}} = k_p \sqrt{P_{i\text{л}}}; k_p = \frac{\rho \sum_{i=1}^n l_{i\text{л}} \sqrt{P_{i\text{л}}}}{\Delta U_{\text{а доп}} U_{\text{н}}},$$

где  $\Delta U_{\text{а доп}}$  – допустимая потеря напряжения в активном сопротивлении линии;

$F_{i\text{л}}$  – сечение провода на  $i$ -ом участке линии;

$I_{i\text{л}}$  – ток  $i$ -го участка;

$P_{i\text{л}}$  – активная мощность  $i$ -го участка линии.

#### Задания для выполнения контрольной работы

1. Общая характеристика электрических систем и сетей
2. Понижающие и преобразовательные подстанции
3. Передача энергии переменным током на большие расстояния
4. Передача энергии постоянным током на большие расстояния
5. Основные элементы и общая характеристика воздушных линий
6. Общие сведения о кабельных линиях и условиях их работы
7. Представление электрических нагрузок в расчетных схемах
8. Векторная диаграмма линии электропередачи
9. Реактивная мощность
10. Компенсация реактивной мощности

#### Задание 2

1. Схемы замещения и параметры элементов электрических сетей
2. Параметры и схемы замещения трансформаторов и автотрансформаторов

3. Потери мощности и энергии в элементах электрической сети. Методы расчета. Мероприятия по снижению
4. Векторные диаграммы ЛЭП 35-110 кВ с одной или несколькими нагрузками.
5. Методы преобразования сетей.
6. Баланс мощностей в системе. Статические характеристики нагрузки. Регулирование частоты в системе
7. Показатели качества электрической энергии
8. Общие сведения о кабельных линиях и условиях их работы
9. Представление электрических нагрузок в расчетных схемах
10. Векторная диаграмма линии электропередачи

### Указания к выполнению контрольной работы

В задании предлагается выполнить расчёт режима максимальных нагрузок радиальной электрической сети, принципиальная схема которой приведена на рис. 1.

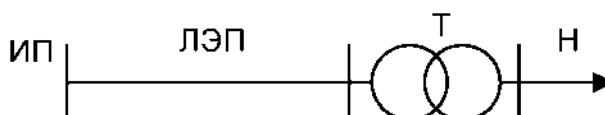


*Рис. 1. Схема электрической сети*

*Исходные данные для расчёта.*

Номинальное напряжение электрической сети  $U_{\text{ном}} = 35$  кВ; номинальное напряжение электроприёмника  $U = 10$  кВ.

По степени надёжности электроснабжения электроприёмники отнесены ко второй категории.

Параметры источника питания, электроприёмника (нагрузки) и линии электропередачи приведены в табл. 1 - 5.

Таблица 1

*Напряжение источника питания, кВ*

| Вар.  | 0    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $U_0$ | 37,3 | 37,5 | 38,0 | 38,5 | 37,5 | 38,4 | 38,5 | 37,5 | 38,0 | 38,6 |

Таблица 2

*Активная мощность электроприёмника, МВт*

| Вар. | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
|------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

|           |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |
|-----------|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| $P_{max}$ | 5 | 6 | 7 | 8 | 8 | 8 | 9 | 11 | 12 | 13 |
|-----------|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|

Таблица 3

*Коэффициент мощности*

|                |             |             |             |             |             |             |      |             |      |             |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|-------------|------|-------------|
| Вар.           | 0           | 1           | 2           | 3           | 4           | 5           | 6    | 7           | 8    | 9           |
| $\cos \varphi$ | <b>0,80</b> | <b>0,81</b> | <b>0,82</b> | <b>0,83</b> | <b>0,84</b> | <b>0,85</b> | 0,86 | <b>0,87</b> | 0,88 | <b>0,89</b> |

Таблица 4

*Число часов использования наибольшей нагрузки, час*

|           |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Вар.      | 0           | 1           | 2           | 3           | 4           | 5           | 6           | 7           | 8           | 9           |
| $T_{max}$ | <b>2600</b> | <b>3200</b> | <b>3600</b> | <b>4200</b> | <b>4700</b> | <b>5000</b> | <b>5300</b> | <b>5700</b> | <b>6000</b> | <b>6500</b> |

Таблица 5

*Длина линии электропередач (ЛЭП), км*

|      |    |           |           |           |    |    |           |           |           |           |
|------|----|-----------|-----------|-----------|----|----|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Вар. | 0  | 1         | 2         | 3         | 4  | 5  | 6         | 7         | 8         | 9         |
| L    | 12 | <b>14</b> | <b>16</b> | <b>18</b> | 20 | 22 | <b>24</b> | <b>26</b> | <b>28</b> | <b>30</b> |

Пользуясь исходными данными, выполните расчёт заданной на рис. 1 электрической сети в соответствии с приведённым ниже алгоритмом.

1. Выбор параметров элементов электрической сети.
  - 1.1. Выбор и проверка сечения проводов линии электропередачи.
  - 1.2. Выбор трансформаторов на подстанции.
  - 1.3. Составление схемы замещения электрической сети и определение её параметров.

## Методические указания

### 1. Выбор параметров элементов электрической сети.

#### Предварительный расчёт мощности нагрузки

По известным значениям  $P_{max}$  и  $\cos \varphi$  определяем модуль полной мощности

$$S_{max} = \frac{P_{max}}{\cos \varphi}$$

и реактивную мощность

$$Q_{max} = \sqrt{S_{max}^2 - P_{max}^2}.$$

Комплексное значение полной мощности нагрузки в максимальном режиме определяется

выражением  $\underline{S}_{max} = P_{max} + jQ_{max}.$

## Выбор числа цепей и сечения проводов линий

Число цепей ЛЭП  $n_{\text{ц}}$  выбирается в зависимости от величины нагрузки и категории потребителей по надёжности электроснабжения.

Для потребителей первой и второй категории выбираются две цепи ЛЭП.

При выборе сечений проводов используется **метод экономической плотности тока**. Значения экономической плотности тока  $j_{\text{эк}}$  приведены в табл. 6.

Таблица 6

Значения экономической плотности тока

| Проводники                          | Экономическая плотность тока, А/мм, при числе часов использования максимума нагрузки |                    |            |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|------------|
|                                     | более 1000 до 3000                                                                   | более 3000 до 5000 | более 5000 |
| Неизолированные алюминиевые провода | 1,3                                                                                  | 1,1                | 1,0        |

Выбор сечений проводов воздушных линий (ВЛ) по **экономической плотности тока** выполняется следующим образом.

Ток линии в нормальном режиме

$$I_{(5)} = \frac{S_{\text{max}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot n_{\text{ц}}}.$$

По табл. 6 определяется экономическая плотность тока  $j_{\text{эк}}$ .

Экономическое сечение проводов фазы проектируемой линии

$$F_{\text{эк}} = \frac{I_{\text{р}}}{j_{\text{эк}}}.$$

Полученное сечение  $F_{\text{эк}}$  округляется до ближайшего стандартного сечения.

Таблица 7

**Допустимые длительные токи и мощности для неизолированных сталеалюминиевых проводов марок АС, АСК, АСКП, АСКС при температуре воздуха +25 °С**

| Номинальное сечение, мм <sup>2</sup> | Ток, А        |                  |
|--------------------------------------|---------------|------------------|
|                                      | вне помещений | внутри помещений |
| 35/6,2                               | 175           | 135              |
| 50/8                                 | 210           | 165              |
| 70/11                                | 265           | 210              |
| 95/16                                | 330           | 260              |
| 120/19                               | 390           | 313              |

|        |      |      |
|--------|------|------|
| 120/27 | 375  | -    |
| 150/19 | 450  | 365  |
| 150/24 | 450  | 365  |
| 150/34 | 450  | -    |
| 185/24 | 520  | 430  |
| 185/29 | 510  | 425  |
| 185/43 | 515  | -    |
| 240/32 | 605  | 505  |
| 240/39 | 610  | 505  |
| 240/56 | 610  | -    |
| 300/39 | 710  | 600  |
| 300/48 | 690  | 585  |
| 300/66 | 680  | -    |
| 330/27 | 730  | -    |
| 400/22 | 830  | 713  |
| 400/51 | 825  | 705  |
| 400/64 | 860  | -    |
| 500/27 | 960  | 830  |
| 500/64 | 945  | 815  |
| 600/72 | 1050 | 920  |
| 700/86 | 1180 | 1040 |

**Примечание:** Обозначение марок проводов ВЛ: проволока: медная (М), алюминиевая марки АТ (А), алюминиевая марки АТп (Ап); стальной сердечник (С); алюминиевый сплав марки АВЕ термообработанный (АЖ), то же нетермообработанный (АН); стальной сердечник изолированный пленкой (К), межпроводочное пространство провода заполнено смазкой (КП), межпроводочное пространство сердечника заполнено смазкой (КС)

Сечения проводов, выбранных по экономическому критерию, проверяются на соответствие ряду технических требований. Окончательный выбор сечения можно сделать только после проверки выполнения этих требований.

*Проверка по механической прочности.* Сечение провода, выбранное по экономическому критерию, должно соответствовать условию

$$F \geq F_{\min \text{ мех.}}$$

Минимально допустимые сечения проводов по условиям механической прочности  $F_{\min \text{ мех}}$  приведены в табл. 8.

Таблица 8

*Минимально допустимые сечения проводов по условиям механической прочности*

| Характеристика ВЛ                                | Сечение сталеалюминиевых проводов, мм <sup>2</sup> |
|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| <b>ВЛ без пересечений в районах по гололёду:</b> |                                                    |
| <b>до II</b>                                     | <b>35/6,2</b>                                      |

|                                                           |               |
|-----------------------------------------------------------|---------------|
| <b>в Ш-1У</b>                                             | <b>50/8</b>   |
| <b>в V и более</b>                                        | <b>70/11</b>  |
| <b>ВЛ, сооружаемые на двухцепных или многоцепных опо-</b> |               |
| <b>до 20 кВ</b>                                           | <b>70/11</b>  |
| <b>35 кВ и выше</b>                                       | <b>120/19</b> |

*Проверка по условиям короны.* Проверка сечений проводов по условиям короны выполняется для ВЛ 110 кВ и выше. Выбранное сечение должно соответствовать условию

$$F \geq F_{\text{min кор.}}$$

Минимально допустимые диаметры проводов ВЛ по условиям короны  $F_{\text{min кор}}$  приведены в табл. 9.

Таблица 9

*Минимально допустимые диаметры проводов ВЛ по условиям короны*

| <b>Напряжение ВЛ, кВ</b> | <b>Фаза с одиночными проводами</b>       |
|--------------------------|------------------------------------------|
| 110                      | <b>11,4 (АС 70/11)</b>                   |
| <b>150</b>               | <b>15,2 (АС 120/19)</b>                  |
| <u>220</u>               | <b>21,6 (АС 240/32) 24,0 (АС 300/39)</b> |

*Проверка по допустимой токовой нагрузке (по нагреву).* Сечение провода, вы-

бранное по экономическому критерию, должно быть проверено по условию  $I_{\text{нб}} < I_{\text{доп}}$ .

где  $I_{\text{доп}}$  - допустимый длительный ток для проводника, определяемый по справочнику для выбранного сечения;  $I_{\text{нб}}$  - наибольшее значение тока в длительных режимах, под которыми обычно подразумеваются послеаварийные и ремонтные режимы электрической сети.

В двухцепной линии наибольший ток будет протекать при отключении одной из цепей:

$$I_{\text{нб}} = \frac{S_{\text{max}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} (n_{\text{л}} - 1)}.$$

*Проверка по допустимой потере напряжения.* Проверке по потерям напряжения воздушные линии 35 кВ и выше не подлежат, так как повышение уровня напряжения путём увеличения сечения проводов по сравнению с применением на понижающих подстанциях трансформаторов с РПН экономически не оправдано.

### **Выбор количества и мощности трансформаторов на понижающей подстанции**

Для потребителей первой и второй категорий на подстанциях предусматривается установка не менее двух трансформаторов.

В современной практике проектирования при определении расчётной мощности трансформаторов на понижающих подстанциях с установкой двух трансформаторов ( $n_T=2$ ) применяется эмпирическая формула

$$S_{T\text{расч}} = 0,7 P_{\text{max}}.$$

По расчётной мощности трансформатора из справочника выбирается ближайший больший по номинальной мощности понижающий трансформатор.

## Составление схемы замещения электропередачи и определение её параметров

Для расчётов режимов электрических сетей 35 кВ и ниже можно использовать упрощённую схему замещения ЛЭП, не содержащую поперечных элементов зарядных мощностей. Тогда схема замещения электрической сети (рис. 1) будет иметь вид схемы на рис. 2.

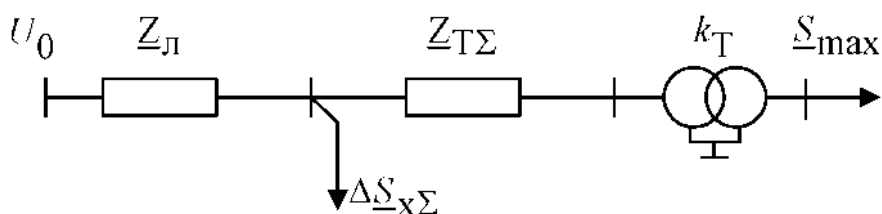


Рис. 2. Схема замещения электрической сети

Определяются параметры схемы замещения. Сопротивление линии

$$Z_{\text{Л}} = \frac{L(r_0 + jx_0)}{n_{\text{ц}}},$$

где  $r_0$  и  $x_0$  - погонные соответственно активное и реактивное сопротивления проводов ЛЭП, Ом/км.

Суммарное сопротивление трансформаторов на подстанции

$$Z_{T\Sigma} = r_{T\Sigma} + jx_{T\Sigma} = \frac{r_T + jx_T}{n_T}$$

где  $r_T$  и  $x_T$  - активное и реактивное сопротивления обмоток трансформатора; суммарные потери холостого хода трансформаторов

$$\Delta S_{X\Sigma} = n_T(\Delta P_X + j\Delta Q_X).$$

где  $\Delta P_X$  и  $\Delta Q_X$  - активные и реактивные потери холостого хода трансформатора.

## Список рекомендуемой литературы

### *Перечень основной литературы:*

9. Кобелев А.В. Режимы работы электроэнергетических систем [Электронный ресурс] : учебное пособие для бакалавров и магистров направления «Электроэнергетика» / А.В. Кобелев, С.В. Кочергин, Е.А. Печагин. — Электрон. текстовые данные. — Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2015. — 80 с. — 978-5-8265-1411-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/64564.html>

10. Ананичева, С. С. Анализ электроэнергетических сетей и систем в примерах и задачах : учебное пособие / С. С. Ананичева, С. Н. Шелюг. — Екатеринбург : Уральский федеральный университет, ЭБС АСВ, 2016. — 176 с. — ISBN 978-5-7996-1784-4. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/65910.html>

11. Моделирование в электроэнергетике [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.Ф. Шаталов [и др.]. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь: Ставропольский государственный аграрный университет, АГРУС, 2014. — 140 с. — 978-5-9596-1059-3. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/47317.html>

12. Короткевич, М. А. Эксплуатация электрических сетей : учебник / М. А. Короткевич. — Минск : Вышэйшая школа, 2014. — 351 с. — ISBN 978-985-06-2397-3. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/35574.html>

### *Перечень дополнительной литературы:*

5. Фадеева, Г. А. Проектирование распределительных электрических сетей : учебное пособие / Г. А. Фадеева, В. Т. Федин ; под редакцией В. Т. Федина. — Минск : Вышэйшая школа, 2009. — 365 с. — ISBN 978-985-06-1597-8. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/20124.html>

6. Русина, А. Г. Балансы мощности и выработки электроэнергии в электроэнергетической системе : учебно-методическое пособие / А. Г. Русина, Т. А. Филиппова. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2012. — 55 с. — ISBN 978-5-7782-1935-9. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/45078.html>.

### *Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине*

1. Методические рекомендации для подготовки к практическим занятиям.
2. Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов.

***Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины***

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"
2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks
3. <http://e.lanbooks.com> - Электронно-библиотечная система Лань
4. <http://docs.cntd.ru/> Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации  
ТЕХЭКСПЕРТ
- 5.Профессиональные справочные системы Техэксперт <http://vuz.kodeks.ru/>

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Пятигорский институт (филиал) СКФУ

**Методические указания**  
по выполнению курсового проекта  
по дисциплине «ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ»  
для студентов направления подготовки  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Пятигорск 2026 г.

## Содержание

| №<br>п/п | Стр.                                                                                               |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
|          | Введение                                                                                           |
| 1.       | Цель, задачи и реализуемые компетенции                                                             |
| 2.       | Задание на курсовое проектирование                                                                 |
| 3.       | Структура курсового проекта                                                                        |
| 3.1      | Расчет напряжения электрической сети                                                               |
| 3.2      | Выбор и проверка сечений ВЛ                                                                        |
| 3.3      | Выбор трансформаторов                                                                              |
| 3.4      | Анализ и обоснование схем электрической сети и понизитель-<br>ных подстанций                       |
| 3.5      | Технико-экономическое сравнение вариантов электрической<br>сети. Обоснование оптимального варианта |
| 3.6      | Приведение нагрузок узлов к стороне высшего напряжения                                             |
| 3.7      | Расчет установившегося режима электрической сети                                                   |
| 3.8      | Расчет напряжений на вторичной обмотке трансформаторов                                             |
| 3.9      | Регулирование напряжения                                                                           |
| 3.10     | Оценка экономической эффективности электрической сети                                              |
| 3.11     | Расчет конструктивной части ВЛ                                                                     |
| 4        | Общие требования к написанию и оформлению проекта                                                  |
| 5        | Последовательность выполнения задания                                                              |
| 6        | Критерии оценивания проекта                                                                        |
| 7        | Порядок защиты работы                                                                              |
|          | Список используемой литературы                                                                     |
|          | Приложения                                                                                         |

## **Введение**

Курсовое проектирование является одним из важных и перспективных видов учебного процесса, позволяя проявить индивидуальный творческий подход к решению поставленной задачи. В методическом указании рассмотрено проектирование замкнутой районной электрической сети кольцевого типа в одноцепном исполнении для электроснабжения трех узлов нагрузки от центра питания.

Методические указания составлены в соответствии с программой дисциплины «Электроэнергетические системы и сети» и предназначены для студентов направления подготовки бакалавриата 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

В данном методическом указании освещены основные вопросы, связанные с проектированием электрических сетей: выбор рационального варианта схемы сети и параметров ее элементов (линий электропередачи и понижающих подстанций) для электроснабжения трех пунктов потребления электроэнергии; анализ характерных установившихся режимов работы спроектированной сети; определение основных технико-экономических показателей спроектированной сети.

## Цель, задачи и реализуемые компетенции

Целью работы является закрепление и углубление теоретических знаний, полученных в результате изучения дисциплины «Электроэнергетические системы и сети» и смежных с ней, а также получение навыков технико-экономических расчетов.

Системой курсовых работ (проектов) студент подготавливается к выполнению выпускной квалификационной работы.

В процессе выполнения курсового проекта студентом должны решаться следующие *задачи*:

- приобретение новых теоретических знаний в соответствии с темой работы и заданием руководителя;
- умение систематизировать, обобщать и логично излагать концепции, альтернативные точки зрения по исследуемой проблеме;
- развитие учебно-исследовательских и методических навыков, необходимых для системного научного анализа изучаемого явления;
- совершенствование профессиональной подготовки.

Задачами проектирования электроэнергетических систем является разработка и технико-экономическое обоснование решений по формированию целесообразного комплекса электрических станций, линий электропередачи и понижающих подстанций, обеспечивающих требуемый уровень надежности электроснабжения всех потребителей рассматриваемого района качественной электроэнергией с наименьшими затратами.

В результате освоения дисциплины у студента должны быть сформированы следующие компетенции:

| Код, формулировка компетенции                            | Код, формулировка индикатора                       | Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов |
|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ПК-1 Способен участвовать в проектировании систем элект- | ИД-2ПК-1 Выбирает типовые проектные решения систем | Знает схемы и основное оборудование электриче-                                                                      |

|                                                                   |                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| троснабжения                                                      | электроснабжения                                                                                                                 | ских сетей, простые конструкции электроэнергетических объектов питающих энергосистем.                                                                                                                                            |
|                                                                   | ИД-3 <sub>ПК-1</sub> Обосновывает выбор параметров электрооборудования систем электроснабжения, учитывая технические ограничения | Владеет методами выбора и составления схем электрических сетей, навыками типового проектирования электрических сетей и умением правильно выбирать электрические схемы с учетом особенностей их работы и требований потребителей. |
|                                                                   | ИД-5 <sub>ПК-1</sub> Демонстрирует понимание взаимосвязи задач проектирования и эксплуатации систем электроснабжения             | Умеет использовать основы теории передачи и распределения электрической энергии при решении задач проектирования электрических сетей                                                                                             |
| ПК-2 Способен анализировать режимы работы систем электроснабжения | ИД-1 <sub>ПК-2</sub> Рассчитывает параметры электрооборудования систем электроснабжения                                          | Умеет обосновывать технические решения при разработке схем распределения и передачи электрической энергии. Владеет навыками расчета параметров электрооборудования систем электроснабжения                                       |
|                                                                   | ИД-2 <sub>ПК-2</sub> Рассчитывает режимы работы систем электроснабжения                                                          | Знает технические и экономические расчеты, современные аналитические методы комплексного инженерного анализа. Владеет навыками технико-экономических расчетов режимов работы систем электроснабжения.                            |

### Задание на курсовое проектирование

Тематика курсовых проектов должна быть актуальной, отвечать учебным задачам дисциплины, а также потребностям науки и практики. Актуальность тематики курсовых проектов обусловлена научностью, современностью и направленностью к получению студентами навыков самостоятельной творческой работы.

Темы курсовых проектов должны быть комплексными, т.е. содержать ряд взаимосвязанных между собой проблем и опираться на фактический материал профильных предприятий и учреждений, а также на итоги учебной и производственной практики студентов, на научные работы членов кафедры, студенческих научных кружков и проблемных групп; использовать новейшие достижения отечественной и зарубежной науки, актуальные прикладные аспекты.

| №<br>вар. | $P_{1H}$ | $P_{2H}$ | $P_{3H}$ | $Q_{1H}$ | $Q_{2H}$ | $Q_{3H}$ | $T$ ,<br>час | $L_1$ ,<br>км | $L_2$ ,<br>км | $L_3$ ,<br>км | $L_4$ ,<br>км | $\gamma_p$ | $\Theta_{min}$<br>°C | $\Theta_{max}$<br>°C | $\Theta_{cp}$<br>°C |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------|----------------------|----------------------|---------------------|
|           |          |          |          |          |          |          |              |               |               |               |               |            |                      |                      |                     |

Основные содержательные и процессуальные аспекты, необходимые для выполнения проекта, оформляются кафедрой в заданиях по курсовому проектированию. В заданиях необходимо четко сформулировать тему проекта и требования, определяющие ее объем, содержание, а также исходные данные.

В общих чертах задания к каждому разделу курсовой работы можно представить следующим образом:

В данном курсовом проекте требуется спроектировать замкнутую районную электрическую сеть кольцевого типа в одноцепном исполнении для электроснабжения трех узлов нагрузки  $S_{H1}$ ,  $S_{H2}$  и  $S_{H3}$  от центра питания (ЦП). Данные для проектирования электрической сети приведены ниже в таблице.

В ходе выполнения курсового проекта необходимо выбрать номинальное напряжение электрической сети, провода высоковольтных линий, тип трансформаторов на узловых подстанциях сети.

Произвести расчет установившегося режима электрической сети и оценку экономической эффективности электрической сети, а также выполнить расчёт конструктивной части ВЛ.

Также необходимо выполнить графическую часть курсового проекта, содержащую принципиальную схему, чертёж промежуточной одноцепной опоры.

## Структура выполнения курсового проекта

Курсовой проект должен состоять из введения, теоретической части, эмпирической (практической, расчетно-графической) части, заключения, списка литературы и приложения.

Структура курсового проекта состоит из следующих обязательных элементов:

1. **Титульный лист** оформляется в соответствии с *Приложением 5*.
2. **Задание на курсовой проект** Приложение 4
3. **Содержание**
4. **Введение**
5. **Часть 1** – Теоретическая

Теоретическая часть должна содержать анализ состояния изучаемой проблемы на основе обзора научной, научно-информационной, справочной литературы. Представленный материал должен быть логически связан с целью исследования. В параграфах теоретической части необходимо отражать отдельные компоненты проблемы и завершать их выводами.

6. **Часть 2**– Проектная
  - Расчет напряжения электрической сети
  - Выбор и проверка сечений ВЛ
  - Выбор трансформаторов
  - Анализ и обоснование схем электрической сети и понизительных подстанций
  - Техничко-экономическое сравнение вариантов электрической сети. Обоснование оптимального варианта
  - Приведение нагрузок узлов к стороне высшего напряжения
  - Расчет установившегося режима электрической сети
  - Расчет напряжений на вторичной обмотке трансформаторов
  - Регулирование напряжения

- Оценка экономической эффективности электрической сети
- Расчет конструктивной части ВЛ

Графическая часть выполняется на 2-х листах формата А1 в соответствии с требованиями ГОСТа и ЕСКД:

- Чертёж промежуточной одноцепной опоры
- Однолинейная электрическая схема сети

### ***Список использованных источников и литературы***

Список использованных источников и литературы должен быть составлен в соответствии с требованиями ГОСТа к оформлению библиографии

### ***Приложения***

Приложение содержит весь фактический материал экспериментальных исследований (схемы, чертежи).

Каждое приложение надо начинать с новой страницы. Приложения имеют общую с остальной частью работы сквозную нумерацию страниц.

Заголовок «Приложение» пишется в верхнем правом углу. Все приложения нумеруются, например: Приложение 2. Если приложение одно, то его не нумеруют.

Если Приложение имеет заголовок, который пишется посередине с прописной буквы отдельной строкой.

## **Общие требования к написанию и оформлению проекта**

Курсовой проект рекомендуется представлять в объеме 30-40 листов. Текст работы должен быть напечатан через 1,5 интервала на одной стороне стандартного листа белой бумаги (А-4). Текст и другие отпечатанные элементы работы должны быть черными, контуры букв и знаков четкими, без ореола и затенения. Шрифт Times New Roman, кегель 14. Названия глав и параграфов выделяются полужирным шрифтом. Лист с текстом должен иметь поля: слева - 30 мм, справа - 10 мм, сверху - 20 мм, снизу 20 мм.

Нумерация страниц текста делается в правом нижнем углу листа. Проставлять номер страницы необходимо со страницы, где печатается «Введение», на которой ставится цифра «4». После этого нумеруются все страницы, включая приложения.

Между названием главы и названием параграфа этой главы ставится пробел равный двум интервалам, а название параграфа не должно отделяться от текста этого параграфа пробелом. Названия параграфов отделяются от текста предыдущего параграфа пробелом, равным двум интервалам. Каждая глава, а также введение, выводы, приложения и список использованной литературы начинаются с новой страницы. Главы имеют порядковые номера в пределах всей работы, обозначаемые арабскими цифрами (например: 1, 2, 3), после которых ставится точка. Слово «параграф» или значок параграфа в названии не ставятся. Параграфы имеют порядковые номера в пределах глав, обозначаемые арабскими цифрами (например: 1.1. и 1.2.). Заголовки глав и параграфов в тексте работы должны располагаться по центру, точку в конце названия главы и параграфа не ставят. Не допускается переносить часть слова в заголовке.

Нумерация таблиц и рисунков может быть сквозной или соотноситься с номером главы и параграфа. Например, если таблица или рисунок включены в текст первого параграфа второй главы, нумерация следующая: Таблица

2.1.1., рис. 2.1.1. Последняя цифра означает порядковый номер таблицы (или рисунка) в данном параграфе. Таблица помещается в качестве следующей страницы после первого упоминания о ней в тексте (см. рис. 2.1.1).

***Образец оформления формулы и уравнения***

$$S = ab, \quad (2.1.1)$$

где  $S$  – площадь прямоугольника, м<sup>2</sup>;

$a$  и  $b$  – длины сторон прямоугольника, м.

***Образец оформления таблиц***

Таблица 2.1.1

Историко-культурные объекты региона

| Вид памятника   | Федерально-<br>го значения | Местного<br>значения | Вновь выяв-<br>лено | Всего |
|-----------------|----------------------------|----------------------|---------------------|-------|
| Архитектурные   | 15                         | 328                  | 812                 | 1155  |
| Археологии      | 3                          | 144                  | 183                 | 330   |
| Истории         | 9                          | 220                  | 66                  | 295   |
| Искусства       | 1                          | 49                   | 6                   | 66    |
| Садово-парковые | -                          | 17                   | -                   | 17    |
| Итого           | 28                         | 758                  | 1067                | 1853  |

При переносе таблицы на другую страницу ее графы должны быть выделены отдельной строкой и пронумерованы. Над продолжением пишут «Продолжение таблицы ...», «Окончание таблицы ...». Нижнюю горизонтальную черту, ограничивающую первую часть таблицы, не проводят.

Например:

Таблица 2.1.1

Количество туристов проживающих в гостинице «Нева» в мае

| 456 |  | 566 |  |  |
|-----|--|-----|--|--|
| 567 |  | 678 |  |  |

Окончание таблицы 2.1.1

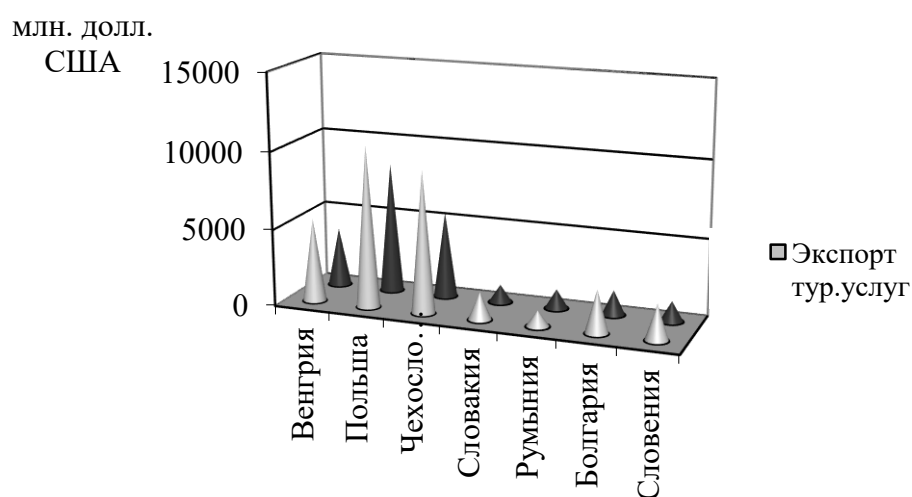
**Образец оформления рисунков**

Рис. 2.1.1 Экспорт и импорт туристических услуг в 2014, млн.руб.

**Оформление ссылок**

При ссылке в тексте на источники нужно писать порядковый номер источника в списке использованных источников. Порядковый номер источника

заключается в квадратную скобку. Если ссылаетесь на конкретную страницу данного источника, то эта страница тоже указывается. Например: [9], [9, с. 123].

Сноски оформляются внизу страницы, на которой расположен текст примечания. Для этого в конце текста примечания ставится звездочка (\*) или цифра (<sup>1</sup>), которая обозначает порядковый номер примечания. Например:

---

<sup>1</sup>Федоров Г.М. Социально-экономическое развитие Калининградской области: учебное пособие. Калининград: Изд-во РГУ им. И. Канта, 2016. С. 25.

Если на одной и той же странице цитируется одна и та же книга, во второй сноске можно не повторять полностью ее название;

---

<sup>1</sup> Там же. С. 34.

Если та же книга цитируется на других страницах курсовой работы, то указывается ее автор, а вместо названия пишется «Указ. соч.». Например:

---

<sup>1</sup>Федоров Г.М. Указ. соч. С. 5.

Графическая часть проекта выполняется на компьютере на стандартном листе чертежной бумага формата А1 и должна содержать:

- принципиальная электрическая схема проектируемой сети (А1);
- промежуточная одноцепная опора (А1);

## **Последовательность выполнения задания**

Руководство курсовыми проектами начинается с выдачи задания студентам. В этот период необходимым условием, обеспечивающим эффективность дальнейшего руководства, является индивидуальная беседа руководителя со студентом по заданию. В ходе беседы руководитель должен выяснить степень подготовленности студента к выполнению данного задания, рекомендовать необходимую литературу и информировать о порядке выполнения задания.

Одной из важных форм руководства является предварительный просмотр выполненного курсового проекта. После проверки руководителем выполнения одного этапа работы студенту (в случае положительного заключения) разрешается перейти к следующему этапу.

В целом последовательность выполнения курсового проекта можно представить в виде следующих этапов работы:

- первый этап (1-2 неделя) - составление плана работы и календарного плана работы на весь период;
- второй этап (3-4 неделя) - систематическая работа над литературой: сбор и анализ материала по рассматриваемой теме;
- на третьем этапе (5-16 недели) – работа над основной частью курсового проекта, которая содержит теоретическую и проектную части;
- на четвертом этапе (17-18 недели) – оформление и предоставление проекта на кафедру.

## **Расчет напряжения электрической сети**

Номинальное напряжение линии определяется ее длиной и активной мощностью, передаваемой по линии. Длины линий известны.

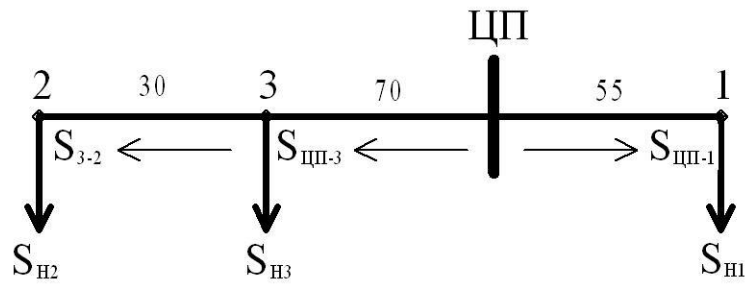


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема разомкнутой сети

Мощности, протекающие по участкам сети составляют:

$$S_{\text{ЦП-1}} = S_{H1};$$

$$S_{3-2} = S_{H2};$$

$$S_{\text{ЦП-3}} = S_{H3} + S_{H2}.$$

Приведем расчет замкнутой электрической сети (рис. 2.2). Определим предварительное потокораспределение в сети. Представим кольцевую схему сетью с двухсторонним питанием от источников А и В и зададимся произвольно направлениями мощностей в линиях (рис. 2.1).



Рисунок 2.2 – Представление принципиальной схемы сети кольцевого типа сетью с двухсторонним питанием

Мощность, протекающая по головному участку А1, составляет:

$$S_{A1} = \sum_{i=1}^3 P_i L_{iB} / L_{AB} + j \sum_{i=1}^3 Q_i L_{iB} / L_{AB}$$

Мощности остальных участков электрической сети найдем по первому закону Кирхгофа, предварительно задавшись направлениями мощностей (рис. 2.1)

$$S_{12} = S_{A1} - S_{H1}; S_{23} = S_{12} - S_{H2}; S_{B3} = S_{23} + S_{H3}.$$

Для выбора напряжения электрической сети воспользуемся формулой Залесского, Стилла и Илларионова Напряжение участка сети А1 составляет:

– формула Залесского

$$U_{цп-1} = 16 \cdot \sqrt[4]{P \cdot L}$$

– формула Стилла

$$U_{номА1} = 4,34 \sqrt{L + 0,016P}$$

– формула Илларионова

$$U_{цп-1} = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{L} + \frac{2500}{P}}}.$$

Аналогично рассчитываются напряжения для других участков сети. Данные сводятся в таблицу 2.1.

Таблица 2.1

| Участок сети          | По формуле Залесского | По формуле Стилла | По формуле Илларионова |
|-----------------------|-----------------------|-------------------|------------------------|
| $U_{цп-1}, \text{кВ}$ |                       |                   |                        |
| $U_{3-2}, \text{кВ}$  |                       |                   |                        |
| $U_{цп-3}, \text{кВ}$ |                       |                   |                        |

Далее, согласно вычисленным значениям напряжения участков проектируемой сети следует принять номинальное напряжение из ряда 110, 220 кВ.

## Выбор и проверка сечений ВЛ

Выбор сечений проводов ВЛ выполним по экономической плотности тока  $j_s$ . Для этого определим полную мощность и ток, протекающие по каждой линии в нормальном режиме работы сети.

Полная мощность и ток линии в линии А1 составляют

$$S_{A1} = \sqrt{P_{A1}^2 + Q_{A1}^2}$$
$$I_{A1} = S_{A1} \cdot 10^3 / \sqrt{3} U_{\text{НОМ}}$$

Соответственно мощность для других линий электрической сети будет определяться аналогично.

В соответствии с *приложением П1 табл. П1.1* и  $T_{\text{пвх}}$  выбирается экономическая плотность тока  $J_H$ . Экономические сечения каждой ВЛ составляют:

$$F_{A1} = I_{A1} / j_H$$

Полученные сечения округляем до ближайших стандартных сечений из ряда 6, 10, 16, 25, 35, 50, 70, 95, 120, 150, 185, 240, 300, 330, 400, 500 и принимаем для ВЛ сталеалюминовые провода соответствующих марок.

Выполним проверку выбранных сечений по техническим ограничениям *приложение П1 табл. П1.2 и П1.3*.

Согласно *приложению П1 табл. П1.4* определяются допустимые длительные токи для выбранных сечений проводов

Для проверки выбранных сечений по допустимому нагреву рассмотрим два расчетных режима:

- аварийное отключение головного участка А1;
- аварийное отключение головного участка В3.

При отключении участка А1 полные мощности и токи, протекающие по оставшимся в работе линиям, составляют:

$$S_{B3} = S_{H1} + S_{H2} + S_{H3}; S_{32} = S_{H1} + S_{H2}; S_{21} = S_{H1}$$

$$I_{B3} = S_{A3} 10^3 / \sqrt{3} U_{ном} \text{ должен быть } < I_d;$$

$$I_{32} < I_d; I_{21} < I_d.$$

При отключении головного участка ВЗ полные мощности и токи, протекающие по оставшимся в работе линиям, составляют

$$S_{A1} = S_{н1} + S_{н2} + S_{н3}; S_{12} = S_{н2} + S_{н3}; S_{23} = S_{н3}$$

$$I_{A1} < I_d; I_{12} < I_d; I_{23} < I_d.$$

Все выбранные сечения должны удовлетворять условию допустимого нагрева длительным током. Параметры ВЛ с проводами выбранных сечений заносятся в табл. 3.1. как для разомкнутой, так и для замкнутой сети

Таблица 3.1

| Линия | Провод | $r_0$ ,<br>Ом/км | $x_0$ ,<br>Ом/км | $b_0 \cdot 10^{-6}$ ,<br>См | $L$ ,<br>км | $R$ ,<br>Ом | $x$ ,<br>Ом | $B \cdot 10^{-6}$ ,<br>См | $Q_c$ ,<br>Мвар |
|-------|--------|------------------|------------------|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------|-----------------|
|       |        |                  |                  |                             |             |             |             |                           |                 |

Выбор сечений ВЛ производим по нормальному режиму работы сети, а проверяем их по аварийному. Выбранные сечения проходят по допустимому току. Полученные сечения округляем до ближайших стандартных сечений и принимаем для ВЛ сталеалюминевые провода соответствующих марок.

Выполним проверку выбранных сечений по техническим ограничениям. В зависимости от района по гололеду проверяется условие механической прочности. Для района по гололеду II категории минимально допустимое сечение проводов на опорах  $F_{min} = 35 \text{ мм}^2$  [6]. Для высоковольтных линий напряжением 110 кВ минимально допустимое сечение проводов  $F_{min} = 70 \text{ мм}^2$  [6]. Все выбранные провода проходят по данному условию.

Параметры  $r_0$ ,  $x_0$ , и  $b_0$  приняты в соответствии со справочными данными III табл. III.5 и III.6. Параметры  $R$ ,  $X$ ,  $B$  и  $Q_c$  рассчитаны по выражениям

$$R = r_0 L; X = x_0 L;$$

$$B = b_0 L; Q_c = U_{ном}^2 B.$$

## Выбор трансформаторов

В соответствии с исходными данными в состав нагрузок  $S_{н1}$ ,  $S_{н2}$ ,  $S_{н3}$  входят потребители всех категорий по надежности электроснабжения. Поэтому на каждой подстанции принимаются к установке 2 трансформатора. Мощность трансформаторов на подстанциях выбирается по аварийному режиму (один трансформатор отключен, другой берет всю нагрузку) с учетом допустимой перегрузки  $k_{\pi} = 1,5$  для трансформаторов средней мощности

$$S_{\text{т ном}} \geq S_{\text{н}} / 1,5.$$

Тип трансформаторов выбирается из приложения П2 табл. П2.1-П2.6. В таблицу 4.1 заносятся все параметры трансформатора.

Таблица 4.1

| Трансформатор | $S_{\text{Т ном}},$<br>кВА | $U_{\text{ВН}},$<br>кВ | $U_{\text{НН}},$<br>кВ | $\Delta P_{\text{х}},$<br>кВт | $\Delta P_{\text{к}},$<br>кВт | $u_{\text{к}},$<br>% | $I_{\text{х}},$<br>% | $\Delta Q_{\text{х}},$<br>квар | $R_{\text{Т}},$<br>Ом | $X_{\text{Т}},$<br>Ом |
|---------------|----------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|               |                            |                        |                        |                               |                               |                      |                      |                                |                       |                       |

Параметры  $S_{\text{Т ном}}, U_{\text{ВН}}, U_{\text{НН}}, \Delta P_{\text{х}}, \Delta P_{\text{к}}, u_{\text{к}},$  и  $I_{\text{х}}$  приняты в соответствии со справочными данными. Остальные параметры трансформаторов рассчитаны по следующим выражениям:

$$R_{\text{Т}} = \Delta P_{\text{к}} U_{\text{ВН}}^2 10^3 / S_{\text{Т ном}}^2,$$

$$X_{\text{Т}} = u_{\text{к}} \% U_{\text{ВН}}^2 10^3 / 100 S_{\text{Т ном}},$$

$$\Delta Q_{\text{х}} = I_{\text{х}} \% S_{\text{Т ном}}.$$

### Примечание.

Для трансформатора с расщепленными обмотками низшего напряжения сопротивления  $R_{\text{Т}}$  и  $X_{\text{Т}}$  определены для случая, когда эти расщепленные обмотки работают параллельно. В случае раздельной работы этих обмоток сопротивление каждой обмотки будет в 2 раза больше.

$$R'_T = R''_T = 2R_T, \quad X'_T = X''_T = 2X_T.$$

После выбора номинального напряжения сети, сечений проводов воздушных линий и трансформаторов на подстанциях принципиальная схема электрической сети должна иметь вид (пример), показанный на рис. 4.1

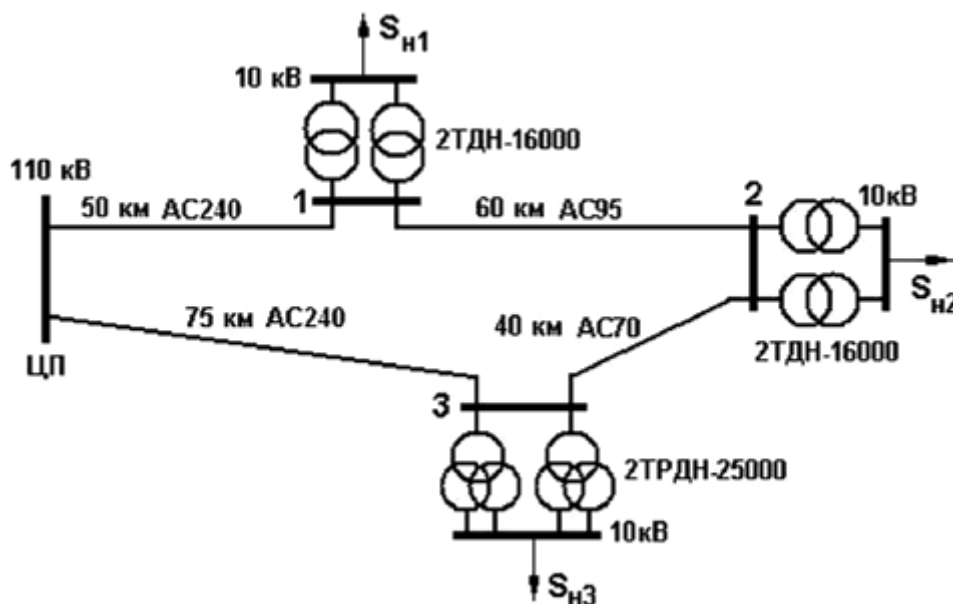


Рисунок 4.1 – Принципиальная схема электрической сети

Для выбора трансформаторов на понизительных подстанциях достаточно одного расчета не зависимо от того разомкнутая или замкнутая конфигурация сети, так как мощности узлов нагрузок  $S_{н1}$ ,  $S_{н2}$ ,  $S_{н3}$  остаются неизменными, так же как и напряжение сети.

## Анализ и обоснование схем электрической сети и понижительных подстанций. Разомкнутая электрическая сеть

Расчет производится по укрупненным показателям стоимости сети [8].

Порядок расчета схемы разомкнутой сети представлен ниже (рисунок

6.1)

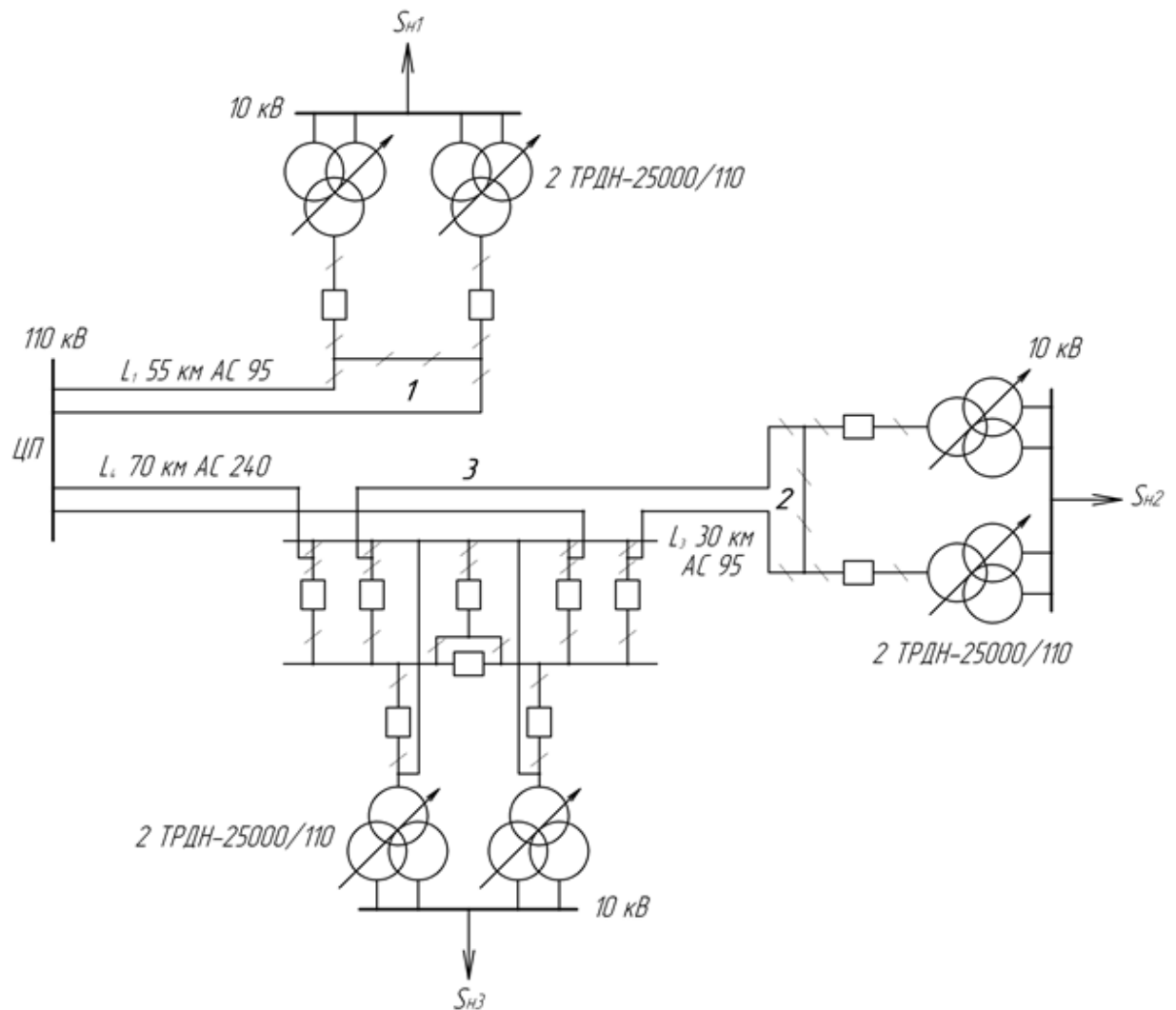


Рисунок 6.1 – Пример принципиальной схемы разомкнутой сети

Стоимость ЛЭП на железобетонных опорах:

$$K_{ил} = \Pi \cdot L_i \cdot n, \text{ руб.};$$

где  $\Pi_0$  - укрупненный показатель стоимости опор,

$L_i$  - длина линии,

$n$  - число цепей линии.

Общая стоимость ЛЭП:

$$K_{\text{Л}} = \sum_{i=1}^n K_{i,\text{Л}}$$

Стоимость ячеек масляных выключателей:

$$K_{\text{яч.}} = \Pi_{\text{я}} \cdot n, \text{ руб.}$$

где  $\Pi_{\text{я}}$  - укрупненный показатель стоимости ячейки,  
 $n$  - число ячеек.

Стоимость силовых трансформаторов:

$$K_{\text{тр.}} = \Pi_{\text{тр.}} \cdot n, \text{ руб.}$$

Постоянная часть затрат:

$$K_{\text{пост.}} = \Pi_{\text{пост.}} \cdot n, \text{ руб.}$$

Стоимость понизительных подстанций:

$$K_{\text{подст.}} = K_{\text{яч.}} + K_{\text{тр.}} + K_{\text{пост.}}$$

Стоимость сети:

$$K_{\text{эс}} = K_{\text{Л}} + K_{\text{подст.}}$$

Потери в линиях, кВт:

$$\Delta P_{\text{max Л1}} = \frac{S_{\text{Л1-1}}^2}{U^2} \cdot R_{\text{Л1}}$$

$$\Delta P_{\text{max Л3}} = \frac{S_{\text{3-2}}^2}{U^2} \cdot R_{\text{Л3}}$$

$$\Delta P_{\text{max Л4}} = \frac{S_{\text{Л1-1}}^2}{U^2} \cdot R_{\text{Л4}}$$

Общие потери в линиях:

$$\sum \Delta P_{\text{max Л}} = \Delta P_{\text{max Л1}} + \Delta P_{\text{max Л3}} + \Delta P_{\text{max Л4}}, \text{ кВт.}$$

Потери на подстанциях, кВт:

$$\Delta P_{\text{max подст.1}} = \frac{S_1^2}{U^2} \cdot R_T / 2,$$

$$\Delta P_{\text{max подст.2}} = \frac{S_2^2}{U^2} \cdot R_T / 2,$$

$$\Delta P_{\max \text{ подст.3}} = \frac{S_3^2}{U^2} \cdot R_T / 2,$$

Общие потери на подстанциях:

$$\sum \Delta P_{\max \text{ подст.}} = \Delta P_{\max \text{ подст.1}} + \Delta P_{\max \text{ подст.2}} + \Delta P_{\max \text{ подст.3}}, \text{ кВт.}$$

Время наибольших потерь:

$$\tau = (0,124 + T_{\max} \cdot 10^{-4})^2 \cdot 8760, \text{ ч}$$

Общие потери в сети:

$$\sum \Delta P_{\max} = \sum \Delta P_{\max, \text{Л}} + \sum \Delta P_{\max \text{ подст.}} + \sum \Delta P_{\text{х.х}}, \text{ кВт.}$$

Переменные потери:

$$\Delta W' = \tau \cdot \sum \Delta P_{\max}, \text{ МВт} \cdot \text{ч.}$$

Постоянные потери:

$$\Delta W'' = \sum \Delta P_{\text{х.х}} \cdot T, \text{ МВт} \cdot \text{ч.}$$

Стоимость потерь электроэнергии:

$$I_{\Delta W} = C' \cdot \Delta W' + C'' \cdot \Delta W'', \text{ руб.}$$

где  $C' = 3,1 \text{ руб./кВтч}$ ,  $C'' = 1,5 \text{ руб./кВтч}$ .

Эксплуатационные затраты:

$$I_3 = \frac{a_{\text{Л}} \cdot K_{\text{Л}}}{100} + \frac{a_{\text{подст}} \cdot K_{\text{подст.}}}{100} + I_{\Delta W}, \text{ руб.}$$

где  $a_{\text{Л}}$  - доля затрат на эксплуатацию линии, 2,6-2,8 %

$a_{\text{подст}}$  - доля затрат на эксплуатацию подстанции = 9,2-9,6 %

Общие затраты, руб.:

$$З_{\text{общ.}} = K_{\text{эс}} + I_3,$$

Приведенные затраты, руб.:

$$З_{\text{пр.}} = P_{\text{н}} \cdot З_{\text{общ.}},$$

**Замкнутая электрическая сеть**

Расчет замкнутой сети производим по укрупненным показателям стоимости сети [8], аналогично методики, представленной выше.

Пример принципиальной схемы замкнутой сети имеет вид, показанный на рисунке 6.2.

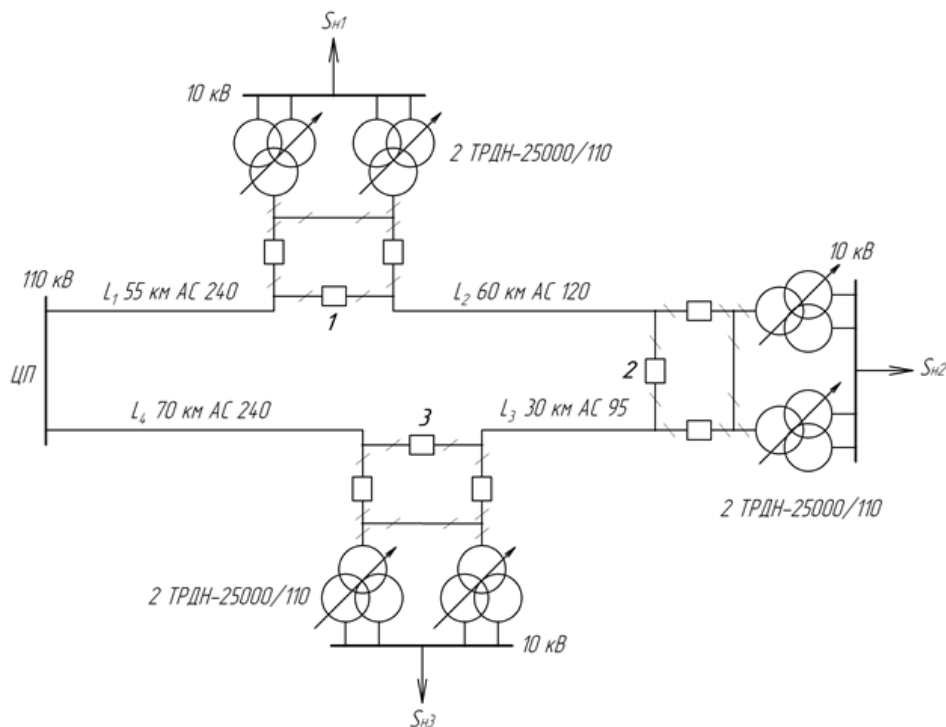


Рисунок 6.2 – Принципиальная схема замкнутой электрической цепи

Технико-экономические показатели сравниваемых вариантов электрических сетей в (руб.) сведётся в таблицу 6.1.

Таблица 1.6

| Вариант | $K_{л.}$ | $K_{яч.}$ | $K_{тр.}$ | $K_{пост.}$ | $K_{подст.}$ | $K_{эс}$ | $I_{з.}$ | $З_{общ.}$ | $З_{пр.}$ |
|---------|----------|-----------|-----------|-------------|--------------|----------|----------|------------|-----------|
| I       |          |           |           |             |              |          |          |            |           |
| II      |          |           |           |             |              |          |          |            |           |

Исходя из технико-экономических показателей стоимости сравниваемых вариантов электрической сети, принимаем к проектированию такую конфигурацию сети, которая экономически целесообразна, как по капитальным, так и по эксплуатационным затратам.

## Приведение нагрузок узлов к стороне высшего напряжения

Схема замещения узла 1 проектируемой электрической сети имеет вид, показанный на рис. 7.1.

Активная нагрузка узла 1, приведенная к высшему напряжению, будет отличаться от нагрузки  $P_{H1}$  на величину потерь активной мощности в трансформаторах:

$$P_1 = P_{H1} + 2\Delta P_{x1} + \Delta P_{к1} S_{H1}^2 / 2S_{T \text{ ном}}$$

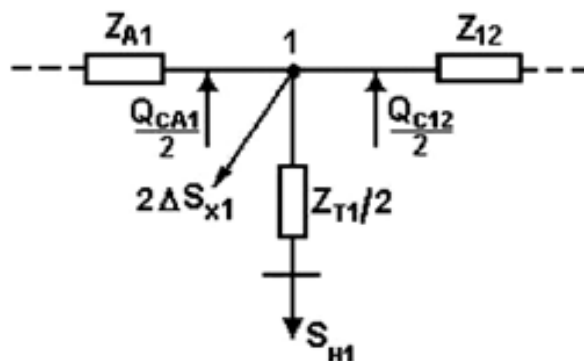


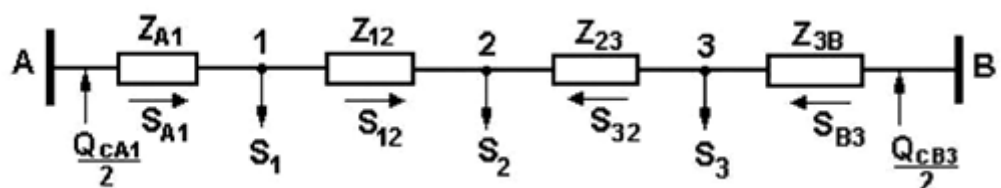
Рисунок 7.1 – Схема замещения 1-го узла электрической сети

Реактивная нагрузка узла 1, приведенная к высшему напряжению, будет отличаться от нагрузки  $Q_{i1}$  на величину потерь реактивной мощности в трансформаторах и на величину половин зарядных мощностей ВЛ, примыкающих к узлу 1

$$Q_1 = Q_{H1} + 2\Delta Q_{x1} + u_k \% S^2 / 2 \cdot 100 S_{T \text{ ном}} - (Q_{CA1} + Q_{C12}) / 2$$

Приведение нагрузок узлов 2 и 3 к высшему напряжению осуществляется аналогично.

После приведения нагрузок узлов 1, 2 и 3 к высшему напряжению схема замещения электрической сети будет иметь вид, показанный на рис. 5.2.



### Расчет установившегося режима электрической сети

В результате расчета установившегося режима электрической сети определяются:

- точное потокораспределение в сети;
- напряжения в узлах сети для оценки качества напряжения и необходимости его регулирования.

Предварительное потокораспределение в сети найдем без учета потерь мощности. Для определения мощностей, протекающих по головным участкам А1 и В3, воспользуемся выражением

$$S_{A1} = (S_1 Z_{1B}^* + S_2 Z_{2B}^* + S_3 Z_{3B}^*) / Z_{AB}^*.$$

$$S_{B3} = (S_3 Z_{3A}^* + S_2 Z_{2A}^* + S_1 Z_{1A}^*) / Z_{AB}^*.$$

Для проверки правильности выполненного расчета проверим условие:

$$S_{A1} + S_{B3} = S_1 + S_2 + S_3.$$

Если условие выполняется, то расчет мощности головных участков выполнен правильно.

Мощности остальных участков находится согласно первому закону Кирхгофа:

$$S_{12} = S_{A1} - S_1; \quad S_{32} = S_{B3} - S_3.$$

Выбирается узел потокораздела, например, узел 2, поскольку к этому узлу мощности притекают с разных сторон. Узел потокораздела обозначен на схеме замещения значком ▼.

В результате выполненного расчета кольцевая сеть условно делится по узлу 2 на две разомкнутые схемы (рис. 6.1).

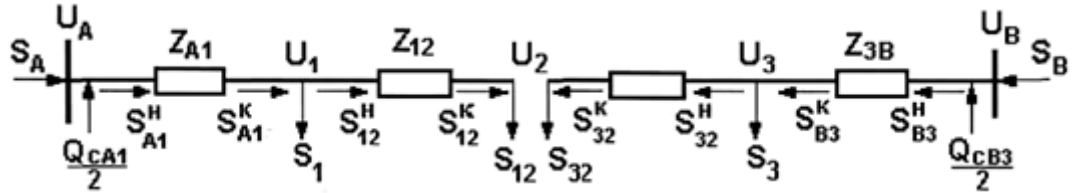


Рисунок 8.1 – Деление кольцевой схемы на две разомкнутые схемы  
Мощность в конце участка 12.

Расчет двух разомкнутых схем выполним в соответствии с ниже изложенным алгоритмом. Этот расчет включает в себя два этапа. На первом этапе определяем уточненное потокораспределение в сети. Расчет ведем при напряжении сети, равном номинальному. Рассмотрим подробно расчет левой части схемы рис. 6.1.

Мощность в конце участка 12.

$$S_{12}^{\kappa} = S_{12}$$

Потери мощности в линии 12 составляют

$$\Delta P_{12} = (S_{12}^{\kappa})^2 R_{12} / U_{ном}^2;$$

$$\Delta Q_{12} = (S_{12}^{\kappa})^2 X_{12} / U_{ном}^2.$$

Мощность в начале линии 12 составляет

$$S_{12}^H = S_{12}^{\kappa} + \Delta S_{12}.$$

Мощность в конце линии A1 определится по первому закону Кирхгофа

$$S_{A1}^{\kappa} = S_{12}^H + S_1.$$

Потери мощности в линии A1 составляют

$$\Delta P_{A1} = (S_{A1}^{\kappa})^2 R_{A1} / U_{ном}^2;$$

$$\Delta Q_{A1} = (S_{A1}^{\kappa})^2 X_{A1} / U_{ном}^2.$$

Мощность в начале линии A1 составляет

$$S_{A1}^H = S_{A1}^{\kappa} + \Delta S_{A1}.$$

Мощность, требуемая от источника A, определяется по первому закону Кирхгофа

$$S_A = S_{A1}^H - jQ_{cA1} / 2$$

Совершенно аналогично выполняется первый этап расчета для правой части схемы рис. 6.1.

На втором этапе расчета определяются напряжения в узлах сети. Напряжение в центре питания (на узловой подстанции) в режиме наибольшей нагрузки составляет  $U_A = U_B = (1,03..1,04)U_{ном}$  кВ. Падение напряжения в линии A1 в соответствии с выражением будет

$$\Delta U_{A1} = \Delta U_{A1} + j\delta U_{A1} \left( (P_{A1}^H R_{A1} + Q_{A1}^H X_{A1}) + j(P_{A1}^H X_{A1} - Q_{A1}^H R_{A1}) \right) / U_A$$

Модуль напряжения в узле 1 составляет

$$U_1 = \sqrt{(U_A - \Delta U_{A1})^2 + \delta U_{A1}^2}$$

Напряжение в узле 1 при учете только продольной составляющей падения напряжения составляет

$$U_1 = U_A - \Delta U_{A1}$$

Влияние поперечной составляющей падения напряжения в сети очень невелико. Поэтому в дальнейшем при расчете напряжений с целью упрощения будет учитываться только продольная составляющая падения напряжения, называемая потерей напряжения.

Потеря напряжения в линии 12 составляет

$$\Delta U_{12} = (P_{12}^H R_{12} + Q_{12}^H X_{12}) / U_1$$

Напряжение в узле 2

$$U_2 = U_1 - \Delta U_{12}$$

Совершенно аналогично выполняется второй этап расчета для правой части схемы рис. 6.1. Потери напряжения и величины напряжений в узлах в соответствии с обозначениями, указанными на схеме рис. 6.1,  $\Delta U_{B3}, U_3, \Delta U_{32}, U_2$

Ограничимся в расчетах одной итерацией. Некоторое отличие напряжений узла 2, вычисленных для левой и правой частей схемы можно объяснить пренебрежением поперечной составляющей падения напряжения, а также ограничением расчетов одной итерацией.

## Расчет напряжений на вторичной обмотке трансформаторов

Расчет напряжения на вторичной обмотке трансформаторов рассмотрим на примере узла 3, схема замещения которого приведена на рис. 9.1.

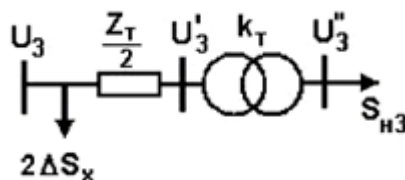


Рисунок 9.1 – Схема замещения узла 3

Потеря напряжения в двух трансформаторах узла 3 составляет

$$\Delta U_{т3} = (P_{н3} R_T + Q_{н3} X_T) / 2U_{ном}.$$

Напряжение на вторичной обмотке трансформаторов, приведенное к первичной обмотке:

$$U'_3 = U_3 - \Delta U_{т3}.$$

Действительное напряжение на вторичной обмотке трансформаторов при номинальном коэффициенте трансформации

$$U''_3 = U'_3 / k_T.$$

Аналогичные расчеты выполняются для узлов 1 и 2:

В соответствии с требованиями ПУЭ в режиме наибольшей нагрузки напряжения  $U''_1$ ,  $U''_2$  и  $U''_3$  должны быть не ниже номинального вторичного напряжения трансформатора кВ. Если это условие не выполняется, то на соответствующих подстанциях необходимо выполнить регулирование напряжения.

## Регулирование напряжения

Выбранные выше трансформаторы (ТДН и ТРДН) имеют устройство РПН с диапазоном регулирования напряжения  $\pm 91,78 \%$ . Необходимо оценить достаточность диапазона регулирования напряжения для поддержания напряжений на вторичной обмотке трансформаторов на требуемом уровне.

Выбор регулировочных ответвлений РПН выполним для узла с самым низким уровнем напряжения. Для трансформаторов, установленных в этом узле, необходимо переключить РПН с нулевого ответвления на требуемое ответвление  $U_{\text{отв } T}$ , т.е. изменить номинальный коэффициент трансформации  $k_{T2}$  до требуемого значения  $k_{T2 T}$ , обеспечивающего на вторичной обмотке трансформаторов требуемое напряжение  $U_{2T}'' \geq U_{2T \text{ ном}}$  кВ. В соответствии с выражением (7.6) напряжение требуемого регулировочного ответвления

$$U_{\text{отв } T} = U_2' U_{\text{HH}} / U_{2T}''.$$

Полученное напряжение требуемого регулировочного ответвления округляется до ближайшего  $i$ -го стандартного значения, которое подбирается по выражению:

$$U_{\text{отв } i} = U_{\text{ВН}} \pm i \cdot 1,78 \cdot U_{\text{ВН}} / 100$$

или из П2 табл. П2.1-П2.6.

Действительное напряжение на вторичной обмотке трансформаторов после регулирования

$$U_{2д} = U_2' U_{\text{HH}} / U_{\text{отв-п}}.$$

Далее оценивается достаточность диапазона регулирования для поддержания на требуемом уровне напряжения на вторичной обмотке трансформаторов в выбранном узле.

Регулирование напряжения в узлах 1 и 3 выполняется аналогично.

## Оценка экономической эффективности электрической сети

Экономичность режима электрической сети оценивается по величине потерь мощности и электроэнергии.

Суммарные потери активной мощности в сети определяются как разность между активной мощностью, требуемой от источника питания, и активной мощностью нагрузок. Активная мощность, требуемая от источника питания, определена при расчете установившегося режима электрической сети и составляет

$$P = P_A + P_B, \text{ МВт}$$

Суммарная активная мощность нагрузок согласно исходным данным составляет  $P_{н\Sigma}$ , МВт.

Суммарные потери активной мощности

$$\Delta P_{\Sigma} = P - P_{н\Sigma}$$

Доля потерь от активной мощности, отпущенной потребителям, составляет

$$\Delta P_{\Sigma} \% = \Delta P_{\Sigma} 100 / P.$$

Доля потерь от потребляемой активной мощности

$$\Delta P_{\Sigma} \% = \Delta P_{\Sigma} 100 / (P_{н1} + P_{н2} + P_{н3}).$$

Суммарные потери активной мощности условно делятся на переменные  $\Delta P_{\Sigma}'$  и постоянные  $\Delta P_{\Sigma}''$ . Постоянные потери или потери в сердечниках трансформаторов в соответствии с табл. 4.1 составляют

$$\Delta P_{\Sigma}'' = 2\Delta P_{x1} + 2\Delta P_{x2} + 2\Delta P_{x3}$$

Остальная часть суммарных потерь мощности - это переменные потери в активных сопротивлениях линий и трансформаторов

$$\Delta P_{\Sigma}' = \Delta P_{\Sigma} - \Delta P_{\Sigma}'',$$

Видно, что основную часть суммарных потерь (96... 97%) составляют переменные потери.

Годовые потери электроэнергии в соответствии с формулой составят

$$\Delta W_{\text{год}} = \Delta P_{\Sigma}' \tau + \Delta P_{\Sigma}'' T_{\text{вкл}}, \text{ MВт} \cdot \text{ч}$$

Число часов наибольших потерь в соответствии с эмпирической формулой

$$\tau_{\text{max}} = (0.124 + T_{\text{max}} 10^{-4})^2 8760.$$

Доля потерь от электроэнергии, отпущенной потребителям, составляет

$$\Delta W_{\text{год}} \% = \Delta W_{\text{год}} 100 / (PT_{\text{max}}).$$

### **Расчет конструктивной части ВЛ**

Выполнить расчет провода АС одноцепной ВЛ напряжением  $U_{\text{ном}}$  кВ, сооружаемой на стальных или железобетонных опорах в населенной местности типа В (низкоэтажная застройка). Расчетные климатические условия выбираются из приложения ПЗ табл. ПЗ.5.

#### **Выбор опоры**

На основании исходных данных из приложения 3 табл. ПЗ.3 предварительно выбирается промежуточная, одноцепная опора на напряжение  $U_{\text{ном}}$  кВ

Габаритный пролет для этой опоры  $l_r$  м. Расчетный пролет принимаем равным  $l = (0,6-0,9) \cdot l_r$  м.

Необходимо выписать геометрические размеры опоры в соответствии с приложением 3 табл. ПЗ.3:

$$H, \text{ м}; h_{\text{т-п}}, \text{ м}; h_{\text{п-з}}, \text{ м}; h_{\text{п-п}}, \text{ м}; \lambda, \text{ м}$$

где  $\lambda$  - длина гирлянды изоляторов.

#### **Удельные нагрузки на провод**

Из таблицы физико-механических характеристик проводов (приложение 3 табл. ПЗ.1) находим вес одного километра провода  $P$ , Н/км и диаметр провода  $d$ , мм.

Далее по формулам рассчитаем удельные нагрузки.

Удельная нагрузка от собственного веса провода

$$p_1 = P \cdot 10^{-3} / F.$$

Максимально допустимая стрела провеса провода определяется по выражению

$$[f] = h_{\text{п-3}} - \lambda - h_{\text{г}}.$$

где  $h_{\text{г}}$ , м, габарит ВЛ, принятый по табл. ПЗ.6.

Высота расположения приведенного центра тяжести проводов определяется по выражению

$$h_{\text{пр}} = \frac{\sum_{i=1}^m h_i}{m} - \lambda - \frac{2}{3} [f].$$

Удельная нормативная нагрузка от веса гололеда на проводе определяется по формуле

$$p_{2i} = \pi g_0 K_i K_d b(d + K_i K_{d0} b) / F.$$

где коэффициенты  $K_i$  и  $K_d$  приняты по табл. ПЗ.7.

Удельная расчетная нагрузка от веса гололеда на проводе составляет

$$P_2 = P_{2н} \gamma_{nw} \gamma_p \gamma_f \gamma_d$$

где  $\gamma_{nw}$  - коэффициент надежности по ответственности ВЛ, зависящий от напряжения и количества цепей; для ВЛ до 220 кВ включительно  $\gamma_{nw} = 1$ ; для двухцепных ВЛ  $\gamma_{nw} = 1,3$  независимо от напряжения;

$\gamma_p$  - региональный коэффициент, принимаемый в диапазоне 1,0... 1,3; значение этого коэффициента принимается на основании опыта эксплуатации и указывается в задании на проектирование ВЛ;

$\gamma_f$  - коэффициент надежности по гололедной нагрузке;  $\gamma_f = 1,3$  для районов по гололеду I и II,  $\gamma_f = 1,6$  для районов по гололеду III и выше;

$\gamma_d = 0,5$  – коэффициент условий работы.

Суммарная удельная расчетная нагрузка от веса провода и гололеда в соответствии с формулой составляет

$$P_3 = P_1 + P_2.$$

Удельная нормативная ветровая нагрузка при отсутствии гололеда на проводе в соответствии с формулой составляет

$$p_{4н} = \alpha_w \cdot K_i \cdot K_w \cdot C_x \cdot W \cdot d \cdot 10^{-3} / F.$$

где  $\alpha_w$  - коэффициент, учитывающий неравномерность ветрового давления по пролету ВЛ, принимаемый равным 0,76 при  $W = 40$  даН/м<sup>2</sup>;  $\alpha_w = 0,71$  – при 50 даН/м<sup>2</sup>; 0,7 - при 60 даН/м<sup>2</sup> и более;

$K_i$  - коэффициент, учитывающий влияние длины пролета на ветровую нагрузку, равный 1,2 при длине пролета 50 м; 1,1 - при 100 м; 1,05 - при 150 м; 1,0 - при 250 м и более;

$K_w$  - коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте в зависимости от типа местности, определяемый по табл. П5.8;

$C_x$  - коэффициент лобового сопротивления, зависящий от диаметра провода и принимаемый равным: 1,1 - для проводов диаметром 20 мм и более; 1,2 - для проводов диаметром менее 20 мм;

$W$  - ветровое давление в соответствии с районом по ветру.

Удельная нормативная ветровая нагрузка при наличии гололеда на проводе в соответствии с формулой составляет

$$p_{5н} = \alpha_w K_i K_w C_x W_{\Gamma} (d + 2K_i K_d b_3) \cdot 10^{-3} / F$$

где  $C_x=1,2$  для всех проводов, покрытых гололедом; остальные составляющие указаны выше;

$W_{\Gamma}=0,25 W$  - ветровое давление при гололеде.

Удельные расчетные ветровые нагрузки при отсутствии и наличии гололеда в соответствии с формулами составляют

$$P_4 = P_{4н} \gamma_{nw} \gamma_p \gamma_f,$$

$$P_5 = P_{5н} \gamma_{nw} \gamma_p \gamma_f,$$

где  $\gamma_f=1,1$  - коэффициент надежности по ветровой нагрузке.

Расчетная удельная нагрузка от ветра и веса провода без гололеда в соответствии с формулой составляет

$$p_6 = \sqrt{p_1^2 + p_4^2}.$$

Расчетная удельная нагрузка от веса провода, покрытого гололедом, и ветра в соответствии с формулой составляет

$$p_7 = \sqrt{p_3^2 + p_5^2}.$$

Выбирается наибольшая расчетная удельная нагрузка  $p_{\max}$ .

*Для расчета проводов на механическую прочность регламентируют следующие сочетания климатических условий (режимы):*

1. *Режим низшей температуры при отсутствии ветра и гололеда, характеризуемый удельной расчетной нагрузкой  $p_1$  и температурой  $\Theta_{\min}$ ;*
2. *Режим среднегодовой температуры при отсутствии ветра и гололеда, характеризуемый удельной расчетной нагрузкой  $p_1$  и температурой  $\Theta_{cp}$ ;*

**3. Режим наибольшей внешней нагрузки, характеризуемый удельной расчетной нагрузкой  $p_{\max}$  и температурой**

$$\Theta_r = \Theta_B = -5^\circ\text{C}.$$

*В режиме 3 в качестве наибольшей удельной расчетной нагрузки  $p_{\max}$  принимается нагрузка  $p_6$  или  $p_7$ . При соотношении  $p_7 > p_6$  принимается  $p_{\max} = p_7$ , при соотношении  $p_6 > p_7$  принимается  $p_{\max} = p_6$ .*

**Определение исходного режима провода**

В качестве исходного режима предварительно примем режим наибольшей внешней нагрузки. Параметры этого режима необходимо выписать  $p_{\max}, \Theta_r, \sigma_{p_{\max}} = [\sigma_{p_{\max}}]$  из приложения ПЗ табл. ПЗ.1.

Значение температуры гололедообразования  $\Theta_a = -5^\circ\text{C}$  принято в соответствии с рекомендациями ПУЭ.

По выражению вычислим левую часть уравнения состояния провода

$$C = [\sigma_{p_{\max}}] + \alpha E \Theta_r - p_{\max}^2 l^2 E / (24 [\sigma_{p_{\max}}]^2).$$

В правую часть уравнения состояния провода подставим параметры режима низшей температуры  $p_1, \Theta_{\min}$ . Коэффициенты А и В неполного кубического уравнения будут соответственно равны

$$A = \alpha E \Theta_{\min} - C.$$

$$B = -p_1^2 l^2 E / 24.$$

Неполное кубическое уравнение для режима низшей температуры будет иметь вид

$$\sigma_{\Theta_{\min}}^3 + A \sigma_{\Theta_{\min}}^2 - B = 0.$$

Решение этого уравнения дает величину механического напряжения в проводе в режиме низшей температуры  $\sigma_{\Theta_{\min}}$ , даН/мм<sup>2</sup>.

$$A = \alpha E \Theta_{\text{cp}} - C.$$

$$B = -p_1^2 l^2 E / 24.$$

Неполное кубическое уравнение для режима среднегодовой температуры будет иметь вид

$$\sigma_{\Theta_{\text{ср}}}^3 + A\sigma_{\Theta_{\text{ср}}}^2 - B = 0.$$

В правую часть уравнения состояния подставим параметры режима среднегодовой температуры  $p_1, \Theta_{\text{ср}}$ .

Решение этого уравнения дает величину механического напряжения в проводе в режиме среднегодовой температуры  $\sigma_{\Theta_{\text{ср}}}$ , даН/мм<sup>2</sup>.

Проверяем условия механической прочности провода:

- в режиме наибольшей внешней нагрузки  $\sigma_{p_{\text{max}}} \leq [\sigma_{p_{\text{max}}}]$ ;
- в режиме минимальной температуры  $\sigma_{\Theta_{\text{min}}} < [\sigma_{\Theta_{\text{min}}}]$ ;
- в режиме средней температуры  $\sigma_{\Theta_{\text{ср}}} < [\sigma_{\Theta_{\text{ср}}}]$ .

Если условия выполняются, то исходный режим выбран правильно.

### **Расчет монтажных стрел провеса провода**

Для двух значений температуры  $\Theta_{\text{min}}$  и  $\Theta_{\text{ср}}$  величины механического напряжения в проводе вычислены выше и составляют соответственно  $\sigma_{\Theta_{\text{min}}}$  и  $\sigma_{\Theta_{\text{ср}}}$ . Выполним расчет механического напряжения в проводе для режима высшей температуры  $\Theta_{\text{max}}$ . В правую часть уравнения состояния провода подставим параметры режима высшей температуры  $p_1, \Theta_{\text{max}}$ . Коэффициенты  $A$  и  $B$  неполного кубического уравнения будут соответственно равны

$$A = \alpha E \Theta_{\text{max}} - C.$$

$$B = -p_1^2 l^2 E / 24.$$

Неполное кубическое уравнение для режима высшей температуры будет иметь вид

$$\sigma_{\Theta_{\text{max}}}^3 + A\sigma_{\Theta_{\text{max}}}^2 - B = 0.$$

Решение этого уравнения дает величину механического напряжения в проводе в режиме высшей температуры  $\sigma_{\Theta_{\max}}$ .

Для трех значений температуры по формулам вычислим стрелы провеса провода:

$$f_{\Theta_{\min}} = p_1 l^2 / 8\sigma_{\Theta_{\min}}; \quad f_{\Theta_{\text{ср}}} = p_1 l^2 / 8\sigma_{\Theta_{\text{ср}}}; \quad f_{\Theta_{\max}} = p_1 l^2 / 8\sigma_{\Theta_{\max}}.$$

По полученным значениям стрел провеса строим монтажный график  $f = F(\Theta)$ , показанный на рис. 12.4.1.

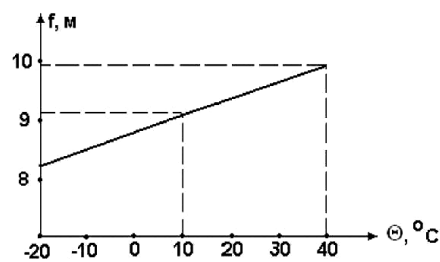


Рисунок 12 – Пример монтажного графика сталеалюминиевого провода сечением  $150 \text{ мм}^2$  в пролете длиной 280 м

Этот график дает информацию монтажникам и обслуживающему персоналу о величине стрелы провеса провода при любой температуре окружающей среды.

### Проверка габарита воздушной линии

Для проверки габарита воздушной линии необходимо знать максимальное значение стрелы провеса провода  $f_{\max}$ . Как отмечалось выше, максимальная стрела провеса провода имеет место в одном из двух режимов:

- режиме высшей температуры,
- режиме гололеда без ветра.

Стрела провеса в режиме высшей температуры определена выше и составляет  $f_{\Theta_{\max}}$ .

$$A = \alpha E \Theta_{\max} - C, \quad B = -p_1^2 l^2 E / 24.$$

Неполное кубическое уравнение для режима гололеда без ветра будет иметь вид

$$\sigma_r^3 + A\sigma_r^2 - B = 0.$$

Выполним расчет механического напряжения в проводе и его стрелы провеса для режима гололеда без ветра. В правую часть уравнения состояния провода подставим параметры этого режима  $p_3$ ,  $\Theta_r$ .

Решение этого уравнения дает величину механического напряжения в проводе в режиме гололеда без ветра  $\sigma_r$ . Стрела провеса провода в этом режиме составит

$$f_r = p_3 l^2 / 8\sigma_r.$$

Итак, максимальная стрела провеса провода  $f_{\max} = f_r$  имеет место в режиме гололеда без ветра. Далее проверяется условие

$$h_{п-з} - \lambda - f_{\max} > h_r.$$

Если условие не выполняется, то необходимо уменьшить  $l$  (пролет).

Приложение А. Графическая часть

Чертёж промежуточной одноцепной опоры

Принципиальная электрическая схема сети

## Критерии оценивания проекта

Оценка «отлично» выставляется студенту, если он показал глубокое и хорошо аргументированное обоснование проектных решений; четкую формулировку и понимание изучаемой проблемы; широкое и правильное использование относящейся к теме литературы и примененных аналитических методов; проявлено умение делать обобщения на основе отдельных деталей. Содержание проекта и ход защиты указывают на наличие навыков работы студента в данной области. Оформление курсового проекта и графического материала соответствует предъявляемым требованиям с наличием необходимой библиографии. Защита курсового проекта показала повышенную подготовку студента и его склонность к аналитической и проектной работе.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если присутствует аргументированное обоснование проектных решений; четкая формулировка и понимание изучаемой проблемы; использование ограниченного числа литературных источников, но достаточного для проведения проектирования. Работа основана на среднем по глубине анализе изучаемой проблемы и при этом сделано незначительное число обобщений. Содержание проекта и ход защиты указывают на наличие практических навыков работы студента в данной области. Оформление курсового проекта и графического материала соответствует предъявляемым требованиям с наличием необходимой библиографии. Ход защиты курсового проекта показал достаточную теоретическую и практическую подготовку студента.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если присутствует достаточное обоснование проектных решений, но отсутствует глубокое понимание рассматриваемой проблемы. В библиографии даны в основном ссылки на стандартные литературные источники. Труды, необходимые для всестороннего изучения проблемы, использованы в ограниченном объеме. Заметна нехватка компетентности студента в данной области знаний. Оформление курсового проекта и графического материала с элементами

небрежности. Защита курсового проекта показала удовлетворительную теоретическую и практическую подготовку студента, ограниченную склонность к научной работе.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если проектные решения ошибочны. суждения по исследуемой проблеме не всегда компетентны. Неточности и неверные выводы по изучаемой литературе. Курсовой проект и графический материал оформлен с элементами заметных отступлений от принятых требований. Во время защиты студентом проявлена ограниченная научная эрудиция.

### **Порядок защиты проекта**

Защита состоит в коротком докладе студента по выполненной работе и в ответах на вопросы присутствующих на защите. Научный руководитель характеризует работу студента над курсовым проектом.

Результаты защиты курсового проекта, согласно действующему Положению о текущем контроле и промежуточной аттестации в СКФУ, оцениваются дифференцированной отметкой по пятибалльной системе. Оценка курсового проекта заносится в зачетную книжку студента и зачетно-экзаменационную ведомость.

**Защита курсовых проектов, предусмотренных учебным планом, проводится не позднее, чем за две недели до начала зачетно-экзаменационной сессии.**

Студент, не представивший в установленный срок курсовой проект или не защитивший его по неуважительной причине, считается имеющим академическую задолженность.

Курсовые проекты, представляющие теоретический и практический интерес, следует представлять на конкурс в студенческие научные общества, конференции, отмечать приказом по университету.

Выполненные работы после их защиты должны храниться на кафедре в течение 2 лет, не считая года написания; затем работы, не представляющие для кафедры интерес, уничтожаются по акту.

### **Список рекомендуемой литературы**

#### **Основная литература:**

13. Кобелев А.В. Режимы работы электроэнергетических систем [Электронный ресурс] : учебное пособие для бакалавров и магистров направления «Электроэнергетика» / А.В. Кобелев, С.В. Кочергин, Е.А. Печагин. — Электрон. текстовые данные. — Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2015. — 80 с. — 978-5-8265-1411-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/64564.html>

14. Русина, А. Г. Балансы мощности и выработки электроэнергии в электроэнергетической системе : учебно-методическое пособие / А. Г. Русина, Т. А. Филиппова. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2012. — 55 с. — ISBN 978-5-7782-1935-9. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/45078.htm>

15. Ананичева, С. С. Анализ электроэнергетических сетей и систем в примерах и задачах : учебное пособие / С. С. Ананичева, С. Н. Шелюг. — Екатеринбург : Уральский федеральный университет, ЭБС АСВ, 2016. — 176 с. — ISBN 978-5-7996-1784-4. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/65910.html>

16. Фадеева, Г. А. Проектирование распределительных электрических сетей : учебное пособие / Г. А. Фадеева, В. Т. Федин ; под редакцией В. Т. Федина. — Минск : Вышэйшая школа, 2009. — 365 с. — ISBN 978-985-06-1597-8. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/20124.html>

### ***Дополнительная литература:***

1. Моделирование в электроэнергетике [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.Ф. Шаталов [и др.]. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь: Ставропольский государственный аграрный университет, АГРУС, 2014. — 140 с. — 978-5-9596-1059-3. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/47317.html>

2. Короткевич, М. А. Эксплуатация электрических сетей : учебник / М. А. Короткевич. — Минск : Вышэйшая школа, 2014. — 351 с. — ISBN 978-985-06-2397-3. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/35574.html>

### ***Методическая литература:***

1. Методические рекомендации для студентов по организации самостоятельной работы по дисциплине по дисциплине «Электроэнергетические системы и сети».

### **Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины**

1. Университетская библиотека онлайн <http://www.biblioclub.ru>
2. Электронно-библиотечная система IPRbooks» - <http://www.iprbookshop.ru/>

### **Информационные справочные системы:**

1. <http://docs.cntd.ru/> Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации ТЕХЭКСПЕРТ
2. Профессиональные справочные системы Техэксперт <http://vuz.kodeks.ru/>

## ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение 1

### **Справочные данные по выбору и расчету высоковольтных проводов**

Таблица П1.1 – Нормированные значения экономической плотности

| Проводники                                                  | Плотность тока $j_n$ , А/мм <sup>2</sup> ,<br>при $T_{max}$ , ч/год |             |            |
|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------|------------|
|                                                             | 1000...3000                                                         | 3000...5000 | более 5000 |
| Неизолированные<br>провода и шины:                          |                                                                     |             |            |
| медные                                                      | 2,0                                                                 | 1,7         | 1,4        |
| алюминиевые                                                 | 1,0                                                                 | 0,9         | 0,8        |
| Кабели с бумажной пропитанной<br>изоляцией с жилами:        |                                                                     |             |            |
| медными                                                     | 2,4                                                                 | 2,0         | 1,6        |
| алюминиевыми                                                | 1,3                                                                 | 1Д          | 1,0        |
| Кабели с резиновой и пластмассо-<br>вой изоляцией с жилами: |                                                                     |             |            |
| медными                                                     | 2,8                                                                 | 2,5         | 2,2        |
| алюминиевыми                                                | 1,5                                                                 | 1,4         | 1,3        |

Таблица П 1.2 – Условия выбора сечения провода по механической прочности

| Характери-<br>стика ВЛ                          | Минимально допустимое сечение проводов, мм <sup>2</sup>           |                                              |                       |          |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------|----------|
|                                                 | алюминиевых и из не-<br>термообработанного<br>алюминиевого сплава | из термообработанного<br>алюминиевого сплава | сталеалю-<br>миниевых | стальных |
| ВЛ в районах<br>по гололеду: до                 |                                                                   |                                              |                       |          |
| II                                              | 70                                                                | 50                                           | 35                    | 35       |
| III-IV                                          | 95                                                                | 50                                           | 50                    | 35       |
| V и более                                       | -                                                                 | -                                            | 70                    | 35       |
| ВЛ на двух-<br>цепных<br>опорах 35 кВ и<br>выше | -                                                                 | -                                            | 120                   |          |

Таблица П1.3 – Проверка выбранного сечения по условиям короны

|                                        |     |     |     |     |     |     |     |
|----------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Напряжение, кВ                         | 110 | 150 | 220 | 330 | 500 | 750 | 750 |
| Кол-во проводов в фазе                 | 1   | 1   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   |
| $F_{min\text{ кор}}$ , мм <sup>2</sup> | 70  | 120 | 240 | 240 | 300 | 400 | 240 |

Таблица П1.4 – Таблица допустимых токов для выбранных сечений  
провода

|                         |     |     |     |     |     |      |      |
|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| $F, \text{мм}^2$        | 35  | 50  | 70  | 95  | 120 | 150  | 185  |
| $I_{\text{д}} \text{А}$ | 175 | 210 | 265 | 330 | 390 | 450  | 510  |
| $F, \text{мм}^2$        | 240 | 300 | 330 | 400 | 500 | 600  | 700  |
| $I_{\text{д}} \text{А}$ | 610 | 690 | 730 | 825 | 945 | 1050 | 1180 |

## Приложение 2

### **Справочные данные по выбору и расчету силовых трансформаторов**

Таблица П2.1 – Трехфазные двухобмоточные трансформаторы на 110

| Тип                             | $S_{ном}$<br>МВА | Пределы<br>регулиру-<br>рования | Каталожные данные        |                                    |           |                      |               |           | Расчетные<br>данные |              |                       |
|---------------------------------|------------------|---------------------------------|--------------------------|------------------------------------|-----------|----------------------|---------------|-----------|---------------------|--------------|-----------------------|
|                                 |                  |                                 | $U_{ном}$ обмоток,<br>кВ |                                    | $U_k, \%$ | $\Delta P_k,$<br>кВт | $P_x,$<br>кВт | $I_x, \%$ | $R_T,$<br>Ом        | $X_T,$<br>Ом | $\Delta Q_x,$<br>кВАр |
|                                 |                  |                                 | ВН                       | НН                                 |           |                      |               |           |                     |              |                       |
| ТМН-2500/110                    | 2,5              | +10*1,5%-<br>8*1,5%             | ПО                       | 6,6;11                             | 10,5      | 22                   | 5,5           | 1,5       | 42,6                | 508,2        | 37,5                  |
| ТМН-<br>6300/110                | 6,3              | $\pm 9*1,78\%$                  | 115                      | 6,6;11                             | 10,5      | 44                   | 11,5          | 0,8       | 14,7                | 220,4        | 50,4                  |
| ТДН-<br>10000/110               | 10               | $\pm 9*1,78\%$                  | 115                      | 6,6;11                             | 10,5      | 60                   | 14            | 0,7       | 7,95                | 139          | 70                    |
| ТДН-<br>16000/110               | 16               | $\pm 9*1,78\%$                  | 115                      | 6,5;11                             | 10,5      | 85                   | 19            | 0,7       | 4,38                | 86,7         | 112                   |
| ТРДН(ТРДНФ)<br>> 25000/110      | 25               | $\pm 9*1,78\%$                  | 115                      | 6,3/6,5;<br>6,3/10,5;<br>10,5/10,5 | 10,5      | 120                  | 27            | 0,7       | 2,54                | 55,9         | 175                   |
| ТДНЖ-<br>25000/110              | 25               | $\pm 9*1,78\%$                  | 115                      | 27,5                               | 10,5      | 120                  | 30            | 0,7       | 2,5                 | 55,5         | 175                   |
| ТД-<br>40000/110                | 40               | $\pm 2*2,5\%$                   | 121                      | 3,15;6,3;10,5                      | 10,5      | 160                  | 50            | 0,65      | 1,46                | 38,4         | 260                   |
| ТРДН-<br>40000/110              | 40               | $\pm 9*1,78\%$                  | 115                      | 6,3/6,3;<br>6,3/10,5;<br>10,5/10,5 | 10,5      | 172                  | 36            | 0,65      | 1,4                 | 34,7         | 260                   |
| ТРДЦН-<br>63000/110             | 63               | $\pm 9*1,78\%$                  | 115                      | 6,3/6,3;<br>6,3/10,5;<br>10,5/10,5 | 10,5      | 260                  | 59            | 0,6       | 0,87                | 22           | 410                   |
| ТРДЦНК-<br>63000/110            | 63               | $\pm 9*1,78\%$                  | 115                      | 6,3/6,3;<br>6,3/10,5;<br>10,5/10,5 | 10,5      | 245                  | 59            | 0,6       | 0,8                 | 22           | 378                   |
| ТДЦ-<br>80000/110               | 80               | $\pm 2*2,5\%$                   | 121                      | 6,3;10,5;13,8                      | 10,5      | 310                  | 70            | 0,6       | 0,71                | 19,2         | 480                   |
| ТРДЦН-<br>80000/110<br>(ТРДЦНК) | 80               | $\pm 9*1,78\%$                  | 115                      | 6,3/6,3;<br>6,3/10,5;<br>10,5/10,5 | 10,5      | 310                  | 70            | 0,6       | 0,6                 | 17,4         | 480                   |
| ТДЦ-<br>125000/110              | 125              | $\pm 2*2,5\%$                   | 121                      | 10,5;13,8                          | 10,5      | 400                  | 120           | 0,55      | 0,37                | 12,3         | 687,5                 |
| ТРДЦН-<br>125000/110            | 125              | $\pm 9*1,78\%$                  | 115                      | 10,5/10,5                          | 10,5      | 400                  | 100           | 0,55      | 0,4                 | 11,1         | 687,5                 |
| ТДЦ-<br>200000/110              | 200              | $\pm 2*2,5\%$                   | 121                      | 13,8;15,75;18                      | 10,5      | 550                  | 170           | 0,5       | 0,2                 | 7,7          | 1000                  |
| ТДЦ-<br>250000/110              | 250              | $\pm 2*2,5\%$                   | 121                      | 15,75                              | 10,5      | 640                  | 200           | 0,5       | 0,15                | 6,1          | 1250                  |
| ТДЦ-<br>400000/110              | 400              | $\pm 2*2,5\%$                   | 121                      | 20                                 | 10,5      | 900                  | 320           | 0,45      | 0,08                | 3,8          | 1800                  |

| <i>Тип</i>                         | <i>S<sub>ном</sub>, МВА</i> | <i>Каталожные данные</i>            |                |                  |                         |            |            |
|------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|----------------|------------------|-------------------------|------------|------------|
|                                    |                             | <i>U<sub>ном</sub>, обмоток, кВ</i> |                |                  | <i>U<sub>к</sub>, %</i> |            |            |
|                                    |                             | <i>ВН</i>                           | <i>СН</i>      | <i>НН</i>        | <i>В-С</i>              | <i>В-Н</i> | <i>С-Н</i> |
| ТМТН-63000/110                     | 6,3                         | 115                                 | 38,5           | 6,6;11           | 10,5                    | 17         | 6          |
| ТДТН- 10000/110                    | 10                          | 115                                 | 38,5           | 6,Б;11           | 10,5                    | 17         | 6          |
| ТДТН- 16000/110*                   | 16                          | 115                                 | 38,5           | 6,6;11           | 10,5                    | 17         | 6          |
| ТДТН- 25000/110                    | 25                          | 115                                 | 11;38,5        | 6,6;11           | 10,5                    | 17,5       | 6,5        |
| ТДТНЖ- 25000/110                   | 25                          | 115                                 | 38,5;27,5      | 6,6; 11;<br>27,5 | 10,5(17)                | 17(10,5)   | 6          |
| ТДТН- 40000/110*                   | 40                          | 115                                 | 11;22;38,<br>5 | 6,6;11           | 10,5(17)                | 17(10,5)   | 6          |
| ТДТНЖ- 40000/110                   | 40                          | 115                                 | 27,5;35,5      | Б,Б;11;<br>27,5  | 10,5(17)                | 17(10,5)   | 6          |
| ТДТН-63000/110*<br>(ТДЦНТ)         | 63                          | 115                                 | 38,5           | 6,6;11           | 10,5                    | 17         | 6,5        |
| ТДТН-80000/110*<br>(ТДЦТН, ТДЦТНК) | 80                          | 115                                 | 38,5           | 6,6;11           | 11(17)                  | 18,5(10,5) | 7(6,5)     |

кВ

Таблица П2.2

Продолжение таблицы П2.2

| <i>Тип</i>                        | <i>Каталожные данные</i>   |                           |                         | <i>Расчетные данные</i>  |           |           |                          |           |           |                             |
|-----------------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------|-----------|--------------------------|-----------|-----------|-----------------------------|
|                                   | <i>ΔP<sub>к</sub>, кВт</i> | <i>P<sub>х</sub>, кВт</i> | <i>I<sub>х</sub>, %</i> | <i>R<sub>т</sub>, Ом</i> |           |           | <i>X<sub>т</sub>, Ом</i> |           |           | <i>ΔQ<sub>х</sub>, кВАр</i> |
|                                   |                            |                           |                         | <i>ВН</i>                | <i>СН</i> | <i>НН</i> | <i>ВН</i>                | <i>СН</i> | <i>НН</i> |                             |
| ТМТН-63000/110                    | 58                         | 14                        | 1,2                     | 9,7                      | 9,7       | 9,7       | 225,7                    | 0         | 131,2     | 75,6                        |
| ТДТН-10000/110                    | 76                         | 17                        | 1Д                      | 5                        | 5         | 5         | 142,2                    | 0         | 82,7      | ПО                          |
| ТДТН-16000/110*                   | 100                        | 23                        | 1,0                     | 2,6                      | * 2,6     | 2,6       | 88,9                     | 0         | 52        | 160                         |
| ТДТН-25000/110                    | 140                        | 31                        | 0,7                     | 1,5                      | 1,5       | 1,5       | 56,9                     | 0         | 35,7      | 175                         |
| ТДТНЖ-25000/110                   | 140                        | 42                        | 0,9                     | 1,5                      | 1,5       | 1,5       | 57                       | 0(33)     | 33(0)     | 225                         |
| ТДТН- 40000/110*                  | 200                        | 43                        | 0,6                     | 0,8                      | 0,8       | 0,8       | 35,5                     | 0(22,3)   | 22,3(0)   | 240                         |
| ТДТНЖ- 40000/110                  | 200                        | 63                        | 0,8                     | 0,9                      | 0,9       | 0,9       | 35,5                     | 0(20,7)   | 20,7(0)   | 320                         |
| ТДТН-63000/110*<br>(ТДЦНТ)        | 290                        | 56                        | 0,7                     | 0,5                      | 0,5       | 0,5       | 22,0                     | 0         | 13,6      | 441                         |
| ТДТН-80000/110*<br>(ТДЦТН,ТДЦТНК) | 390                        | 82                        | 0,6                     | 0,4                      | 0,4       | 0,4       | 18,6<br>(21,7)           | 0(10,7)   | 11,9(0)   | 480                         |

\*При X<sub>т</sub> обмотки СН, равном нулю, обмотки НН изготавливаются с U<sub>ном</sub>, равным 6,3 или 10,5 кВ.

**Примечание.** Все трансформаторы имеют РПН ±9\*1,78% в нейтрали ВН за исключением трансформатора ТНДТЖ-40000 с РПН ±8\*1,5% на ВН.

Таблица П2.3 – Трехфазные двухобмоточные трансформаторы на 150 кВ

| Тип                 | S <sub>ном</sub> , МВА | Пределы регулирования | Каталожные данные            |                         |                    |                    |                      |                    | Расчетные данные    |                     |                     |
|---------------------|------------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|----------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                     |                        |                       | U <sub>ном</sub> обмоток, кВ |                         | U <sub>к</sub> , % | $\Delta P_k$ , кВт | $\Delta P_{кх}$ , Вт | I <sub>х</sub> , % | R <sub>т</sub> , Ом | X <sub>т</sub> , Ом | $\Delta Q_x$ , кВАр |
|                     |                        |                       | ВН                           | НН                      |                    |                    |                      |                    |                     |                     |                     |
| ТДН-16000/150       | 16                     | ±8*1,5%               | 158                          | 6,6;11                  | 11                 | 85                 | 21                   | 0,8                | 8,3                 | 172                 | 128                 |
| ТРДН-32000/150      | 32                     | ±8*1,5%               | 158                          | 5,3/6,3;6,3/10,510,5/10 | 105                | 145                | 35                   | 0,7                | 3,54                | 82                  | 224                 |
| ТРДН-63000/150      | 63                     | ±8*1,5%               | 158                          | 5,3/6,3;6,3/10,510,5/10 | 10,5               | 235                | 59                   | 0,65               | 1,48                | 41,6                | 410                 |
| ТЦ (ТДЦ)-250000/150 | 250                    | -                     | 165                          | 10,5;13,8;15,75         | 11                 | 640                | 190                  | 0,5                | 0,3                 | 12                  | 1250                |

**Примечание.**

Регулирование напряжения осуществляется за счет РПН в нейтрали ВН (трансформаторы 16-63 МВА) или ПБВ (трансформатор 250МВА).

Таблица П2.4 – Трехфазные двухобмоточные трансформаторы на 220 кВ

| Тип              | S <sub>ном</sub> , МВА | Пределы регулирования | Каталожные данные            |                 |                    |                    |                       |                    | Расчетные данные    |                     |                     |
|------------------|------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                  |                        |                       | U <sub>ном</sub> обмоток, кВ |                 | U <sub>к</sub> , % | $\Delta P_k$ , кВт | $\Delta P_{кх}$ , кВт | I <sub>х</sub> , % | R <sub>т</sub> , Ом | X <sub>т</sub> , Ом | $\Delta Q_x$ , кВАр |
|                  |                        |                       | ВН                           | НН              |                    |                    |                       |                    |                     |                     |                     |
| ТРДН-40000/220   | 40                     | ±8*1,5%               | 230                          | 11/11; 6,6/6,6  | 12 •               | 170                | 50                    | 0,9                | 5,6                 | 158,7               | 360                 |
| ТРДЦН-63000/220  | 63                     | ±8*1,5%               | 230                          | 11/11; 6,6/6,6  | 12                 | 300                | 82                    | 0,8                | 3,9                 | 100,7               | 504                 |
| ТДЦ-80000/220    | 80                     | ±2*2,5%               | 242                          | 6,3; 10,5; 13,8 | 11                 | 320                | 105                   | 0,6                | 2,9                 | 80,5                | 480                 |
| ТРДЦН-100000/220 | 100                    | ±8*1,5%               | 230                          | 11/11; 38,5     | 12                 | 360                | 115                   | 0,7                | 1,9                 | 63,5                | 700                 |
| тдц-125000/220   | 125                    | ±2*2,5%               | 242                          | 10,5; 13,8      | 11                 | 380                | 135                   | 0,5                | 1,4                 | 51,5                | 625                 |
| ТРДЦН-160000/220 | 160                    | ±8*1,5%               | 230                          | 11/11; 38,5     | 12                 | 525                | 167                   | 0,6                | 1,08                | 39,7                | 960                 |
| ТДЦ-200000/220   | 200                    | ±2*2,5%               | 242                          | 13,8; 15,75; 18 | 11                 | 580                | 200                   | 0,45               | 0,77                | 32,2                | 900                 |
| ТДЦ-250000/220   | 250                    | -                     | 242                          | 13,8; 15,75     | 11                 | 650                | 240                   | 0,45               | 0,6                 | 25,7                | 1125                |
| тдц-400000/220   | 400                    | -                     | 242                          | 13,8; 15,75; 20 | 11                 | 880                | 330                   | 0,4                | 0,29                | 16,1                | 1600                |
| тц-630000/220    | 630                    | -                     | 242                          | 15,75; 20       | 12,5               | 1300               | 380                   | 0,35               | 0,2                 | 11,6                | 2205                |

### Приложение 3

#### **Справочные данные по расчету конструктивной части ВЛ**

Таблица ПЗ.1 – Физико-механические характеристики сталеалюминевых проводов ВЛ

| Характеристика провода                             | Сечение провода $F$ , мм <sup>2</sup> |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------------------------------------------|---------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                                    | 70                                    | 95   | 120  | 150  | 185  | 240  | 300  | 400  |
| Диаметр $d$ , мм                                   | 11,4                                  | 13,6 | 15,2 | 17,1 | 18,8 | 21,6 | 24   | 27,5 |
| Вес $P$ , Н/км                                     | 274                                   | 384  | 471  | 600  | 728  | 921  | 1132 | 1490 |
| $E \cdot 10^3$ , Н/мм <sup>2</sup>                 | 8,25                                  | 8,25 | 8,25 | 8,25 | 8,25 | 7,7  | 7,7  | 7,7  |
| $\alpha \cdot 10^{-6}$ , 1/°C                      | 19,2                                  | 19,2 | 19,2 | 19,2 | 19,2 | 19,8 | 19,8 | 19,8 |
| $[\sigma_{\ominus \min}]$ , Н/мм <sup>2</sup>      | 11,6                                  | 11,6 | 13,0 | 13,0 | 13,0 | 12,2 | 12,2 | 12,2 |
| $[\sigma_{\ominus \text{cp}}]$ , Н/мм <sup>2</sup> | 8,7                                   | 8,7  | 8,7  | 8,7  | 8,7  | 8,1  | 8,1  | 8,1  |
| $[\sigma_{\ominus \max}]$ , Н/мм <sup>2</sup>      | 11,6                                  | 11,6 | 13,0 | 13,0 | 13,0 | 12,2 | 12,2 | 12,2 |

Таблица ПЗ.2. – Физико-механические характеристики стальных грозозащитных тросов ВЛ

| Характеристика троса                               | Сечение троса $F$ , мм <sup>2</sup> |      |      |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------|------|------|
|                                                    | 35                                  | 50   | 70   |
| Диаметр троса $d$ , мм                             | 8,0                                 | 9,1  | 11,0 |
| Вес троса $P$ , Н/км                               | 330                                 | 417  | 623  |
| $E \cdot 10^3$ , Н/мм <sup>2</sup>                 | 20,0                                | 20,0 | 20,0 |
| $\alpha \cdot 10^{-6}$ , 1/°C                      | 12,0                                | 12,0 | 12,0 |
| $[\sigma_{\ominus \min}]$ , Н/мм <sup>2</sup>      | 60,0                                | 60,0 | 60,0 |
| $[\sigma_{\ominus \text{до}}]$ , Н/мм <sup>2</sup> | 42,0                                | 42,0 | 42,0 |
| $[\sigma_{\ominus \max}]$ , Н/мм <sup>2</sup>      | 60,0                                | 60,0 | 60,0 |

Таблица ПЗ.3 – Размеры унифицированных железобетонных и стальных промежуточных опор

| Опора   | Рис.     | Н, м | $h_{\text{т-п}}$ , м | $h_{\text{п-з}}$ , м | $h_{\text{п-п}}$ , м | $h_3$ , м |
|---------|----------|------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------|
| ПЗ5-1   | П.3.2,а  | 21,0 | 3,0                  | 14,0                 | 4,0                  | -         |
| ПЗ5-2   | П. 3.2,б | 23,0 | 3,0                  | 12,0                 | 4,0                  | -         |
| ПБЗ5-1* | П.3.1,а  | 22,6 | 2,0                  | 15,5                 | 3,0                  | 3,0       |
| ПБЗ5-3* | П.3.1,а  | 22,6 | 2,0                  | 14,5                 | 4,0                  | 3,0       |
| ПБЗ5-2* | П.3.1,б  | 22,6 | 3,7                  | 12,5                 | 3,0                  | 3,0       |
| ПБЗ5-4* | П.3.1,б  | 22,6 | 3,7                  | 10,5                 | 4,0                  | 3,0       |

|          |          |      |     |      |     |     |
|----------|----------|------|-----|------|-----|-----|
| П110-1   | П.3.2,а  | 25,0 | 2,0 | 19,0 | 4,0 | -   |
| П110-3   | П.3.2,а  | 25,0 | 2,0 | 19,0 | 4,0 | -   |
| П110-5   | П.3.2,а  | 28,0 | 3,0 | 19,0 | 6,0 | -   |
| П110-2   | П. 3.2,б | 31,0 | 4,0 | 19,0 | 4,0 | -   |
| П110-4   | П. 3.2,б | 31,0 | 4,0 | 19,0 | 4,0 | -   |
| П110-6   | П. 3.2,б | 35,0 | 4,0 | 19,0 | 6,0 | -   |
| ПБ110-1  | П.3.1,а  | 22,6 | 2,0 | 14,5 | 3,0 | 3,0 |
| ПБ110-3  | П.3.1,а  | 22,6 | 2,0 | 14,5 | 3,0 | 3,0 |
| ПБ110-5* | П.3.1,а  | 22,6 | 2,0 | 14,5 | 4,0 | 3,0 |
| ПБ110-2* | П.3.1,б  | 22,6 | 2,7 | 13,5 | 3,0 | 3,0 |
| ПБ110-4  | П.3.1,б  | 26,0 | 3,0 | 13,5 | 3,0 | 3,3 |
| ПБ110-6* | П.3.1,б  | 22,6 | 2,7 | 11,5 | 4,0 | 3,0 |
| ПБ110-8* | П.3.1,б  | 26,0 | 3,0 | 13,5 | 4,0 | 3,3 |
| П220-3   | П.3.2,а  | 36,0 | 4,0 | 25,5 | 6,5 | -   |
| П220-2   | П. 3.2,б | 41,0 | 5,5 | 22,5 | 6,5 | -   |
| ПБ220-1* | П.3.1,а  | 26,0 | 2,5 | 16,0 | 5,5 | 3,3 |

**Примечание.** Размер  $h_{т-п}$  от точки подвеса троса до верхней траверсы у железобетонных опор, отмеченных символом \*, включает в себя размер тросостойки (см. рис. П.9).

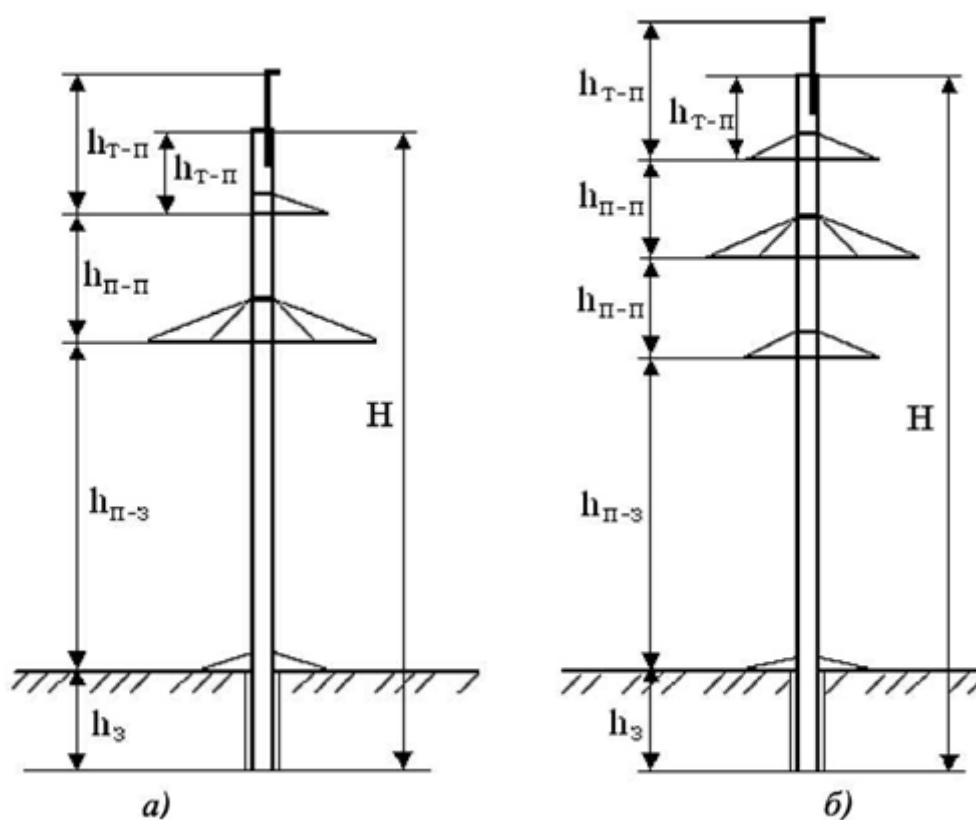


Рисунок П.3.1 – Размеры унифицированных железобетонных одноцепных (а) и двухцепных (б) промежуточных опор

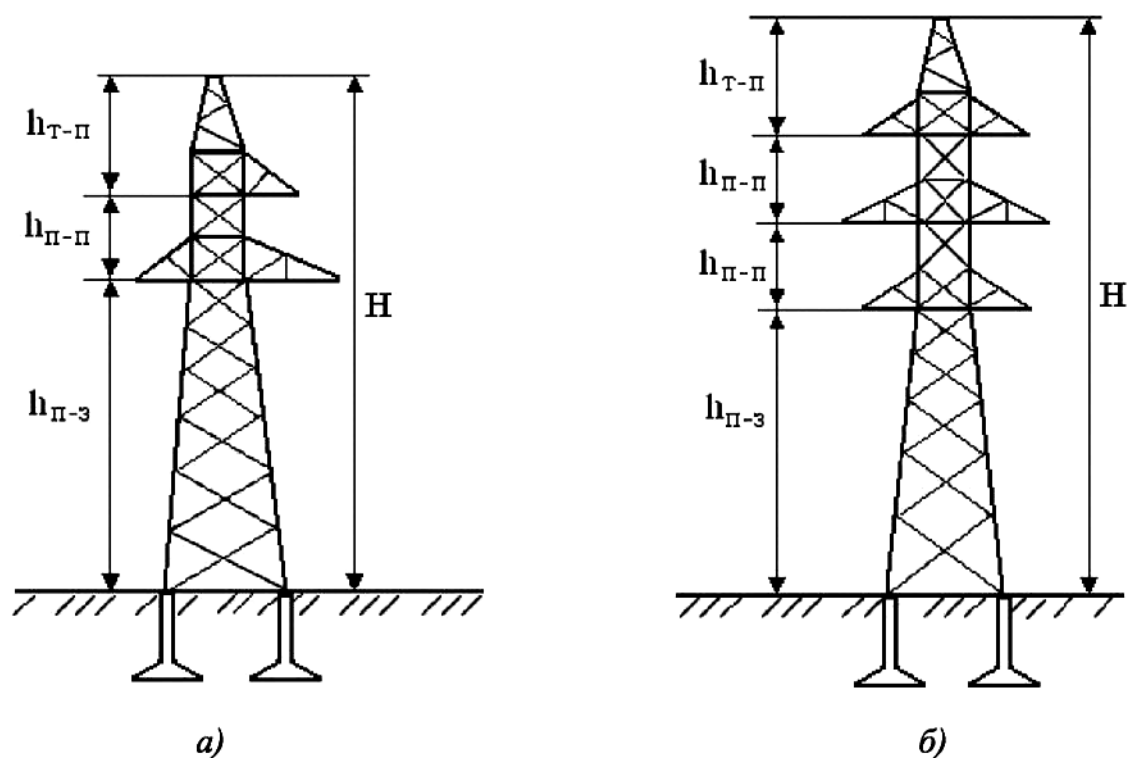


Рисунок П. 3.2 – Размеры унифицированных стальных одноцепных (а) и двухцепных (б) промежуточных опор

Таблица П3.4 – Область применения унифицированных железобетонных и стальных промежуточных опор

| Опора  | Сечение про-<br>вода, мм <sup>2</sup> | Район по гололеду | Габаритный пролет $l_r$ , м |
|--------|---------------------------------------|-------------------|-----------------------------|
| П35-1  | 70                                    | I, II, III, IV I, | 295,235,180,145             |
|        | 95                                    | II, III, IV I,    | 310,255,195,165             |
|        | 120                                   | II, III, IV I,    | 320, 270, 205, 175          |
|        | 150                                   | II, III, IV       | 330,280,215,185             |
| П35-2  | 70                                    | I, II, III, IV I, | 260, 200, 170, 130          |
|        | 95                                    | II, III, IV I,    | 280,230,180,150 290,        |
|        | 120                                   | II, III, IV I,    | 240, 190, 165 300,          |
|        | 150                                   | II, III, IV       | 255, 200, 175               |
| ПБ35-1 | 95                                    | I, II             | 325, 265,                   |
|        | 150                                   | I, II             | 340,315                     |
| ПБ35-3 | 95                                    | III, IV           | 205, 175                    |
|        | 150                                   | III, IV           | 255,215                     |
| ПБ35-2 | 95                                    | I, II             | 255,215                     |
|        | 150                                   | I, II             | 265, 255                    |
| ПБ35-4 | 95                                    | III, IV           | 145, 120                    |
|        | 150                                   | III, IV           | 175, 150                    |
| П110-1 | 70                                    | I, II             | 355, 260                    |
|        | 95                                    | I, II             | 375, 305                    |

| Опора   | Сечение про-<br>вода, мм <sup>2</sup> | Район по гололеду | Габаритный пролет 1т, м |
|---------|---------------------------------------|-------------------|-------------------------|
| П110-3  | 120                                   | I, II             | 405, 345                |
|         | 150                                   | I, II             | 405, 365                |
|         | 185                                   | I, II             | 405, 380                |
|         | 240                                   | I, II             | 395, 380                |
| П110-5  | 70                                    | III, IV           | 225, 190                |
|         | 120                                   | III, IV           | 290, 285                |
|         | 150                                   | III, IV           | 310, 265                |
|         | 185                                   | III, IV           | 325, 280                |
|         | 240                                   | III, IV           | 330, 290                |
| П110-2  | 70                                    | I, II             | 355, 280                |
|         | 95                                    | I, II             | 375, 305                |
| П110-4  | 120                                   | I, II             | 405, 345                |
|         | 150                                   | I, II             | 405, 365                |
|         | 185                                   | I, II             | 405, 380                |
|         | 240                                   | I, II             | 395, 380                |
| П110-6  | 70 95                                 | III, IV           | 225, 190                |
|         | 120                                   | III, IV           | 250, 210                |
|         | 150                                   | III, IV           | 290, 245                |
|         | 185                                   | III, IV           | 310, 265                |
|         | 240                                   | III, IV           | 325, 280                |
| ПБ110-1 | 70                                    | I, II             | 275, 215                |
|         | 95                                    | I, II             | 285, 240                |
|         | 120                                   | I, II             | 300, 270                |
|         | 150                                   | I, II             | 300, 285                |
| ПБ110-3 | 185                                   | I, II             | 305, 295                |
|         | 240                                   | I, II             | 295, 285                |
| ПБ110-5 | 70 95                                 | III, IV           | 175, 145                |
|         | 120                                   | III, IV           | 195, 165                |
|         | 150                                   | III, IV           | 225, 190                |
|         | 185                                   | III, IV           | 240, 210                |
|         | 240                                   | III, IV           | 305, 295                |
| ПБ110-2 | 70                                    | I, II             | 250, 200                |
|         | 95                                    | I, II             | 260, 220                |
|         | 120                                   | I, II             | 275, 250                |
| ПБ110-4 | 120                                   | I, II             | 275, 250                |
|         | 150                                   | I, II             | 275, 260                |
|         | 185                                   | I, II             | 275, 275                |
|         | 240                                   | I, II             | 275, 275                |
| ПБ110-6 | 70                                    | III, IV           | 135, 110                |
|         | 95                                    | III, IV           | 150, 125                |
|         | 120                                   | III, IV           | 170, 145                |

| Опора   | Сечение про-<br>вода, мм <sup>2</sup> | Район по гололеду                | Габаритный пролет 1г, м                  |
|---------|---------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------|
| ПБ110-8 | 150<br>185                            | III, IV<br>III, IV               | 225, 190<br>235, 205                     |
| П220-3  | 300<br>400                            | I, II, III, IV I,<br>II, III, IV | 520,490,430,380<br>520,475,435,390       |
| П220-2  | 300<br>400                            | I, II, III, IV I,<br>II, III, IV | 470, 440, 385, 345<br>465, 425, 390, 355 |
| ПБ220-1 | 300<br>400                            | I, II, III, IV I,<br>II, III, IV | 310,310,280,230<br>310,310,280,220       |
| ПБ220-3 | 300<br>400                            | I, II<br>I, II                   | 320,320<br>320,320                       |

**Примечания.** Буквенно-цифровое обозначение опор:

П - промежуточная опора;

Б - железобетонная опора;

отсутствие второй буквы - стальная опора;

110 (220) - опора для линии напряжением 110 (220) кВ;

1...8 - номер опоры (нечетные цифры - опора одноцепная, четные - двухцепная).

Таблица ПЗ.5 – Расчетные климатические условия

| Район по ветру | W, даН/м <sup>2</sup> (V, м/с) | Район по голо-<br>леду | b, мм   |
|----------------|--------------------------------|------------------------|---------|
| I              | 40 (25)                        | I                      | 10      |
| II             | 50 (29)                        | II                     | 15      |
| III            | 65 (32)                        | III                    | 20      |
| IV             | 80 (36)                        | IV                     | 25      |
| V              | 100 (40)                       | V                      | 30      |
| VI             | 125 (45)                       | VI                     | 35      |
| VII            | 150 (49)                       | VII                    | 40      |
| особый         | выше 1500 (выше 49)            | особый                 | выше 40 |

Таблица ПЗ.6 – Наименьшее допустимое расстояние от провода до земли

| Характер местности | Габарит ВЛ, h <sub>г</sub> , м, при напряжении |       |        |
|--------------------|------------------------------------------------|-------|--------|
|                    | до 35 кВ                                       | 110кВ | 220 кВ |
| Населенная         | 7                                              | 7     | 8      |
| Ненаселенная       | 6                                              | 6     | 7      |
| Труднодоступная    | 5                                              | 5     | 6      |

Таблица ПЗ.7 – Значения коэффициентов  $K_i$  и  $K_d$  учитывающих изменение толщины стенки гололеда от высоты расположения приведенного центра тяжести проводов и от диаметра провода

| $h_{пр}, м$ | $K_i$ | $d, мм$ | $K_d$ |
|-------------|-------|---------|-------|
| до 25       | 1,0   | до 10   | 1,0   |
| 30          | 1,4   | 20      | 0,9   |
| 50          | 1,6   | 30      | 0,8   |
| 70          | 1,8   | 50      | 0,7   |
| 100         | 2,0   | 70      | 0,6   |

Примечание. Для промежуточных высот  $h_{пр}$  значения коэффициентов  $K_i$  и  $K_d$  определяются линейной интерполяцией.

Таблица ПЗ.8. – Коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте в зависимости от типа местности

| $H_{пр}, м$ | Коэффициент $K_w$ для типов местности |          |          |
|-------------|---------------------------------------|----------|----------|
|             | <i>A</i>                              | <i>B</i> | <i>C</i> |
| до 15       | 1,0                                   | 0,65     | 0,4      |
| 20          | 1,25                                  | 0,85     | 0,55     |
| 40          | 1,5                                   | 1,1      | 0,8      |
| 60          | 1,7                                   | 1,3      | 1,0      |
| 80          | 1,85                                  | 1,45     | 1,15     |
| 100         | 2,0                                   | 1,6      | 1,25     |

Таблица ПЗ.5. – Характеристики подвесных изоляторов

| Изолятор | Разр. механ. нагрузка, кН | Вес, Н | Высота, мм | Кол-во изоляторов в гирлянде, шт, при напряжении |       |        |
|----------|---------------------------|--------|------------|--------------------------------------------------|-------|--------|
|          |                           |        |            | 35 кВ                                            | 110кВ | 220 кВ |
| ПФ-60    | 60                        | 65     | 167        | 3                                                | 7     | 13     |
| ПФ-160   | 160                       | 86     | 173        | 3                                                | 6     | 11     |
| ПФ-200   | 200                       | 128    | 194        | 3                                                | -     | 10     |
| ПС-60    | 60                        | 41     | 130        | 3                                                | 8     | 14     |
| ПС-120   | 120                       | 80     | 140        | -                                                | 7     | 13     |
| ПС-160   | 160                       | 90     | 170        | -                                                | 6     | 12     |
| ПС-220   | 220                       | 108    | 200        | -                                                | -     | 10     |
| ПС-300   | 300                       | 142    | 190        | -                                                | -     | 11     |

## Приложение 4

Таблица П4.1 – Варианты заданий на курсовое проектирование

| № вар . | P <sub>1</sub><br>Н | P <sub>2Н</sub> | P <sub>3</sub><br>Н | Q <sub>1</sub><br>Н | Q <sub>2</sub><br>Н | Q <sub>3</sub><br>Н | T,<br>час | L <sub>1</sub><br>К<br>М | L<br>2 | L<br>3 | L <sub>4</sub> | γ <sub>p</sub> | Р-Н<br>голо-<br>лед | Р-<br>Н<br>ве-<br>тер | Θ <sub>mi</sub><br>n °С | Θ <sub>ma</sub><br>х °С | Θ <sub>ср</sub><br>°С |
|---------|---------------------|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------|--------------------------|--------|--------|----------------|----------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| 1       | 10                  | 12              | 15                  | 5                   | 6                   | 8                   | 380<br>0  | 5<br>0                   | 7<br>0 | 4<br>0 | 95             | 1,<br>2        | I                   | I                     | -15                     | 38                      | 14,5                  |
| 2       | 12                  | 15              | 18                  | 6                   | 7                   | 9                   | 480<br>0  | 4<br>0                   | 6<br>0 | 7<br>0 | 80             | 1,<br>2        | II                  | II                    | -18                     | 35                      | 8,5                   |
| 3       | 9                   | 12              | 16                  | 4,5                 | 6                   | 8                   | 550<br>0  | 3<br>0                   | 5<br>0 | 3<br>0 | 70             | 1,<br>2        | III                 | III                   | -20                     | 40                      | 10                    |
| 4       | 11                  | 14,<br>5        | 17                  | 5,5                 | 7                   | 8                   | 520<br>0  | 4<br>0                   | 3<br>0 | 5<br>0 | 85             | 1,<br>2        | II                  | I                     | -15                     | 30                      | 7,5                   |
| 5       | 14                  | 17              | 25                  | 7                   | 8                   | 12                  | 590<br>0  | 4<br>5                   | 5<br>0 | 4<br>0 | 70             | 1,<br>2        | III                 | II                    | -5                      | 40                      | 17,<br>5              |
| 6       | 18                  | 22              | 28                  | 9                   | 11                  | 14                  | 360<br>0  | 5<br>5                   | 4<br>5 | 6<br>0 | 90             | 1,<br>2        | II                  | II                    | -20                     | 35                      | 7,5                   |
| 7       | 20                  | 24              | 30                  | 10                  | 12                  | 15                  | 410<br>0  | 6<br>0                   | 6<br>5 | 3<br>5 | 70             | 1,<br>2        | I                   | I                     | -7                      | 34                      | 13,<br>5              |
| 8       | 19                  | 25              | 27                  | 9                   | 12                  | 13                  | 590<br>0  | 4<br>0                   | 6<br>0 | 3<br>0 | 85             | 1,<br>2        | II                  | III                   | -10                     | 38                      | 14                    |
| 9       | 22                  | 28              | 30                  | 11                  | 14                  | 15                  | 360<br>0  | 5<br>0                   | 7<br>0 | 4<br>0 | 85             | 1,<br>2        | III                 | II                    | -8                      | 40                      | 16                    |
| 10      | 25                  | 29              | 32                  | 12                  | 14                  | 16                  | 450<br>0  | 5<br>5                   | 6<br>0 | 3<br>0 | 70             | 1,<br>2        | II                  | II                    | -17                     | 34                      | 8,5                   |
| 11      | 24                  | 26              | 28                  | 12                  | 13                  | 14                  | 490<br>0  | 4<br>0                   | 5<br>0 | 3<br>0 | 80             | 1,<br>2        | I                   | I                     | -15                     | 40                      | 12,<br>5              |
| 12      | 9                   | 14              | 20                  | 4                   | 7                   | 10                  | 510<br>0  | 5<br>0                   | 7<br>0 | 4<br>0 | 90             | 1,<br>2        | II                  | III                   | -10                     | 30                      | 10                    |
| 13      | 10                  | 20              | 30                  | 5                   | 10                  | 15                  | 620<br>0  | 5<br>0                   | 6<br>0 | 4<br>0 | 80             | 1,<br>2        | II                  | II                    | -10                     | 40                      | 15                    |
| 14      | 15                  | 20              | 25                  | 7                   | 10                  | 12                  | 610<br>0  | 6<br>0                   | 7<br>0 | 5<br>0 | 75             | 1,<br>2        | III                 | III                   | -20                     | 44                      | 12                    |
| 15      | 11                  | 22              | 30                  | 5                   | 11                  | 15                  | 420<br>0  | 4<br>0                   | 5<br>0 | 3<br>0 | 90             | 1,<br>2        | I                   | III                   | -5                      | 30                      | 12,<br>5              |
| 16      | 15                  | 18              | 28                  | 7,5                 | 9                   | 14                  | 320<br>0  | 6<br>0                   | 6<br>0 | 5<br>0 | 70             | 1,<br>2        | II                  | II                    | -10                     | 30                      | 10                    |
| 17      | 18                  | 25              | 30                  | 9                   | 12,<br>5            | 15                  | 480<br>0  | 6<br>0                   | 7<br>0 | 5<br>0 | 80             | 1,<br>2        | I                   | I                     | -20                     | 30                      | 5                     |
| 18      | 20                  | 25              | 27                  | 10                  | 12,<br>5            | 13                  | 580<br>0  | 4<br>0                   | 6<br>0 | 3<br>0 | 90             | 1,<br>2        | II                  | II                    | -10                     | 40                      | 15                    |
| 19      | 10                  | 12              | 20                  | 5                   | 6                   | 10                  | 430<br>0  | 5<br>0                   | 7<br>0 | 4<br>0 | 10<br>0        | 1,<br>2        | I                   | III                   | -15                     | 31                      | 8                     |
| 20      | 20                  | 25              | 30                  | 10                  | 12                  | 15                  | 560<br>0  | 6<br>0                   | 5<br>0 | 4<br>0 | 80             | 1,<br>2        | II                  | II                    | -20                     | 30                      | 5                     |

**Приложение 5**

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Пятигорский институт (филиал) СКФУ**

**КАФЕДРА ФИЗИКИ, ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ**

**КУРСОВОЙ ПРОЕКТ**

по дисциплине  
«Электроэнергетические системы и сети»  
на тему:  
«Проектирование замкнутой районной электрической сети (вариант - )»

**Выполнил:**

\_\_\_\_\_  
студент 3 курса группы

\_\_\_\_\_  
направления подготовки  
13.03.02

\_\_\_\_\_  
формы обучения

\_\_\_\_\_  
(подпись)

**Руководитель работы:**

\_\_\_\_\_  
(ФИО, должность, кафедра)

Работа допущена к защите

\_\_\_\_\_  
(подпись руководителя)

\_\_\_\_\_  
(дата)

Работа выполнена и  
защита с оценкой

\_\_\_\_\_ Дата защиты \_\_\_\_\_

Члены комиссии: доцент кафедры ФЭиЭ \_\_\_\_\_

(должность) (подпись)

(И.О. Фамилия)

доцент кафедры ФЭиЭ \_\_\_\_\_

Пятигорск. 20\_\_

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Пятигорский институт (филиал) СКФУ

**Методические указания**  
по организации и проведению самостоятельной работы  
по дисциплине «ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ»  
для студентов направления подготовки  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Пятигорск 2026 г.

## Содержание

### Введение

- 1    Общая характеристика самостоятельной работы обучающегося при изучении дисциплины «Электроэнергетические системы и сети»
- 2    План-график выполнения самостоятельной работы
- 3    Контрольные точки и виды отчетности по ним
- 4    Методические рекомендации по изучению теоретического материала
- 5    Список рекомендуемой литературы.

## Введение

Самостоятельная работа – планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (при частичном непосредственном участии преподавателя, оставляющем ведущую роль за работой студентов).

Самостоятельная работа студентов в ВУЗе является важным видом учебной и научной деятельности студента.

Ведущая цель организации и осуществления СРС должна совпадать с целью обучения студента – подготовкой бакалавра с высшим образованием. При организации СРС важным и необходимым условием становятся формирование умения самостоятельной работы для приобретения знаний, навыков и возможности организации учебной и научной деятельности.

Целью самостоятельной работы студентов является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю, опытом творческой, исследовательской деятельности. Самостоятельная работа студентов способствует развитию самостоятельности, ответственности и организованности, творческого подхода к решению проблем учебного и профессионального уровня.

### 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ «ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ»

К современному специалисту общество предъявляет достаточно широкий перечень требований, среди которых немаловажное значение имеет наличие у выпускников определенных способностей и умения самостоятельно добывать знания из различных источников, систематизировать полученную информацию, давать оценку конкретной финансовой ситуации. Формирование такого умения происходит в течение всего периода обучения через участие студентов в практических занятиях, выполнение контрольных заданий и тестов, написание курсовых и выпускных квалификационных работ. При этом самостоятельная работа студентов играет решающую роль в ходе всего учебного процесса.

Формы самостоятельной работы студентов разнообразны. В соответствии с рабочей программой дисциплины «Электроэнергетические системы и сети» предусмотрены следующие виды самостоятельной работы студента:

- самостоятельное изучение литературы;
- самостоятельное решение задач;
- выполнение курсового проекта и контрольной работы.

**Цель самостоятельного изучения литературы** – самостоятельное овладение знаниями, опытом исследовательской деятельности.

**Задачами** самостоятельного изучения литературы являются:

- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов.

**Цель самостоятельного решения задач** - овладение профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю будущей деятельности.

**Задачами** самостоятельного решения задач являются:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- развитие исследовательских умений.

**Целью самостоятельного выполнения курсового проекта** по дисциплине является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю, опытом творческой, исследовательской деятельности.

**Задачами** данного вида самостоятельной работы студента являются:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- развитие исследовательских умений;
- использование материала, собранного и полученного в ходе самостоятельных занятий на семинарах, на практических и лабораторных занятиях, при написании курсовой работы.

В результате освоения дисциплины формируются следующие компетенции:

| Код, формулировка компетенции                                      | Код, формулировка индикатора                                                                                                     | Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов                                                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ПК-1 Способен участвовать в проектировании систем электроснабжения | ИД-2 <sub>ПК-1</sub> Выбирает типовые проектные решения систем электроснабжения                                                  | Знает схемы и основное оборудование электрических сетей, простые конструкции электроэнергетических объектов питающих энергосистем.                                                                                               |
|                                                                    | ИД-3 <sub>ПК-1</sub> Обосновывает выбор параметров электрооборудования систем электроснабжения, учитывая технические ограничения | Владеет методами выбора и составления схем электрических сетей, навыками типового проектирования электрических сетей и умением правильно выбирать электрические схемы с учетом особенностей их работы и требований потребителей. |
|                                                                    | ИД-5 <sub>ПК-1</sub> Демонстрирует понимание взаимосвязи задач проектирования и эксплуатации систем                              | Умеет использовать основы теории передачи и распределения электрической энергии при решении задач                                                                                                                                |

|                                                                   |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                   |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                   | электроснабжения                                                                                             | проектирования электрических сетей                                                                                                                                                                                |
| ПК-2 Способен анализировать режимы работы систем электроснабжения | ИД-1 <sub>ПК-2</sub> Рассчитывает параметры электрооборудования систем электроснабжения                      | Умеет обосновывать технические решения при разработке схем распределения и передачи электрической энергии. Владеет навыками расчета параметров электрооборудования систем электроснабжения                        |
|                                                                   | ИД-2 <sub>ПК-2</sub> Рассчитывает режимы работы систем электроснабжения                                      | Знает технические и экономические расчеты, современные аналитические методы комплексного инженерного анализа.<br><br>Владеет навыками технико-экономических расчетов режимов работы систем электроснабжения.      |
|                                                                   | ИД-5 <sub>ПК-2</sub> Применяет инженерно-технические расчеты для решения задач профессиональной деятельности | Умеет проводить инженерно-технические расчеты с помощью программного обеспечения<br><br>Владеет навыками использования прикладных программ для выполнения инженерно-технических расчетов в профессиональной сфере |

## 2. ПЛАН-ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Очная форма обучения

| Код реализуемой компетенции (индикатора) | Вид деятельности студентов | Итоговый продукт самостоятельной работы | Средства и технологии оценки* | Объем часов, в том числе |                                    |       |
|------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|------------------------------------|-------|
|                                          |                            |                                         |                               | СРС                      | Контактная работа с преподавателем | Всего |
| 5 семестр                                |                            |                                         |                               |                          |                                    |       |

|                                                                          |                                                       |                              |                                                          |              |             |            |
|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------|-------------|------------|
| ПК-1<br>ИД-2ПК-1<br>ИД-3ПК-1<br>ИД-5ПК-1<br>ПК-2<br>ИД-1ПК-2<br>ИД-2ПК-2 | Самостоятельное изучение литературы по разделам № 1-5 | Конспект                     | Собеседование                                            | 67,05        | 7,45        | 74,5       |
|                                                                          | Подготовка к лабораторным работам                     | Отчет по лабораторной работе | Собеседование                                            | 7,29         | 0,81        | 8,1        |
|                                                                          | Подготовка к практическим занятиям                    | Решенная задача              | Письменный отчет о решении типовых, разноуровневых задач | 4,86         | 0,54        | 5,4        |
|                                                                          | Выполнение контрольной работы                         | Отчет письменный             | Собеседование                                            | 18           | 2           | 20         |
| <b>Итого за 5 семестр</b>                                                |                                                       |                              |                                                          | <b>97,2</b>  | <b>10,8</b> | <b>108</b> |
| <b>6 семестр</b>                                                         |                                                       |                              |                                                          |              |             |            |
| ПК-1<br>ИД-2ПК-1<br>ИД-3ПК-1<br>ИД-5ПК-1<br>ПК-2<br>ИД-1ПК-2<br>ИД-2ПК-2 | Самостоятельное изучение литературы по разделам №6-9  | Конспект                     | Собеседование                                            | 16,98        | 2,22        | 19,2       |
|                                                                          | Подготовка к лабораторным работам                     | Отчет по лабораторной работе | Собеседование                                            | 1,8          | 0,2         | 2          |
|                                                                          | Подготовка к практическим занятиям                    | Решенная задача              | Письменный отчет о решении типовых, разноуровневых задач | 1,62         | 0,18        | 1,8        |
|                                                                          | Выполнение курсового проекта                          | Проект с презентацией        | Презентация проекта                                      | 12           | 1           | 13         |
| <b>Итого за 6 семестр</b>                                                |                                                       |                              |                                                          | <b>32,4</b>  | <b>3,6</b>  | <b>36</b>  |
| <b>Итого</b>                                                             |                                                       |                              |                                                          | <b>129,6</b> | <b>14,4</b> | <b>144</b> |

Заочная форма обучения

|            |              |          |            |                          |
|------------|--------------|----------|------------|--------------------------|
| Код реали- | Вид деятель- | Итоговый | Средства и | Объем часов, в том числе |
|------------|--------------|----------|------------|--------------------------|

| зубной компетенции (индикатора)          | ности студентов                                       | продукт самостоятельной работы | технологии оценки*                                       | СРС   | Контактная работа с преподавателем | Всего |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------|-------|------------------------------------|-------|
| 5 семестр                                |                                                       |                                |                                                          |       |                                    |       |
| ПК-1<br>ИД-2ПК-1<br>ИД-3ПК-1<br>ИД-5ПК-1 | Самостоятельное изучение литературы по разделам № 1-5 | Конспект                       | Собеседование                                            | 156,1 | 16,9                               | 173   |
| ПК-2<br>ИД-1ПК-2<br>ИД-2ПК-2             | Подготовка к лабораторным работам                     | Отчет по лабораторной работе   | Собеседование                                            | 1,08  | 0,12                               | 1,2   |
| ПК-2<br>ИД-1ПК-2<br>ИД-2ПК-2             | Подготовка к практическим занятиям                    | Решенная задача                | Письменный отчет о решении типовых, разноуровневых задач | 0,72  | 0,08                               | 0,8   |
| ПК-2<br>ИД-1ПК-2<br>ИД-2ПК-2             | Выполнение контрольной работы                         | Отчет письменный               | Собеседование                                            | 14    | 2                                  | 16    |
| Итого за 5 семестр                       |                                                       |                                |                                                          | 171,9 | 19,1                               | 191   |
| 6 семестр                                |                                                       |                                |                                                          |       |                                    |       |
| ПК-1<br>ИД-2ПК-1<br>ИД-3ПК-1<br>ИД-5ПК-1 | Самостоятельное изучение литературы по разделам №6-9  | Конспект                       | Собеседование                                            | 96,66 | 10,74                              | 107,4 |
| ПК-2<br>ИД-1ПК-2<br>ИД-2ПК-2             | Подготовка к лабораторным работам                     | Отчет по лабораторной работе   | Собеседование                                            | 2,16  | 0,24                               | 2,4   |
| ПК-2<br>ИД-1ПК-2<br>ИД-2ПК-2             | Подготовка к практическим занятиям                    | Решенная задача                | Письменный отчет о решении типовых, разноуровневых задач | 1,08  | 0,12                               | 1,2   |

|                       |                                      |                            |                        |       |      |     |
|-----------------------|--------------------------------------|----------------------------|------------------------|-------|------|-----|
|                       | Выполнение<br>курсового про-<br>екта | Проект с пре-<br>зентацией | Презентация<br>проекта | 36    | 4    | 40  |
| Итого за<br>6 семестр |                                      |                            |                        | 135,9 | 15,1 | 151 |
| Итого                 |                                      |                            |                        | 307,8 | 34,2 | 342 |

### 3. КОНТРОЛЬНЫЕ ТОЧКИ И ВИДЫ ОТЧЕТНОСТИ ПО НИМ

В рамках рейтинговой системы успеваемость студентов по каждой дисциплине оценивается в ходе текущего контроля и промежуточной аттестации.

При проведении текущего контроля рейтинговая оценка знаний студента оценивается следующим образом:

| №<br>п/п | Вид деятельности студентов                                                                            | Сроки<br>выполнения | Количество<br>баллов |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------|
|          | 5 семестр                                                                                             |                     |                      |
| 1.       | Защита лабораторных работ.<br>УСТАНОВИВШИЕСЯ РЕЖИМЫ<br>РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ<br>СЕТЕЙ       | 6 неделя            | 10                   |
| 2.       | Защита лабораторных работ РЕГУЛИРОВАНИЕ<br>НАПРЯЖЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ<br>ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ      | 10 неделя           | 15                   |
| 3.       | Собеседование Расчет потокораспределения<br>активной мощности, выбор номинального<br>напряжения линий | 14 неделя           | 30                   |
|          | Итого за 5 семестр                                                                                    |                     | 55                   |
|          | 6 семестр                                                                                             |                     |                      |
| 4.       | Защита лабораторных работ. ОПТИМИЗАЦИЯ<br>РЕЖИМА МЕСТНОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ<br>ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ      | 6 неделя            | 10                   |
| 5.       | Защита лабораторных работ ОПТИМИЗАЦИЯ<br>РЕЖИМА РАЙОННОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ<br>ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ      | 10 неделя           | 15                   |
| 6.       | Собеседование Элементы проектирования<br>электрических сетей                                          | 14 неделя           | 30                   |
|          | Итого за 6 семестр                                                                                    |                     | 55                   |
|          | Итого                                                                                                 |                     | 110                  |

Максимально возможный балл за весь текущий контроль устанавливается равным 55. Текущее контрольное мероприятие считается сданным, если студент получил за него не менее 60% от установленного для этого контроля максимального балла. Рейтинговый балл, выставляемый студенту за текущее контрольное мероприятие, сданное студентом в установленные графиком контрольных мероприятий сроки, определяется следующим образом:

| Уровень выполнения контрольного задания | Рейтинговый балл (в % от максимального балла за контрольное задание) |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Отличный                                | 100                                                                  |
| Хороший                                 | 80                                                                   |
| Удовлетворительный                      | 60                                                                   |
| Неудовлетворительный                    | 0                                                                    |

#### 4. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗЧЕНИЮ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Самостоятельная работа студента начинается с внимательного ознакомления с содержанием учебного курса.

Изучение каждой темы следует начинать с внимательного ознакомления с набором вопросов. Они ориентируют студента, показывают, что он должен знать по данной теме. Вопросы темы как бы накладываются на соответствующую главу избранного учебника или учебного пособия. В итоге должно быть ясным, какие вопросы темы учебного курса и с какой глубиной раскрыты в конкретном учебном материале, а какие вообще опущены. Требуется творческое отношение и к самому содержанию дисциплины.

Вопросы, составляющие ее содержание, обладают разной степенью важности. Есть вопросы, выполняющие функцию логической связки содержания темы и всего курса, имеются вопросы описательного или разъяснительного характера, а также исторического экскурса в область изучаемой дисциплины. Все эти вопросы не составляют сути понятийного, концептуального содержания темы, но необходимы для целостного восприятия изучаемых проблем.

Изучаемая дисциплина имеет свой категориально-понятийный аппарат. Научные понятия — это та база, на которой строится каждая наука. Понятия — узловые, опорные пункты как научного, так и учебного познания, логические ступени движения в учебе от простого к сложному, от явления к сущности. Без ясного понимания понятий учеба крайне затрудняется, а содержание приобретенных знаний становится тусклым, расплывчатым.

Студент должен понимать, что самостоятельное овладение знаниями является главным, определяющим. Высшая школа создает для этого необходимые условия, помогает будущему высококвалифицированному специалисту овладеть технологией самостоятельного производства знаний.

В самостоятельной работе студентам приходится использовать литературу различных видов: первоисточники, монографии, научные сборники, хрестоматии, учебники, учебные пособия, журналы и др. Изучение курса предполагает знакомство студентов с большим объемом научной и учебной литературы, что, в свою очередь, порождает необходимость выработки у них рационально-критического подхода к изучаемым источникам.

Чтобы не «утонуть» в огромном объеме рекомендованных ему для изучения источников, студент, прежде всего, должен научиться правильно их читать. Правильное чтение рекомендованных источников предполагает следование нескольким несложным, но весьма полезным правилам.

Предварительный просмотр книги включает ознакомление с титульным листом книги, аннотацией, предисловием, оглавлением. При ознакомлении с оглавлением необ-

ходимо выделить разделы, главы, параграфы, представляющие для вас интерес, бегло их просмотреть, найти места, относящиеся к теме (абзацы, страницы, параграфы), и познакомиться с ними в общих чертах.

Научные издания сопровождаются различными вспомогательными материалами — научным аппаратом, поэтому важно знать, из каких основных элементов он состоит, каковы его функции.

Знакомство с книгой лучше всего начинать с изучения аннотации — краткой характеристики книги, раскрывающей ее содержание, идейную, тематическую и жанровую направленность, сведения об авторе, назначение и другие особенности. Аннотация помогает составить предварительное мнение о книге.

Глубже понять содержание книги позволяют вступительная статья, в которой дается оценка содержания книги, затрагиваемой в ней проблематики, содержится информация о жизненной и творческой биографии автора, высказываются полемические замечания, разъясняются отдельные положения книги, даются комментарии и т.д. Вот почему знакомство с вступительной статьей представляется очень важным: оно помогает студенту сориентироваться в тексте работы, обратить внимание на ее наиболее ценные и важные разделы.

Той же цели содействует знакомство с оглавлением, предисловием, послесловием. Весьма полезными элементами научного аппарата являются сноски, комментарии, таблицы, графики, списки литературы. Они не только иллюстрируют отдельные положения книги или статьи, но и сами по себе являются дополнительным источником информации для читателя.

Если читателя заинтересовала какая-то высказанная автором мысль, не нашедшая подробного освещения в данном источнике, он может обратиться к тексту источника, упоминаемого в сноске, либо к источнику, который он может найти в списке литературы, рекомендованной автором для самостоятельного изучения.

Существует несколько форм ведения записей:

— план (простой и развернутый) — наиболее краткая форма записи прочитанного, представляющая собой перечень вопросов, рассматриваемых в книге или статье. Развернутый план представляет собой более подробную запись прочитанного, с детализацией отдельных положений и выводов, с выпиской цитат, статистических данных и т.д. Развернутый план — неоценимый помощник при выступлении с докладом на конкретную тему на семинаре, конференции;

— тезисы — кратко сформулированные положения, основные положения книги, статьи. Как правило, тезисы составляются после предварительного знакомства с текстом источника, при его повторном прочтении. Они помогают запомнить и систематизировать информацию.

### **Составление конспектов**

Большую роль в усвоении и повторении пройденного материала играет хороший конспект, содержащий основные идеи прочитанного в учебнике и услышанного в лекции. Конспект — это, по существу, набросок, развернутый план связного рассказа по основным вопросам темы.

В какой-то мере конспект рассчитан (в зависимости от индивидуальных особенностей студента) не только на интеллектуальную и эмоциональную, но и на зрительную память, причем текст конспекта нередко ассоциируется еще и с текстом учебника или записью лекции. Поэтому легче запоминается содержание конспектов, написанных разборчиво, с подчеркиванием или выделением разрядкой ключевых слов и фраз.

Самостоятельно изученные темы предоставляются преподавателю в форме конспекта, по которому происходит собеседование. Теоретические темы курса (отдельные вопросы), выносимые на самостоятельное изучение, представлены ниже.

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА**

Курсовой проект - это самостоятельное исследование студентом определенной проблемы, комплекса взаимосвязанных вопросов, касающихся конкретной темы.

Выполнение курсового проекта начинается с получения варианта задания и темы.

Затем студент приходит на первую консультацию к руководителю, которая предусматривает:

- обсуждение цели и задач работы, основных моментов проекта;
- консультирование по вопросам подбора литературы;
- составление предварительного плана;
- составление графика выполнения курсового проекта.

Следующим этапом является работа с литературой. Необходимая литература подбирается студентом самостоятельно.

После подбора литературы целесообразно сделать рабочий вариант плана работы. В нем нужно выделить основные вопросы темы и параграфы, раскрывающие их содержание.

Составленный список литературы и предварительный вариант плана уточняются, согласуются на очередной консультации с руководителем.

Затем начинается следующий этап работы - изучение литературы. Только внимательно читая и конспектируя литературу, можно разобраться в основных вопросах темы и подготовиться к самостоятельному (авторскому) изложению содержания курсового проекта.

Систематизация и анализ изученной литературы позволяют студенту написать первую (теоретическую) часть.

Далее в соответствии с методикой выполнения курсового проекта производятся связанные с проектированием электрических сетей: выбор рационального варианта схемы сети и параметров линий электропередачи и понижающих подстанций для электроснабжения трех пунктов потребления электроэнергии; анализ характерных установившихся режимов работы спроектированной сети; определение основных технико-экономических показателей спроектированной сети.

Рабочий вариант текста курсового проекта и графический материал предоставляется руководителю на проверку. На основе рабочего варианта текста руководитель вместе со студентом обсуждает возможности доработки текста, его оформление.

После доработки курсовой проект сдается на кафедру для ее оценивания руководителем.

Защита курсового проекта студентов проходит в сроки, установленные графиком учебного процесса.

Основные этапы работы и требования к оформлению и защите отражены в методических указаниях по выполнению курсового проекта.

### **Вопросы для собеседования**

Вопросы по разделу: «Характеристики и параметры элементов электроэнергетической системы»

1. Какой схемой замещения представляется линия электропередачи, двухобмоточный трансформатор, трехобмоточный трансформатор?
2. Чем отличается схема замещения воздушной и кабельной линии, воздушной линии 110 кВ и выше от воздушной линии 35 кВ, 10 кВ, 6 кВ, 0,38 кВ?
3. Как изменится активное сопротивление линии при повышении температуры окружающей среды?

4. Какое реактивное (индуктивное) сопротивление линии предпочтительнее – большее или меньшее, и почему?
5. Какое влияние на работу линии электропередачи оказывает ее реактивная проводимость (зарядная мощность)?
6. Какое соотношение между активным и реактивным сопротивлениями в воздушной и кабельной линиях?
7. Какие используют условные изображения двух-, трехобмоточных силовых трансформаторов и автотрансформаторов?
8. Как обозначаются типы силовых трансформаторов? Как расшифровываются буквы в обозначениях типов трансформаторов и автотрансформаторов?
9. Что относится к паспортным (каталожным) данным двухобмоточных трансформаторов?
10. Какими схемами замещения моделируется двухобмоточный трансформатор?
11. Чем отличаются каталожные данные для двух- и трехобмоточных трансформаторов?
12. В чем состоит особенность расчета сопротивлений для трехобмоточного трансформатора по сравнению с двухобмоточным?
13. Какими конструктивными параметрами линии можно влиять на величину ее реактивного сопротивления?
14. Какими конструктивными параметрами воздушной линии можно влиять на величину ее реактивной проводимости?

#### Вопросы по разделу: «Анализ режимов работы электрических сетей»

1. Что понимается под временем использования наибольшей полной, активной и реактивной мощностей?
2. Что понимается под временем наибольших потерь полной, активной и реактивной мощностей?
3. Как определить среднеквадратичные ток и мощность?
4. Какова физическая природа потерь активной и реактивной мощности в линиях и трансформаторах?
5. Как определить КПД линии электропередачи?
6. Будут ли иметь место потери реактивной мощности в линии при передаче по ней только активной мощности? Почему?
7. Будут ли иметь место потери активной мощности при передаче по ней только реактивной мощности? Почему?
8. Будут ли в линии электропередачи потери активной мощности, если она включена с одной стороны, а с другой стороны - разомкнута? Почему?
9. Каково может быть наибольшее значение времени использования наибольшей нагрузки и наибольшее значение времени потерь?
10. От чего зависит соотношение нагрузочных потерь активной и реактивной мощностей в линиях электропередачи?
11. Как изменятся потери активной мощности при неизменной нагрузке потребителя, если к питающему ее трансформатору подключить параллельно второй трансформатор с такими же параметрами?

#### Вопросы по разделу «Расчёты режимов электрических сетей»

1. Каковы задачи электрического расчета электрической сети?
2. Что понимают под падением напряжения и потерей напряжения?
3. Как определить продольную и поперечную составляющие падения напряжения?
4. При расчете каких сетей можно пренебречь потерями мощности на корону?
5. При каких исходных условиях и как производят расчет режима линии электропередачи в два этапа?

6. При расчете каких сетей можно пренебречь зарядной мощностью линий?
7. Что представляет собой полная П-образная схема замещения линии?
8. Какая схема замещения трансформаторов напряжением 110, 220 кВ используется при расчете режимов сети?
9. Как осуществляется приведение нагрузок к стороне высшего напряжения трансформаторов?
10. В какой из линий, воздушной или кабельной, при одинаковом сечении, номинальном напряжении и передаваемой мощности будут меньше потери активной и реактивной мощности?
11. Какие методы чаще всего используют для расчета установившихся режимов простейших сетей?
12. Как влияют данные о нагрузке и напряжениях в узлах на последовательность расчета режима разомкнутой сети?
13. Какова последовательность расчета режима разомкнутой сети при задании напряжения в ее конечном узле?
14. В чем сущность метода расчета режима разомкнутой сети "в два этапа"?
15. Какое допущение принимается при расчете режима разомкнутой сети на первом этапе?
16. Каким образом учитываются поперечные ветви при расчете режима разомкнутой сети?
17. Какие сети называются замкнутыми? Назовите виды замкнутых сетей. В чем их преимущество?
18. Что понимают под расчетной нагрузкой узла замкнутой сети?
19. Как определить КПД линии электропередачи при задании нагрузки в ее начале и в конце?
20. Как будет выглядеть векторная диаграмма линии электропередачи, если в конце линии подключена чисто активная нагрузка?
21. Как будет выглядеть векторная диаграмма линии электропередачи, если в конце линии подключена активно-индуктивная нагрузка?
22. Как будет выглядеть векторная диаграмма линии электропередачи, если в конце линии подключена чисто емкостная нагрузка?
23. На каких условиях основано выражение для расчета распределения мощностей в линии с двусторонним питанием? Запишите это выражение в общем виде.
24. В каких случаях в линии с двусторонним питанием появляется уравнивающая мощность?
25. Может ли в сети с двусторонним питанием поток реактивной мощности быть направлен навстречу потоку активной мощности?
26. Что такое точка потоко раздела и как она выбирается?
27. Каковы особенности правила моментов для однородной сети?
28. Как уточнить потокораспределение с учетом потерь мощности?
29. Как выполняется расчет режима линии с двусторонним питанием, если точки потоко-раздела по активной и реактивной мощностям не совпадают?
30. Как проверить правильность расчета токов в линии с двусторонним питанием?

Вопросы по разделу: Проектирование электрических сетей питающих энергосистем

1. Какие параметры являются решающими при выборе номинального напряжения линии?
2. Что представляют собой экономические области номинальных напряжений?
3. Каков физический смысл экономической плотности тока?
4. Исходя из какого режима выбирают сечения по экономической плотности тока: режима наибольших нагрузок, наименьших нагрузок, послеаварийных режимов? Почему?
5. В каких координатах строятся экономические интервалы нагрузок?
6. Почему и как экономическая плотность тока зависит от времени использования наибольшей нагрузки?

10. Какие дополнительные условия применяются при выборе проводников по допустимой потере напряжения? Каковы области их использования?
11. В чем особенности выбора сечений проводов по допустимой потере напряжения в разветвленных сетях?
7. Для каких режимов производится проверка сечений проводов по нагреву? Почему?
8. Для каких сетей сечение провода выбирают по допустимой потере напряжения? Почему?
9. Какова последовательность выбора проводников линий по допустимой потере напряжения?
12. Какова зависимость индуктивного сопротивления проводов от их сечения?
13. Какие наименьшие сечения алюминиевых и сталеалюминевых проводов допускаются по условию механической прочности для линий напряжением выше 1 кВ?
14. От чего зависит допустимый ток по нагреву линий электропередачи?
15. Чем обусловлено ограничение наименьших допустимых сечений проводов линий напряжения 110 кВ и выше?
16. Какому условию должны удовлетворять провода воздушных линий с учетом возможности появления короны?

Вопросы по разделу: Качество электроэнергии и его регулирование

1. Какие средства регулирования напряжения используют в распределительных сетях?
2. В чем различие трансформаторов с РПН и без РПН?
3. В чем заключается принцип встречного регулирования напряжения?
4. Какая информация необходима для выбора ответвлений двухобмоточных и трехобмоточных трансформаторов с РПН?
5. Как влияет установка компенсирующих устройств на потери мощности, потери напряжения?
6. Какими путями можно устранить в сети избыток реактивной мощности в сети?
7. Какие компенсирующие устройства могут работать как в режиме выдачи, так и в режиме потребления реактивной мощности?
8. В чем заключаются особенности конструкции устройства регулирования напряжения с РПН по сравнению с устройством без РПН?
9. Какое влияние оказывают режимы напряжений на потери активной мощности в элементах электрической сети?
10. Почему устройства РПН устанавливают преимущественно на стороне высшего напряжения трансформатора?
11. Каковы причины отклонения напряжения от номинального значения?

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПОДГОТОВКЕ К ЭКЗАМЕНУ**

Изучение дисциплины «Электроэнергетические системы и сети» завершается экзаменом. Подготовка к экзамену способствует закреплению, углублению и обобщению знаний, получаемых, в процессе обучения, а также применению их к решению практических задач. Готовясь к экзамену, студент ликвидирует имеющиеся пробелы в знаниях, углубляет, систематизирует и упорядочивает свои знания. На экзамене студент демонстрирует то, что он приобрел в процессе обучения по конкретной учебной дисциплине.

На консультации перед экзаменом студентов познакомят с основными требованиями, ответят на возникшие у них вопросы. Поэтому посещение консультаций обязательно.

При подготовке к экзамену необходимо использовать конспекты лекций по дисциплине, учебники и учебные пособия (из списка основной и дополнительной литературы) или конспект литературы, прочитанной по указанию преподавателя в течение семестра.

Вначале следует просмотреть весь материал по сдаваемой дисциплине, отметить для себя трудные вопросы. Обязательно в них разобраться. В заключение еще раз целесообразно повторить основные положения.

Систематическая подготовка к занятиям в течение семестра позволит использовать время экзаменационной сессии для систематизации знаний.

### **Вопросы к экзамену**

#### **Знать:**

1. Технологическая схема производства электроэнергии. Энергетическая и электрическая системы.
2. Электрические сети и их классификация. Системообразующие, питающие, распределительные сети. Виды электроустановок и их номинальные данные.
3. Элементы конструкции электрических сетей. Конструкция воздушных линий, основные виды опор, стандарты на провода, расщепление проводов. Конструкция кабельных линий.
4. Графики нагрузок узлов электрической сети. Типовые графики.
5. Суточный и годовые графики. Характеристики графиков нагрузок.
6. Падение и потеря напряжения. Векторные диаграммы токов и напряжений участка сети.

#### **Уметь:**

#### **Владеть:**

1. Схемы замещения воздушных линий. Определение параметров схем замещения воздушных линий.
2. Схемы замещения кабельных линий. Определение параметров схем замещения кабельных линий.
3. Схемы замещения двухобмоточных трансформаторов. Определение параметров схем замещения.
4. Схемы замещения трехобмоточных трансформаторов. Определение параметров схем замещения.
5. Схемы замещения и особенности работы автотрансформаторов. Параметры схемы замещения.
6. Однородная сеть. Правило моментов для однородной сети. Свойства однородной сети.
7. Правило моментов в токах и мощностях для однородной сети и область применения.
8. Представление источников и нагрузок при расчетах установившихся режимов электрических сетей. Статические характеристики нагрузок.
9. Потери мощности и энергии в элементах электрических сетей. Точные и приближенные методы расчета потерь электроэнергии в сети с одним и несколькими нагрузочными узлами.
10. Методы преобразования сети. Объединение концевых источников питания.
11. Метод контурных уравнений и его использование для расчета сложнзамкнутых сетей.
12. Метод уравнений узловых напряжений и его использование для расчета сложнзамкнутых сетей.
13. Метод коэффициентов токораспределения и потокораспределения. Его использование для расчета сложнзамкнутых сетей.
14. Сопоставление методов расчета сложнзамкнутых сетей. Области применения, особенности отдельных методов, их достоинства и недостатки.

## Вопросы к экзамену 6 семестр

### Знать:

1. Принципы разработки вариантов. Балансы мощностей.
2. Этапы проектирования электрической сети.
3. Балансы мощности и энергии в электроэнергетических системах. Связь балансов мощностей с параметрами качества.
4. Способы и средства регулирования напряжения. Местное и централизованное регулирование напряжения.
5. Местное и централизованное регулирование напряжения. Проверка допустимости централизованного регулирования.
6. Регулирование напряжения с помощью компенсирующих устройств. Виды компенсирующих устройств, регулирование их мощности.
7. Критерии экономической эффективности вариантов развития сети.

### Уметь:

### Владеть:

1. Электрический расчет в токах разомкнутой сети с числом узлов нагрузок не менее двух.
2. Электрический расчет в мощностях разомкнутой сети с числом узлов нагрузок не менее двух.
3. Электрический расчет сети при задании нагрузок статическими характеристиками.
4. Электрический расчет сети с двухсторонним питанием при равных напряжениях по концам передачи в токах. Правило моментов в токах. Векторные диаграммы токов и напряжений участка сети.
5. Электрический расчет сети с двухсторонним питанием при равных напряжениях по концам передачи в мощностях. Правило моментов в мощностях. Векторные диаграммы токов и напряжений.
6. Электрический расчет сети с двухсторонним питанием при разных напряжениях по концам передачи. Векторные диаграммы токов и напряжений сети с двухсторонним питанием.
7. Экономическое распределение нагрузок между разнотипными агрегатами электростанции
8. Способы и средства регулирования напряжения. Устройства РПН и ПБВ Регулирование напряжения с помощью РПН на трансформаторах.
9. Способы и средства регулирования напряжения. Регулирование напряжения с помощью компенсирующих устройств. Выбор мощности компенсирующих устройств по критерию качества.
10. Способы и средства регулирования напряжения. Регулирование напряжения изменением параметров сети. Продольная и поперечная компенсация параметров сети.
11. Способы и средства регулирования напряжения. Продольное и поперечное регулирование. Линейные регуляторы и вольтодобавочные трансформаторы.
12. Способы и средства регулирования напряжения. Сопоставление методов и средств регулирования напряжения по техническим и экономическим показателям.
13. Методы минимизации функции затрат при условиях связи и режимных ограничениях
14. Минимизация потерь активной мощности. Определение оптимальной загрузки источников реактивной мощности из условия минимума потерь
15. Метод экономических интервалов и его использование для выбора сечений линий электропередачи. Достоинства и недостатки метода.

16. Метод экономической плотности тока и его использование для выбора сечений линий электропередачи. Достоинства и недостатки метода.
17. Особенности выбора сечений в кольцевых и разомкнутых сетях.
18. Условия и методы проверки сечений проектируемых и существующих ЛЭП по допустимому току.
19. Выбор номинального напряжения сети.
20. Техничко-экономическое сопоставление вариантов развития сети

### ***Критерии оценивания компетенций***

Оценка «отлично» выставляется студенту, если он знает характеристики электрических систем и сетей; конструктивное выполнение элементов электрических сетей; характеристики и параметры элементов электроэнергетической системы; качество электроэнергии и его регулирование; экономичные режимы работы электроэнергетических систем. Умеет проводить анализ режимов работы электрических сетей; расчёты режимов электрических сетей; проектирование электрических сетей питающих энергосистем.

При проведении экзамена студент показал наличие достаточных знаний по изучаемой проблематике; умение ориентироваться в информационном пространстве; использование и усвоение основной и знакомство с дополнительной литературой; грамотное изложение материала при ответе; попытки аргументировать собственную точку.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он знает характеристики электрических систем и сетей; конструктивное выполнение элементов электрических сетей; характеристики и параметры элементов электроэнергетической системы; качество электроэнергии и его регулирование; экономичные режимы работы электроэнергетических систем. Умеет проводить анализ режимов работы электрических сетей; расчёты режимов электрических сетей; проектирование электрических сетей питающих энергосистем. При проведении экзамена студент показал наличие достаточных знаний по изучаемой проблематике; умение ориентироваться в информационном пространстве; использование и усвоение основной литературы; грамотное изложение материала при ответе.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он демонстрирует низкий уровень знаний характеристик электрических систем и сетей; конструктивного выполнения элементов электрических сетей; характеристик и параметров элементов электроэнергетической системы; качества электроэнергии и его регулирования; экономичных режимов работы электроэнергетических систем. Умеет с трудом проводить анализ режимов работы электрических сетей; расчёты режимов электрических сетей; проектирование электрических сетей питающих энергосистем. При проведении экзамена студент показал наличие поверхностных знаний по изучаемой проблематике; умение ориентироваться в информационном пространстве; использование и усвоение основной литературы; грамотное изложение материала при ответе с отдельными недочётами и ошибками; отсутствие умения в полной мере аргументировать собственную точку.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если он не знает характеристики электрических систем и сетей; конструктивное выполнение элементов электрических сетей; характеристики и параметры элементов электроэнергетической системы; качество электроэнергии и его регулирование; экономичные режимы работы электроэнергетических систем. Не умеет проводить анализ режимов работы электрических сетей; расчёты режимов электрических сетей; проектирование электрических сетей питающих энергосистем.

### **СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

#### **Перечень основной литературы:**

17. Кобелев А.В. Режимы работы электроэнергетических систем [Электронный ресурс] : учебное пособие для бакалавров и магистров направления «Электроэнергетика» / А.В. Кобелев, С.В. Кочергин, Е.А. Печагин. — Электрон. текстовые данные. — Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2015. — 80 с. — 978-5-8265-1411-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/64564.html>

18. Ананичева, С. С. Анализ электроэнергетических сетей и систем в примерах и задачах : учебное пособие / С. С. Ананичева, С. Н. Шелюг. — Екатеринбург : Уральский федеральный университет, ЭБС АСВ, 2016. — 176 с. — ISBN 978-5-7996-1784-4. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/65910.html>

19. Моделирование в электроэнергетике [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.Ф. Шаталов [и др.]. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь: Ставропольский государственный аграрный университет, АГРУС, 2014. — 140 с. — 978-5-9596-1059-3. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/47317.html>

20. Короткевич, М. А. Эксплуатация электрических сетей : учебник / М. А. Короткевич. — Минск : Вышэйшая школа, 2014. — 351 с. — ISBN 978-985-06-2397-3. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/35574.html>

#### **Перечень дополнительной литературы:**

7. Фадеева, Г. А. Проектирование распределительных электрических сетей : учебное пособие / Г. А. Фадеева, В. Т. Федин ; под редакцией В. Т. Федина. — Минск : Вышэйшая школа, 2009. — 365 с. — ISBN 978-985-06-1597-8. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/20124.html>

8. Русина, А. Г. Балансы мощности и выработки электроэнергии в электроэнергетической системе : учебно-методическое пособие / А. Г. Русина, Т. А. Филиппова. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2012. — 55 с. — ISBN 978-5-7782-1935-9. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/45078.html>.

#### **Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины**

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"

2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks

3. <http://e.lanbooks.com> - Электронно-библиотечная система Лань

4. <http://docs.cntd.ru/> Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации ТЕХЭКСПЕРТ

21. Профессиональные справочные системы Техэксперт <http://vuz.kodeks.ru/>