

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное бюджетное государственное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Оренбургский государственный университет»

В.М. Нелюбов

# **ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ**

Практикум

Рекомендовано ученым советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Оренбург  
2019

ББК 621.311(075.8)

УДК 31.27я73

Н 49

Рецензент – доцент, кандидат технических наук В.Б. Шлейников

Нелюбов, В.М.

Н 49 Электроэнергетические системы и сети [Электронный ресурс] : практикум для обучающихся по образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника / В. М. Нелюбов; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования "Оренбург. гос. ун-т". - Оренбург : ОГУ. - 2019. - 101 с. - Загл. с тит. экрана.  
ISBN 978-5-7410-2447-8

Практикум содержит описание и методики выполнения лабораторных работ по дисциплине «Электроэнергетические системы и сети». Материал позволяет формировать обучающимся элементы профессиональных компетенций по базовым вопросам дисциплины.

Издание предназначено для выполнения лабораторных работ обучающимися по образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

ББК 621.311 (075.8)

УДК 31.27я73

ISBN 978-5-7410-2447-8

© Нелюбов В.М., 2019

© ОГУ, 2019

## Содержание

Введение.....	4
Лабораторная работа 1. Снятие статических характеристик нагрузки по напряжению .....	5
Лабораторная работа 2. Применение пакета программ.....	16
"RASTR" для расчета и анализа установившегося режима электрических сетей.....	16
Лабораторная работа 3. Организация экономичного режима работы двухтрансформаторных подстанций.....	30
Лабораторная работа 4. Компенсация реактивной мощности.....	37
Лабораторная работа 5. Исследование зависимости потерь мощности в сети от уровня напряжения в центре питания .....	48
Лабораторная работа 6. Определение потерь электроэнергии.....	53
Лабораторная работа 7. Уменьшение потерь активной мощности в распределительной электрической сети с односторонним питанием путем продольной компенсации реактивной мощности нагрузки.....	63
Лабораторная работа 8. Оценка влияния разницы напряжений на шинах центров питания на потери активной мощности в местной распределительной электрической сети, выполненной по петлевой (кольцевой) схеме, при ее работе в замкнутом режиме .....	67
Лабораторная работа 9. Оценка влияния места разрыва (разреза) местной распределительной электрической сети, выполненной по петлевой схеме, на потерю в ней активной мощности.....	72
Список рекомендуемой литературы.....	79
Приложение А Варианты заданий к лабораторной работе	80
Приложение Б Справочные данные .....	83
Приложение В Исходные данные.....	85
Приложение Г Варианты заданий .....	87
Приложение Д Правила техники безопасности .....	92
Приложение Е Требования к оформлению отчета .....	93
Приложение Ж Описание электрооборудования, применяемого в лабораторных работах.....	94

## Введение

Целью практикума является формирование элементов профессиональных компетенций, предусмотренных ФГОС ВО по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», навыков обобщения, анализа и восприятия информации, теоретического и экспериментального исследования.

Данные лабораторные работы предусматривает использование в качестве лабораторного оборудования персональных компьютеров, с установленным программным обеспечением (Пакет программ RASTR для расчета и анализа установившихся режимов электрических сетей) и стендов разработанных ООО «ИПЦ «Учебная техника», представляющих собой унифицированные модули, монтируемые в раме настольного исполнения. Для каждой лабораторной работы приведена электрическая схема, собираемая на базе указанных стендов и методика выполнения эксперимента. Лабораторные работы ориентированы на закрепление материала лекционных занятий.

Выполнение лабораторной работы предполагается бригадой, состоящей из двух или трех обучающихся. Распределение обязанностей между членами бригады выполняется обучающимися самостоятельно под контролем преподавателя. Каждый член бригады несет персональную ответственность за соблюдение правил техники безопасности, приведенных в приложении Б.

Требования к оформлению отчета приведены в приложении В.

## **Лабораторная работа 1. Снятие статических характеристик нагрузки по напряжению**

**Цель работы:** получить навыки снятия статических характеристик нагрузок по напряжению с помощью электроизмерительных приборов. Освоить методику обработки снятых характеристик для получения их аналитического описания в среде MS Excel.

### **Модели электрических нагрузок**

При расчете установившихся режимов электрических сетей используются следующие модели нагрузок:

#### **1) Модель постоянной мощности**

Нагрузка представляется постоянной по величине мощности, не зависящей от напряжения

$$S_H = P_H + j \cdot Q_H = const \quad (1.1)$$

где  $P_H$  - номинальная активная мощность;

$Q_H$  - номинальная реактивная мощность.

$P_H$  и  $Q_H$  могут быть приняты равной соответствующей активной и реактивной номинальной или расчетной (максимальной) мощности электропотребителя.

Такая модель наиболее адекватна для расчета питающих сетей, оснащенных устройствами глубокого регулирования (стабилизации) напряжения, в частности питающих сетей энергосистем.

#### **2) Модель постоянного тока**

Нагрузка представляется постоянным по величине током, не зависящим от напряжения в точке ее приложения

$$I_{\text{H}} = I'_{\text{H}} + j \cdot I''_{\text{H}} = \text{const} \quad (1.2)$$

где  $I'_{\text{H}}$  - активная составляющая тока;

$I''_{\text{H}}$  - реактивная составляющая тока.

Составляющие полного тока определяются по номинальному напряжению -  $U_{\text{H}}$ .

$$I'_{\text{H}} = \frac{P_{\text{H}}}{U_{\text{H}}} \quad (1.3)$$

$$I''_{\text{H}} = \frac{Q_{\text{H}}}{U_{\text{H}}} \quad (1.4)$$

Такая модель используется при расчете низковольтных сетей. Преимущество данной модели состоит в линейности уравнений установившегося режима при таком способе задания нагрузок.

### 3) Модель постоянной проводимости

Нагрузка задается комплексной проводимостью (шунтом)

$$\underline{Y}_{\text{H}} = G_{\text{H}} + j \cdot B_{\text{H}} = \text{const} \quad (1.5)$$

где  $G_{\text{H}}$  - активная проводимость,

$$G_{\text{H}} = \frac{P_{\text{H}}}{U_{\text{H}}^2} \quad (1.6)$$

$B_{\text{H}}$  - реактивная проводимость

$$B_{\text{H}} = \frac{Q_{\text{H}}}{U_{\text{H}}^2} \quad (1.7)$$

Такая модель используется при расчете электромеханических переходных процессов, в частности при расчете пуска и самозапуска электродвигателей.

#### 4) *Представление нагрузки статическими характеристиками по напряжению*

Статическими характеристиками нагрузки по напряжению называются зависимости потребляемой активной и реактивной мощности нагрузки от напряжения:

$$\begin{cases} P = f_1(U) \\ Q = f_2(U) \end{cases} \quad (1.8)$$

Моделирование электрических нагрузок статическими характеристиками по напряжению в расчетах установившихся режимов является наиболее адекватным представлением реальных потребителей электрической энергии, и используется для расчета особых режимов работы сетей, например предельных по статической устойчивости.

В расчетах режимов электрических сетей на ЭВМ при постоянстве частоты статические характеристики нагрузки по напряжению моделируются полиномами второй степени вида:

$$\begin{cases} P = P_n \cdot \left( p_0 + p_1 \cdot \frac{U}{U_n} + p_2 \cdot \left( \frac{U}{U_n} \right)^2 \right)^2 \\ Q = Q_n \cdot \left( q_0 + q_1 \cdot \frac{U}{U_n} + q_2 \cdot \left( \frac{U}{U_n} \right)^2 \right)^2 \end{cases} \quad (1.9)$$

где  $p_0, p_1, p_2, q_0, q_1, q_2$  - коэффициенты полиномов (моделей).

Такое представление статических характеристик нагрузок по напряжению оказалось очень удобным при расчете установившихся режимов электрических сетей на ЭВМ, поскольку изменяя численные значения коэффициентов полиномов можно получить вышеописанные модели. Действительно, если взять  $p_0=1$  и  $q_0=1$ , а

остальные коэффициенты  $p_1=p_2=q_1=q_2=0$ , то получаем модель постоянной мощности. Если взять  $p_1=1$  и  $q_1=1$ , а остальные коэффициенты  $p_0=p_2=q_0=q_2=0$ , то получаем модель нагрузки постоянного тока. Если взять  $p_2=1$  и  $q_2=1$ , а остальные коэффициенты  $p_0=p_1=q_0=q_1=0$ , то получаем модель постоянной проводимости.

Для получения статических характеристик для конкретных узлов нагрузки проводятся экспериментальные исследования. После обработки этих исследований определяют коэффициенты полиномов. Статические характеристики нагрузки по напряжению с заданными коэффициентами называются типовыми. Эти характеристики приведены в справочной литературы. Статические характеристики нагрузки существенно зависят от состава комплексной нагрузки, - соотношения в ней нагрузки с электронагревом, осветительной, двигательной и т.д.

Для снятия статических характеристик по напряжению в лабораторной установке используется схема (рисунок 1.1)

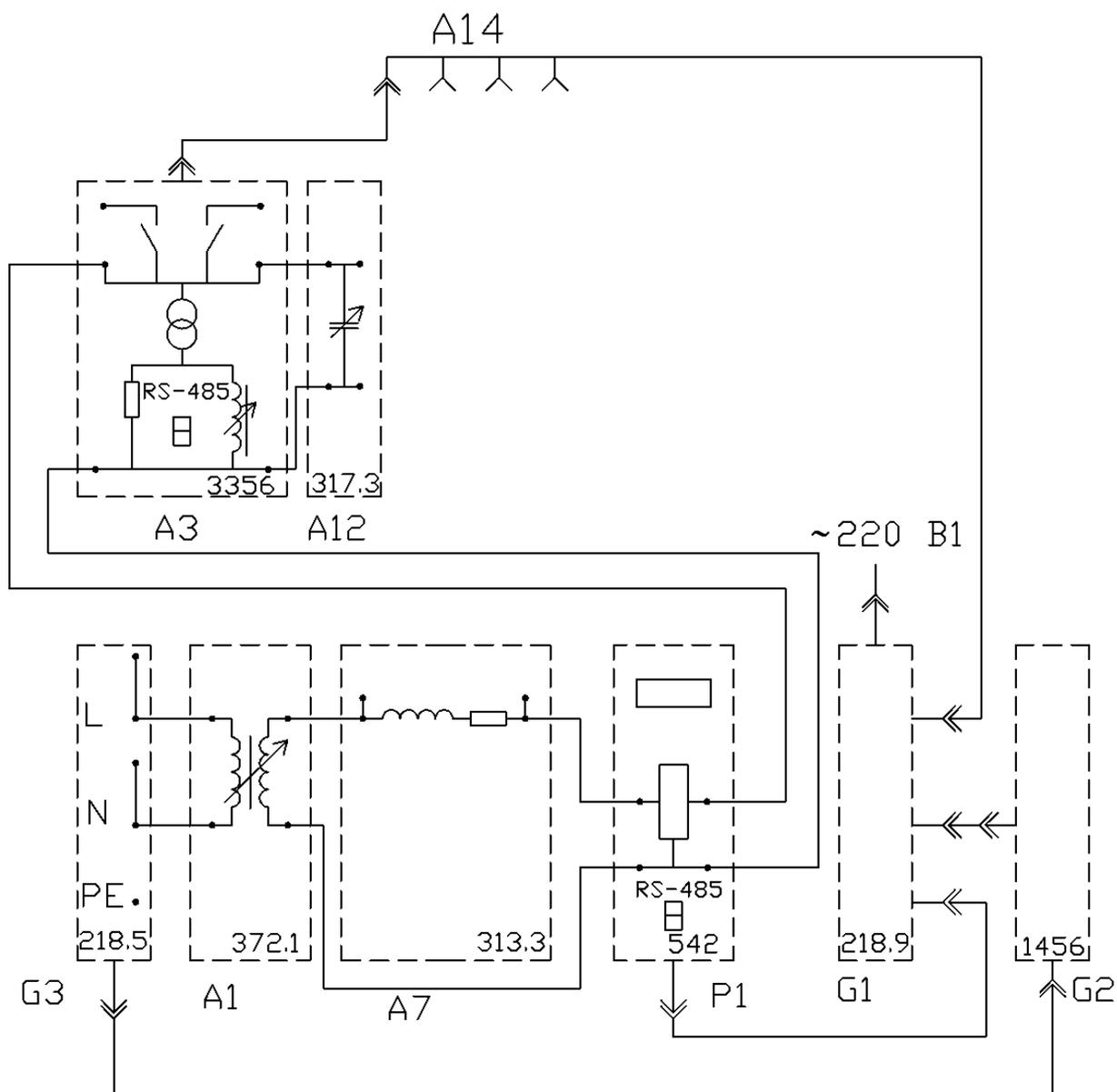


Рисунок 1.1 - Схема для снятия статической характеристики нагрузки по напряжению

Перечень используемой аппаратуры в эксперименте приведено в таблице 1.1

Таблица 1.1

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218.9	~ 220 В 16 А
G2	Источник бесперебойного питания	1456	1000 ВА ~ 230 В
G3	Однофазный источник питания	218.5	~ 220 В 10 А
A1	Однофазный трансформатор	372.1	80 ВА 220/198 242 В
A3	Модель трансформаторной подстанции и нагрузки	3356	~ 220 В 0...20 Вт 0...20 ВАр
A7	Модель линии электропередачи	313.3	~ 220 В 0,3 А
A12	Емкостная нагрузка	317.3	~ 220 В 0...30 ВАр
A14	Удлинитель переносной четырехместный	-	~ 220 В 16 А
P1	Измеритель параметров однофазной сети	542	0...500 В 0...5 А 2500 ВА

Для сборки схемы убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

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

2 Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рисунке 1.1.

3 Установите переключателем желаемое значение коэффициента трансформации трансформатора A1, например, равным 1,0.

4 Установите переключателями параметры модели A7, линии электропередачи соответственно равными 50 Ом и 0,15 Гн.

5 Установите переключателями желаемые параметры нагрузок в модели A3, например, соответственно равными 10 Вт, 10 Вар.

6 Установите переключателями желаемую емкостную нагрузку  $A_{12}$ , например, 0 %.

Желаемые параметры по п.3-п.6 задаются преподавателем.

7 Включите источник  $G_1$ . О наличии напряжения на его выходе должна сигнализировать светящаяся индикаторная лампа.

8 Включите выключатели «СЕТЬ» измерителя параметров  $P_1$  и модели  $A_3$ .

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 Варьируя коэффициент трансформации трансформатора  $A_1$ , изменяйте напряжение  $U$  на нагрузке  $A_3$ ,  $A_{12}$  и заносите показания измерителя  $P_1$  (напряжение  $U$ , активную  $P$  и реактивную мощность  $Q$ , потребляемую нагрузкой) в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 - Экспериментальные данные

$U, В$										
$P, Вт$										
$Q, ВАр$										

По завершении эксперимента отключите однофазный источник питания  $G_3$ , источник бесперебойного питания  $G_2$ , выключатели «СЕТЬ» измерителя параметров  $P_1$  и модели  $A_3$ , однофазный источник питания  $G_1$ .

Используя данные таблицы 1.2, постройте искомые статические характеристики мощности нагрузки  $P(U)$  и  $Q(U)$ . Построение произведите в MS Excel.

После построения характеристик добавьте на них линии тренда. Для этого активизируйте поле диаграммы (щелчок левой кнопкой мыши) и выделите линию ряда (щелчок левой кнопкой мыши). Затем откройте контекстное меню линии ряда (щелчок правой кнопкой мыши) и выберите пункт **Добавить линию тренда**.

В результате выполненных действий откроется диалоговое окно **Формат линии тренда**, в котором можно задать тип линии тренда, выбрать имя для линии тренда и объем выводимой информации (Рисунок 1.2).

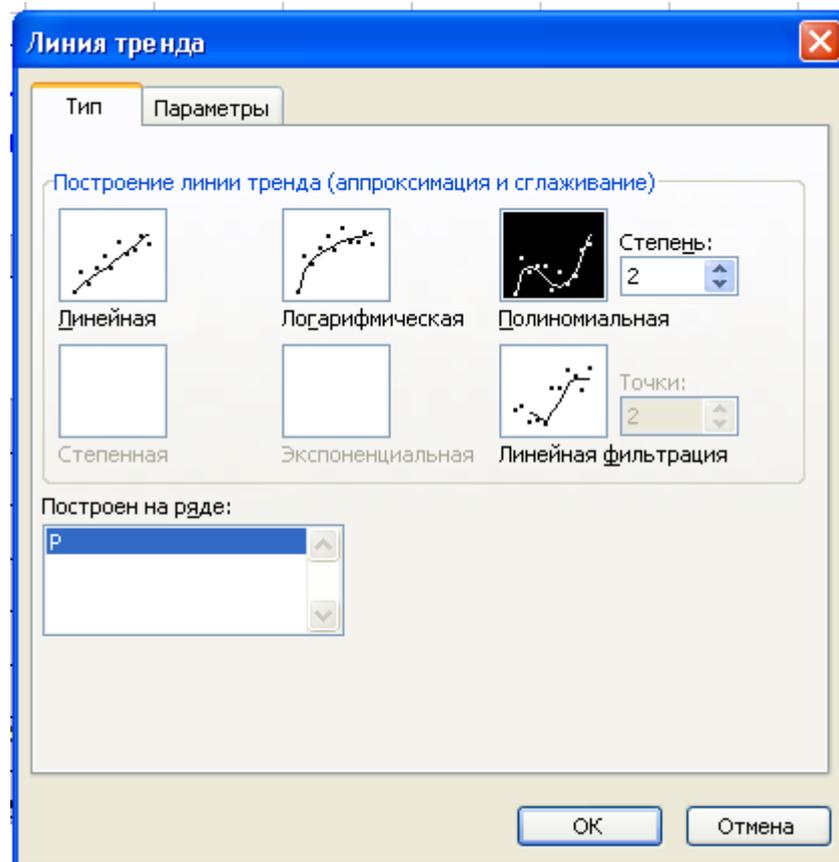


Рисунок 1.2

На вкладке **Тип** в блоке **Построение линии тренда (аппроксимация и сглаживание)** выберите тип линии тренда - **Полиномиальная** и установите в поле **Степень** величину равную **2**.

Перейдите на вкладку **Параметры** (рисунок 1.3).

С целью формирования математически обоснованных представлений о модели прогноза активизируйте пункты: **показывать уравнение на диаграмме** и **поместить на диаграмму величину достоверности аппроксимации ( $R^2$ , чем ближе величина  $R^2$  к единице, тем точнее произведена аппроксимация)**

В центральном блоке диалогового окна можно скорректировать название аппроксимирующей (сглаженной) кривой, отметив позицию **другое** и введя желаемое название.

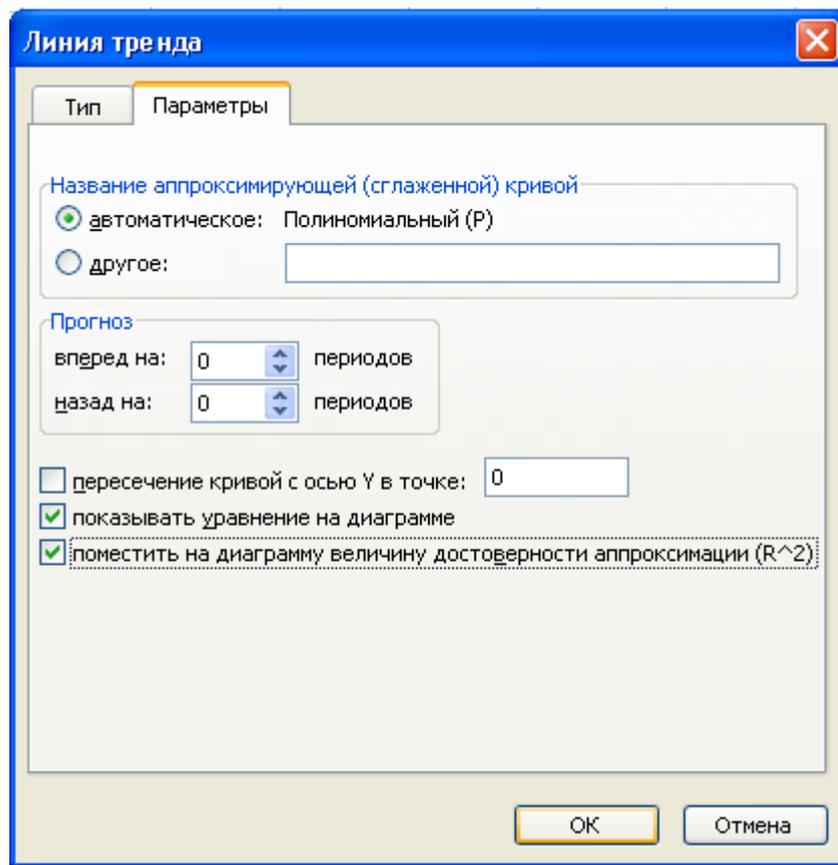


Рисунок 1.3

После нажатия на клавишу ОК на диаграмму будет нанесена аппроксимирующая линия, ее уравнение и величина  $R^2$ .

После выделения линии тренда (щелчок левой кнопкой мыши) можно выбрать пункт меню **Формат линии тренда** и открыть соответствующее диалоговое окно (рисунок 1.4).

С помощью его можно выбрать тип линии, цвет и ее толщину, а также перейти к уже рассматриваемым вкладкам **Тип** и **Параметры**.

Найдите регулирующие эффекты нагрузки по напряжению:

- регулирующий эффект нагрузки по активной мощности

$$\frac{dP}{dU}$$

- регулирующий эффект нагрузки по реактивной мощности

$$\frac{dQ}{dU}$$

Сделайте выводы по работе

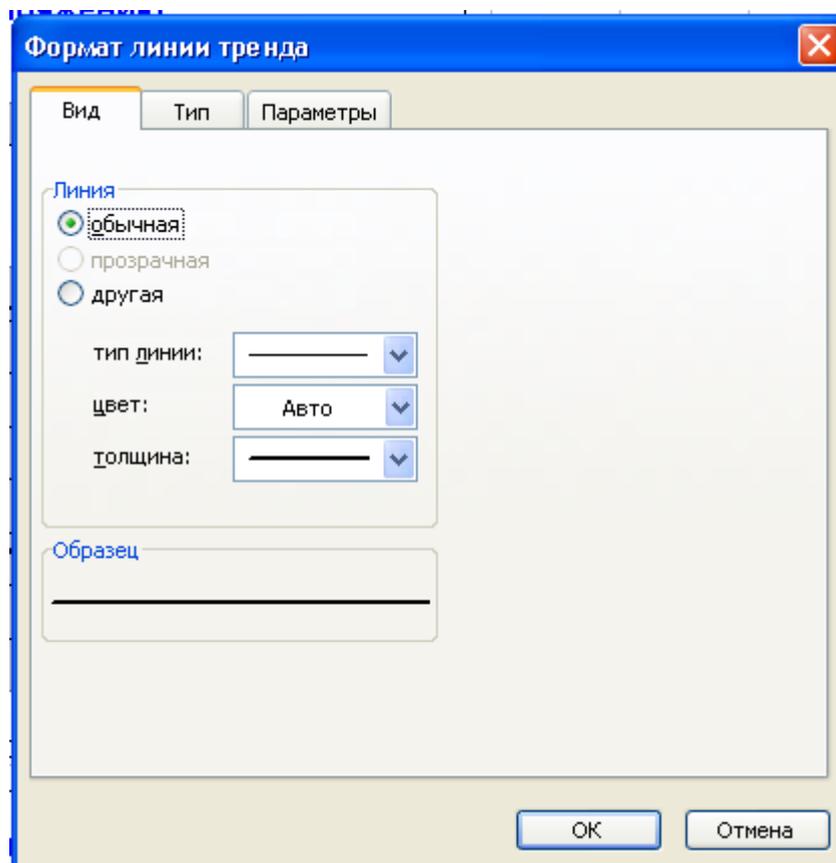


Рисунок 1.4

## **Вопросы для самоконтроля**

- 1 Какие модели нагрузок используются для расчета установившихся режимов работы сети и в каких случаях?
- 2 Что называется статическими характеристиками нагрузки по напряжению?
- 3 Что такое типовая статическая характеристика нагрузки по напряжению?
- 4 Чем определяется вид статических характеристик по напряжению узла промышленной нагрузки?
- 5 Какими моделями представляются статические характеристики нагрузки по напряжению?
- 6 Как определяются коэффициенты полиномов, по экспериментально снятым статическим характеристикам нагрузки по напряжению.
- 7 Что называется регулирующим эффектом нагрузки по напряжению.
- 8 Какая модель нагрузки используется для расчета сетей электрифицированного рельсового транспорта.

## **Лабораторная работа 2. Применение пакета программ "RASTR" для расчета и анализа установившегося режима электрических сетей**

### **Цель работы**

Целью работы является получения навыков применения пакета программ "RASTR" для расчета и анализа стационарных режимов работы электрических сетей.

### **Порядок выполнения работы**

Изобразите в отчете однолинейную схему сети (рисунок А1 из приложения А).

Выпишите исходные данные о параметрах элементов сети (таблица А.1, таблица А.2, приложения А). Номер варианта задания преподавателем.

Выберите схемы замещения элементов сети и изобразите в отчете полную схему замещения сети.

Примечания:

Источник питания представьте моделью источника бесконечной мощности с постоянным напряжением  $U_6=121 \text{ кВ} = \text{const}$ .

Нагрузку  $\tilde{S}_1 = P_1 + jQ_1$  задайте моделью постоянной мощности ( $\tilde{S} = \text{const}$ ), а нагрузки  $\tilde{S}_2 = P_2 + jQ_2$  и  $\tilde{S}_3 = P_3 + jQ_3$  типовыми статическими характеристиками по напряжению 10 кВ.

Считая загрузку обмоток трансформаторов с расщепленной обмоткой одинаковой, представьте такие трансформаторы Г-образной схемой замещения, аналогичной схеме замещения двухобмоточного трансформатора.

ЛЭП представьте П-образной схемой замещения без учета поперечных активных проводимостей.

Пронумеруйте узловые точки схемы замещения.

Рассчитайте параметры схемы замещения. Справочные данные по трансформаторам и линиям электропередачи приведены в приложении Б (таблица Б.1 и таблица Б.2).

## Расчет параметров схем замещения линий электропередачи (ЛЭП)

Схема замещения ЛЭП без учета поперечных активных проводимостей имеет вид (рисунок 2.1)

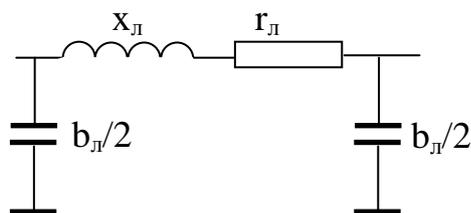


Рисунок 2.1

Параметры схемы замещения ЛЭП определяются по выражениям:

$$\begin{aligned}x_L &= x_o * l; \\ r_L &= r_o * l; \\ b_L &= b_o * l,\end{aligned}\tag{2.1}$$

где  $x_L$  - индуктивное сопротивление продольной ветви схемы замещения линии, Ом;

$x_o$  - погонное индуктивное сопротивление ЛЭП, Ом/км;

$r_L$  - активное сопротивление продольной ветви схемы замещения линии, Ом;

$r_o$  - погонное активное сопротивление ЛЭП, Ом/км;

$b_L$  - емкостная проводимость поперечной ветви схемы замещения линии, мкСм.

$b_o$  - погонная емкостная проводимость ЛЭП, мкСм/км;

$l$  - длина ЛЭП, км.

Параметры схемы замещения ЛЭП сведите в таблицу 2.1

Таблица 2.1 - Расчет параметров схем замещения ЛЭП

ЛЭП	Марка провода	Длина $l$ (км)	Погонные значения			Расчетные значения		
			$r_0$ , (Ом/км)	$x_0$ , (Ом/км)	$b_0$ , (мкСм/км)	$r_L$ , Ом	$x_L$ , Ом	$b_L$ , мкСм
1-2								
2-3								
3-4								
1-4								

### Расчет параметров схем замещения трансформаторов

Г-образная схема замещения двухобмоточного трансформатора имеет вид (Рисунок 2.2)

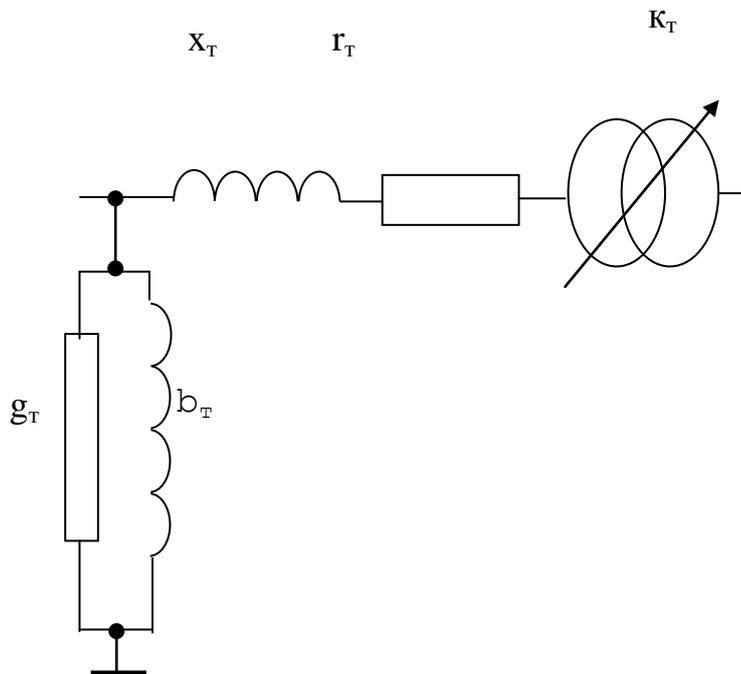


Рисунок 2.2

Параметры схемы замещения двухобмоточного трансформатора определяются по выражениям:

$$r_T = \frac{\Delta P_K U_H^2 \cdot 10^3}{S_H^2}; \quad (2.2)$$

$$x_T = \frac{U_K \% \cdot U_H^2 \cdot 10^3}{100 \cdot S_H}; \quad (2.3)$$

$$g_T = \frac{\Delta P_{XX} \cdot 10^3}{U_H^2}; \quad (2.4)$$

$$b_T = \frac{I_{XX} \% \cdot S_H \cdot 10^3}{100 \cdot U_H^2}, \quad (2.5)$$

где  $r_T$  и  $x_T$  - активное и индуктивное сопротивление продольной ветви схемы замещения трансформатора (Ом);

$g_T$  и  $b_T$  - активная и индуктивная проводимость ветви намагничивания схемы замещения трансформатора;

$S_H$  - номинальная мощность трансформатора (кВА) ;

$U_H$  - номинальное напряжение трансформатора (кВ) (в качестве  $U_H$  принимается  $U_{BH}$  – номинальное напряжение на стороне высшего напряжения, или  $U_{HH}$  - номинальное напряжение на стороне низшего напряжения трансформатора в зависимости от того к какой стороне приводятся параметры схемы замещения);

$U_K, \%$  - напряжение короткого замыкания трансформатора в процентах от номинального напряжения;

$\Delta P_K$  - активная мощность потерь короткого замыкания (кВт);

$\Delta P_{XX}$  - активная мощность потерь холостого хода (кВт);

$I_{XX} \%$  - ток холостого хода трансформатора в процентах от номинального тока.

Параметры схемы замещения трансформатора сведите в таблицу 4.

Примечание: Параметры схемы замещения трансформаторов привести к напряжению того узла, который при описании «ВЕТВЕЙ» будет начальным. Например, если ветвь с трансформаторами П/С 1 будет описана как 2-5, то

параметры схемы замещения следует привести к номинальному напряжению узла 2.2.

**Примечание:**

Трансформатор с расщепленной обмоткой задается в общем случае схемой замещения в виде трехлучевой звезды. Однако при расчете стационарных режимов он может быть представлен схемой замещения двухобмоточного трансформатора в двух случаях:

- 1) Обмотки НН трансформатора с расщепленной обмоткой включены на параллельную работу (подключены на одну секцию);
- 2) Обмотки НН трансформатора с расщепленной обмоткой имеют одинаковые номинальные напряжения и одинаковую нагрузку.

Таблица 2.2 - Расчет параметров схем замещения трансформаторов

П/С	Тип трансформатора	S <sub>н</sub> , кВА	U <sub>ВН</sub> , кВ	U <sub>НН</sub> , кВ	U <sub>к</sub> , %	ΔP <sub>к</sub> , кВт	ΔP <sub>хх</sub> , кВт	I <sub>хх</sub> , %	r <sub>т</sub> , Ом	x <sub>т</sub> , Ом	g <sub>т</sub> , мкСм	b <sub>т</sub> , мкСм
1												
2												
3												

Расчет коэффициентов трансформации в зависимости от текущего номера положения отпайки РПН трансформатора.

Коэффициент трансформации трансформатора, оснащенного устройством регулирования напряжения (РПН или ПБВ) определяется по выражению:

$$K_T = \frac{U_{н\ кон}}{U_{н\ нач}} \left( 1 + m \frac{\Delta U_{ст} \%}{100} \right), \tag{2.6}$$

где U<sub>н нач</sub> - номинальное напряжение обмотки трансформатора относящейся к начальному узлу в описании ветви с трансформатором;

U<sub>н кон</sub> - номинальное напряжение обмотки трансформатора относящейся к конечному узлу в описании ветви с трансформатором, например если ветвь с трансформаторами П/С 1 описана как 2-5 то U<sub>н нач</sub> = U<sub>н ВН</sub> - номинальное напряжение сети на стороне высшего напряжения, а U<sub>н кон</sub> = U<sub>н НН</sub> - номинальное

напряжение сети на стороне низшего напряжения;

$m$  - номер отпайки со знаком;

$\Delta U_{ст\%}$  - величина ступени регулирования в процентах от номинального напряжения.

Значения  $m$  и  $\Delta U_{ст\%}$  для трансформаторов 110 кВ приведены в таблице Б.1 приложения Б.

Расчет коэффициентов трансформации сведите в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 - Расчет коэффициентов трансформации

Номер анцапфы (отпайки), $m$	Коэффициенты трансформации $K_T$		
	П/С 1	П/С 2	П/С 3
9			
8			
7			
6			
5			
4			
3			
2			
1			
0			
-1			
-2			
-3			
-4			
-5			
-6			
-7			
-8			
-9			

Информацию о моделях нагрузки занесите в таблицу 2.4.

Коэффициенты аппроксимации различных типовых моделей нагрузки приведены в таблице Б.3 приложения Б.

Таблица 2.4 - Модели нагрузок

Нагрузка	Модель нагрузки	Коэффициенты аппроксимации модели нагрузки					
		$p_0$	$p_1$	$p_2$	$q_0$	$q_1$	$q_2$
$\tilde{S}_1$							
$\tilde{S}_2$							
$\tilde{S}_3$							

Подготовьте исходные данные для расчета сети программой RASTR в следующем формате, заполнив таблицы 2.5 - Узлы, 2.6 - Ветви, 2.7 - Полиномы.

Таблица 2.5 - Узлы

Номер	СХН	Название	$U_{ном}$	$P_{наг}$	$Q_{наг}$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					

Где: **Номер** - номер узла схемы замещения сети;

**СХН** - ссылочный номер модели статической характеристики нагрузки (задается только для нагрузочных узлов, в которых модель нагрузки отлична от модели  $\tilde{S} = const$ . Модель  $\tilde{S} = const$  задана в программе по умолчанию и может не описываться в таблице Узлы и Полиномы);

**Название** - диспетчерское наименование узла, например ТП1 ВН;

$U_{ном}$  - номинальное напряжение сети для узла в кВ (для узла соответствующего базисному узлу здесь задается базисное напряжение  $U_6$ );

$P_{наг}$ ,  $Q_{наг}$  - соответственно активная и реактивная мощность нагрузки узла в МВт и Мвар соответственно.

Таблица 2.6 - Ветви

$N_{нач}$	$N_{кон}$	$N_{п}$	$R_{лин}$	$X_{лин}$	$G_{лин}$	$B_{лин}$	$K_{Т/В}$
1	2						
2	3						
3	4						
1	4						
2	5	1					
2	5	2					
3	6	1					
3	6	2					
4	7	1					
4	7	2					

Где:  $N_{нач}$ ,  $N_{кон}$  - номера узлов, являющиеся началом и концом ветви;

$N_{п}$  - номер параллельной цепи в ветви;

$R_{лин}$ ,  $X_{лин}$  - соответственно активное и индуктивное сопротивление ветви (Ом);

$G_{лин}$ ,  $B_{лин}$  - соответственно активная и индуктивная проводимость шунта (мкСм) схемы замещения со знаком; Для ЛЭП  $B_{лин}$  - есть полная проводимость  $b_{л}$  со знаком минус (емкостная проводимость). Для трансформатора  $G_{лин}$  есть  $G_{т}$ , а  $B_{лин}$  - это  $b_{т}$  со знаком плюс (индуктивная проводимость).

$K_{Т/В}$  - вещественная составляющая коэффициента трансформации в ветви.

Таблица 2.7 - Полиномы

СХН	P0	P1	P2	Q0	Q1	Q2

Где: **СХН** - номер модели нагрузки (задается пользователем произвольно в диапазоне 1-255). Каждая модель нагрузки в программе описывается единожды. На этот номер (СХН) в таблице **Узлы** можно ссылаться многократно для тех нагрузочных узлов, для которых задана эта модель.

**P0, P1, P2, Q0, Q1, Q2** - соответствуют коэффициентам  $p_0, p_1, p_2$  и  $q_0, q_1, q_2$  из таблицы 2.5.

Выполните расчет нормального установившегося режима сети в программе RASTR.

Запустите программу RASRT на выполнение.

Войдите в меню <Данные>, <Ввод/Кор>, <Узлы>

Клавишей **F2** перейдите в режим ввода или корректировки данных.

Клавишей **F3** войдите в режим задания перечня параметров описания моделей элементов сети (атрибутов).

Клавишей **Insert** пометьте черным цветом те параметры, которые необходимы для представления выбранных моделей.

Выход из таблицы установки атрибутов клавишей **Esc**.

После выхода из режима установки атрибутов Вы должны получить таблицу с шапкой аналогичной таблице 2.5 - **Узлы**.

Введите информацию об узлах из таблицы 2.5.

Пометьте базисный узел, для чего установите курсор на строку с номером базисного узла и нажмите клавишу **F5** (База). При этом символы строки должны поменять цвет, что свидетельствует о реакции программы на Ваши действия.

Выйдите из таблицы **Узлы** клавишей **F10**.

Войдите через меню в таблицу **Ветви**.

Клавишей **F2** перейдите в режим ввода или корректировки данных.

Аналогично работе с таблицей **Узлы** задайте атрибуты необходимые для заполнения информации из таблицы 2.6 - **Ветви**.

Введите информацию о ветвях схемы замещения из таблицы 2.6.

Войдите в таблицу **Полиномы**.

Введите информацию о моделях нагрузок из таблицы 2.7.

Рассчитайте установившийся режим сети командами <Режим>, <Расчет>

Перед началом расчета программа производит проверку схемы на отсутствие базисного узла, наличие узлов без связей, связей без узлов. Все такие объекты отключаются. Также контролируется соответствие коэффициентов трансформации номинальным напряжениям узлов.

Если программа обнаруживает, какие либо несоответствия то выдается диагностическое предупреждение. В этом случае необходимо устранить замечания в соответствующих таблицах **Узлы, Ветви, Полиномы** и повторить расчет.

Расчет режима производится методом Ньютона со стартовым алгоритмом, использующим метод Зейделя (для оценки начального приближения).

Посмотрите результаты расчета режима командами **<Результат>**, **<Узлы>**

В представленной на экране таблице каждая первая строка абзаца содержит параметры узла, последующие – параметры присоединенных к нему ветвей (линий, трансформаторов).

В параметрах узла отображается **номер**, **название**, расчетный модуль напряжения (**V** (кВ)), **фаза** вектора напряжения, расчетная нагрузка (**P<sub>наг</sub>** (МВт), **Q<sub>наг</sub>** (Мвар)), расчетная генерация (**P<sub>ген</sub>** (МВт), **Q<sub>ген</sub>** (Мвар)) а так же модуль напряжения (**V<sub>зад</sub>** (кВ)) и пределы изменения реактивной мощности (**Q<sub>min</sub>**, **Q<sub>max</sub>** (Мвар)) если они задавались при использовании соответствующих моделей генераторов (верхняя шапка таблицы).

В строках параметров ветвей, связанных с узлом, отображаются номер и название противоположного узла ветви, мощность (**P<sub>лин</sub>** (МВт), **Q<sub>лин</sub>** (Мвар)) входящая в узел, продольные потери в ветви (**dP**, **dQ**), модуль тока ветви (**Ток** (кА)), потери в шунтах (**dP<sub>з</sub>**, **dQ<sub>з</sub>**) - соответствующие зарядной мощности линии или потерям в ветви намагничивания трансформаторов.

Нажав клавишу **F4 Потери** можно просмотреть структуру потерь в сети, а нажав клавишу **F5 Напр.**, - отклонение напряжения узлов от их номинального значения в процентах

Проанализируйте режим напряжения в узлах подключения нагрузки.

Если окажется что в некоторых узлах сети напряжение выходит за следующий диапазон

$$0,9 \cdot U_H < U_i < 1,1 \cdot U_H, \quad (2.1)$$

то, войдя в таблицу Ветви, откорректируйте коэффициенты трансформации соответствующих трансформаторов, переключаясь на необходимые отпайки . При этом заново выполните расчет режима.

Нанесите на исходную однолинейную схему сети (Рисунок А.1)

откорректированные напряжения всех узлов сети, номера отпаек трансформаторов и потоки активной и реактивной мощности. Найдите точку потокораздела в кольцевом участке сети (1-2-3-4-1) и обозначьте ее символом - ▼

Занесите в таблицу 2.8 значения токов, протекающие в нормальном режиме по линиям электропередачи.

Примечания:

1) В программе RASTR токи ветвей представлены в кА, поэтому не забудьте перевести их в амперы.

2) В таблице -  $I_{\text{доп}}$  - длительно допустимый ток для соответствующей марки провода (справочные данные таблицы Б.2)

Таблица 2.8 - Проверка сечений ЛЭП по длительно-допустимому току

Участок сети (ветвь)	Марка провода	$I_{\text{доп}}$ , А	Ток ветви (ЛЭП), А		
			В нормальном режиме	Отключение ЛЭП 1-2	Отключение ЛЭП 1-4
1 - 2					
2 - 3					
3 - 4					
1 - 4					

Заполните таблицу 2.9 с информацией о потерях активной мощности в сети в нормальном режиме.

Таблица 2.9 - Потери активной мощности в сети в нормальном и послеаварийных (ремонтных) режимах

Режим	Активные потери в ЛЭП		Активные потери в трансформаторах		Общие активные потери в сети МВт	к.п.д. электрической сети %
	%	МВт	%	МВт		
Нормальный						
Отключение ЛЭП 1-2						
Отключение ЛЭП 1-4						

Коэффициент полезного действия сети -  $\eta$  в процентах определяется выражением

$$\eta = \frac{\Delta P}{P} \cdot 100, \quad (2.2)$$

где  $\Delta P$  - общие активные потери в сети;

$P$  - передаваемая по сети активная мощность.

Величину передаваемой по сети мощности можно определить по выражению

$$P = P_{12} + P_{14}, \quad (2.3)$$

где  $P_{12}$  и  $P_{14}$  поток активной мощности соответственно в начале продольной ветви схемы замещения линий 1-2 и 1-4.

Изобразите в отчете две однолинейные схемы сети в соответствующих режимах при отключенных ЛЭП 1-2 и ЛЭП 1-4. Это могут быть аварийные или ремонтные режимы сети.

Выполните расчеты режимов при поочередном отключении ветвей 1-2 и 1-4.

Для моделирования отключения ветви или узла необходимо войти в соответствующую таблицу (**Узлы** или **Ветви**), войти в режим корректировки, перейти курсором на соответствующий узел (ветвь) и нажать клавишу **F6**. Изменение фона строки с отключаемым элементом свидетельствует о нормальной реакции системы.

При необходимости откорректируйте режим напряжения в узлах присоединения нагрузок в соответствии с выражением (2.1).

Нанесите на соответствующие схемы напряжения узлов, номера отпаек трансформаторов и потоки активной и реактивной мощности.

Определите токи ЛЭП и занесите их для соответствующих режимов в таблицу 9.

Заполните таблицу 10 с информацией о потерях активной мощности в сети в режимах отключения головных участков кольцевого участка сети.

Проверьте сечения ЛЭП по длительно-допустимому току.

Сделайте при необходимости выводы о корректировки сечений по ветвям сети.

В случае необходимости корректировки сечений ЛЭП выполните эту корректировку и заново произведите расчет параметров схем замещения ЛЭП и режимов сети.

Нанесите окончательное потокораспределение и напряжения в узлах сети на однолинейную схему сети

Выйдите из программы RASTR –последовательно нажав клавиши **F10** и **Y**.

### **Вопросы для самоконтроля**

1 Какой схемой замещения представляются воздушные и кабельные ЛЭП различных классов напряжения?

2 Какой схемой замещения представляются двухобмоточные, трехобмоточные трансформаторы и трансформаторы с расщепленной обмоткой при расчете электрических сетей на ЭВМ?

3 В каких случаях трансформатор с расщепленной обмоткой может быть представлен схемой замещения двухобмоточного трансформатора?

4 Какими моделями можно задать электрические нагрузки? В каких случаях рекомендуется применение тех или иных моделей?

5 Каким образом в программе RASTR задается информация о конфигурации сети?

6 Что такое базисный узел? Каким образом выбирается базисный узел?

7 Какими параметрами в программе RASTR описываются узлы схемы замещения сети?

8 Какими параметрами в программе RASTR описываются ветви схемы замещения сети?

9 Каким образом в программе RASTR описываются модели нагрузок?

10 В чем заключается метод простой итерации при расчете установившегося режима?

11 В чем отличие метода Гаусса-Зейделя от метода простой итерации?

12 Каким образом реализуется итерационный процесс расчета установившегося режима методом Ньютона? Проинтерпретируйте графически метод Ньютона.

### Лабораторная работа 3. Организация экономического режима работы двухтрансформаторных подстанций

На подстанциях, от которых питаются потребители I и II категории по надежности электроснабжения, устанавливается два и более трансформатора. При этом суммарные потери в трансформаторах подстанции зависят от нагрузки и количества включенных трансформаторов.

В зависимости от нагрузки подстанции нагрузочные потери ( $\Delta P_{\text{нагр}}$ ) и условно-постоянные потери ( $\Delta P_{\text{уп}}$ ) могут преобладать друг над другом. В режимах минимальных нагрузок может наблюдаться соотношение  $\Delta P_{\text{нагр}} < \Delta P_{\text{уп}}$ . В этом случае с точки зрения уменьшения суммарных потерь мощности  $\Delta P_{\text{пс}}$  имеет смысл отключать часть работающих трансформаторов.

Определим потери мощности в трансформаторах на подстанции, где установлены два однотипных трансформатора.

Потери мощности в двух трансформаторах

$$\Delta P_{T(2)} = 2 \cdot \Delta P_{\text{хх}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta P_{\text{кз}} \cdot S^2}{S_{\text{HT}}^2}, \quad 3.1$$

где  $S$  - мощность нагрузки подстанции;

$S_{\text{HT}}$  - номинальная мощность трансформатора;

$\Delta P_{\text{хх}}$  - потери холостого хода трансформатора;

$\Delta P_{\text{кз}}$  - потери короткого замыкания трансформатора.

Потери мощности в одном трансформаторе при той же нагрузке составят

$$\Delta P_{T(1)} = \Delta P_{\text{хх}} + \frac{\Delta P_{\text{кз}} \cdot S^2}{S_{\text{HT}}^2}. \quad 3.2$$

Нагрузка  $S_{\Gamma}$ , при которой целесообразно отключить один из трансформаторов, определяется условием равенства потерь мощности при одном и двух включенных трансформаторах, определяется из условия

$$2 \cdot \Delta P_{XX} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta P_{K3} \cdot (S_{\Gamma})^2}{S_{HT}^2} = \Delta P_{XX} + \frac{\Delta P_{K3} \cdot (S_{\Gamma})^2}{S_{HT}^2} \quad 3.3$$

Отсюда находим граничную мощность  $S_{\Gamma}$

$$S_{\Gamma} = S_{HT} \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_{XX}}{\Delta P_{K3}}} \quad 3.4$$

Пусть на подстанции 110/10 кВ установлено два трансформатора ТДН-10000/110. Паспортные данным такого трансформатора -  $\Delta P_{XX}=14$  кВт и  $\Delta P_{K3}=60$  кВт. Максимальная нагрузка подстанции 21,18 МВА. Стоимость потерь электроэнергии -  $\beta = 1,8$  руб / кВт·ч

Граничная мощность целесообразного отключения одного из двух трансформаторов на подстанции составит

$$S_{\Gamma} = 10 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 14}{60}} = 6,83 \text{ МВА} \quad 3.5$$

Значение граничной мощности можно получить графически, построив зависимости потерь при включении на подстанции одного и двух трансформаторов. Такой способ является предпочтительным, если на подстанции установлены различные по мощности трансформаторы, если нагрузка трансформаторов не одинаковая или требуется учесть потери в сопряженных элементах сети (например в питающих ЛЭП).

Зависимости потерь мощности от нагрузки подстанции с трансформаторами ТДН-10000/110 приведены на рисунке 3.1.

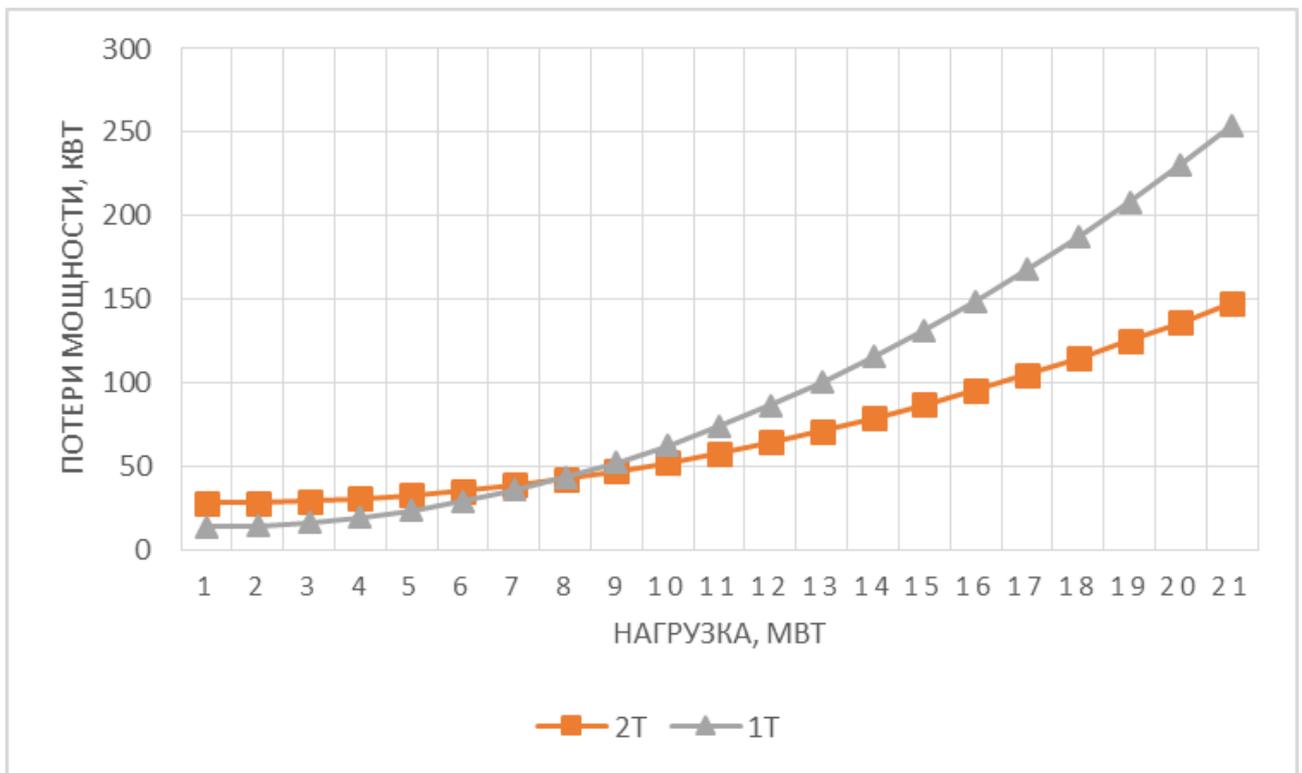


Рисунок 3.1 - Зависимости потерь мощности от нагрузки подстанции при включении двух (2Т) и одного трансформатора (1Т)

При мощности нагрузки  $S < S_{\Gamma}$  на подстанции целесообразно работать с одним трансформатором, а при  $S > S_{\Gamma}$  с двумя трансформаторами.

Варианты исходных данных задает преподаватель.

При отключении одного из трансформаторов при питании потребителей первой категории должен быть предусмотрен автоматический ввод резерва.

Задание для лабораторной работы:

В программном комплексе RASTR произвести расчет серии режимов сети, изображенной на рисунке 3.1, изменяя нагрузку  $S$  в диапазоне от  $0,1 \cdot S$  до  $S$  при включении на подстанции одного и двух трансформаторов.

При изменении нагрузки осуществлять поддержание напряжения на стороне НН подстанции вблизи 10,5 кВ.

Результаты расчетов свести в таблицы 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1 - Потери мощности в сети при включении двух трансформаторов

S,о.е.	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
S, МВА										
$\Delta P_{уп}$ , кВт										
$\Delta P_{нагр}$ , кВт										
$\Delta P_{пс}$ , кВт										

Таблица 3.2 - Потери мощности в сети при включении одного трансформатора

S,о.е.	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
S, МВА										
$\Delta P_{уп}$ , кВт										
$\Delta P_{нагр}$ , кВт										
$\Delta P_{пс}$ , кВт										

Найти граничную мощность, при которой выгодно работать на подстанции с одним трансформатором.

Построить зависимости суммарных потерь мощности от нагрузки при работе с одним и двумя трансформаторами.

Определить величину снижения потерь электроэнергии и величину экономического эффекта при оптимальном включении числа трансформаторов на подстанции в течение года для одной из отраслей промышленности (задается преподавателем), предварительно построив для нее годовой график нагрузки по продолжительности.

На рисунке 3.2 приведен пример, где на годовом графике по продолжительности, построенном в относительных единицах, показаны границы оптимального числа работающих трансформаторов на подстанциях (на ступенях нагрузки выше линии -  $S_{\Gamma}^*$  целесообразно работать с двумя, а ниже этой линии с одним трансформатором).

$$S_{\Gamma}^* = \frac{S_M}{S_{\Gamma}} \quad 3.6$$

Для рассматриваемого случая

$$S_{\Gamma}^* = \frac{S_M}{S_{\Gamma}} = \frac{6,83}{21,18} = 0,32$$

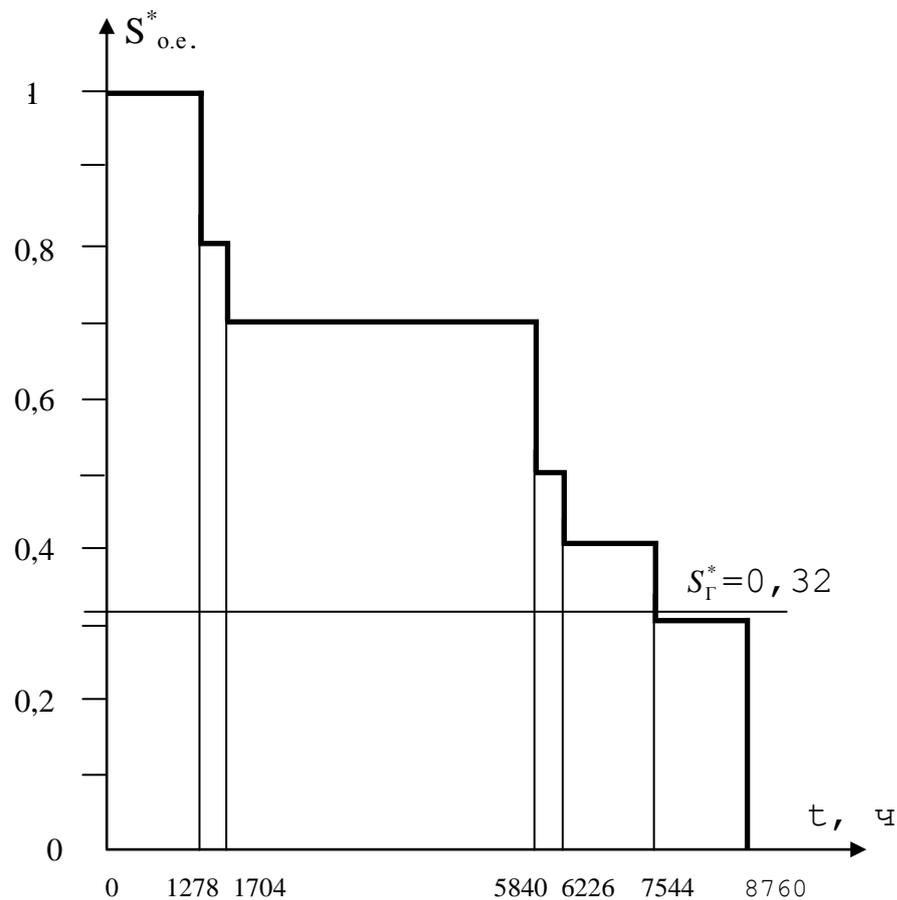


Рисунок 7

Потери электроэнергии *i*-ой подстанции при работе *n* трансформаторов по годовому графику составят:

$$\Delta W_i = n \cdot \Delta P_{XXi} \cdot 8760 + \frac{\Delta P_{K3i}}{n} \cdot \sum_j \frac{(S_j^* \cdot S_{Mi})^2}{S_{HTi}^2} \cdot T_j =$$

$$n \cdot \Delta P_{XXi} \cdot 8760 + \frac{\Delta P_{K3i}}{n} \cdot \left( \frac{S_{Mi}}{S_{HTi}} \right)^2 \cdot \sum_j (S_j^*)^2 \cdot T_j \quad 3.7$$

где *j* - ступень графика нагрузки;

$S_j^*$  - величина мощности нагрузки *j*-ой ступени графика в относительных единицах;

$T_j$  - продолжительность *j*-ой ступени в часах.

Для рассматриваемой подстанции при работе в течение года двух трансформаторов величина потерь электроэнергии составит:

$$\Delta W = 2 \cdot 14 \cdot 8760 + \frac{60}{2} \left( \frac{21,18}{10} \right)^2 \cdot (1,278 + 0,8^2 \cdot 426 + 0,7^2 \cdot 4136 + 0,5^2 \cdot 426 + 0,4^2 \cdot 1278 + 0,3^2 \cdot 1216) = 783086 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

При оптимальном графике включения трансформаторов на подстанции (на ступенях: 1; 0,8; 0,7; 0,5; 0,4 работает два трансформатора, на ступени - 0,3 - один трансформатор) потери электроэнергии составят:

$$\begin{aligned} \Delta W^{opt} &= 2 \cdot 14 \cdot (1278 + 426 + 4136 + 426 + 1278) + 14 \cdot 1216 + \frac{60}{2} \left( \frac{21,18}{10} \right)^2 \cdot \\ &\cdot (1,278 + 0,8^2 \cdot 426 + 0,7^2 \cdot 4136 + 0,5^2 \cdot 426 + 0,4^2 \cdot 1278) + 60 \cdot \left( \frac{21,18}{10} \right)^2 \cdot \\ &\cdot (0,3^2 \cdot 1216) = 780785 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \end{aligned}$$

Снижение потерь электроэнергии за год

$$\delta W = \Delta W_1 - \Delta W_1^{opt} \quad (3.8)$$

$$\delta W = 783086 - 780785 = 2301 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Экономический эффект от регулирования

$$\mathcal{E} = \delta W \cdot \beta \quad (3.9)$$

$$\mathcal{E} = 2301 \cdot 1,8 = 4141,8 \text{ руб.}$$

### Вопросы для самоконтроля

1 Каков характер зависимостей потерь мощности в продольной и поперечной ветвях схем замещения ЛЭП и трансформаторов от напряжения?

2 В каком режиме работы потери в стали трансформатора могут преобладать над потерями в меди?

3 Всегда ли допустимо отключение одного из трансформаторов на подстанции

с целью экономии электроэнергии?

4 Современные трансформаторы характеризуются пониженными потерями холостого хода. Как это сказывается на значении величины граничной мощности нагрузки, при которой целесообразно отключение одного из двух трансформаторов?

5 Какую автоматику можно предложить для повышения надежности работы подстанций, питающих потребителей первой категории по степени надежности, при выполнении энергосберегающих мероприятий, путем отключения одного из трансформаторов?

## Лабораторная работа 4. Компенсация реактивной мощности

**Цель работы:** Определить влияние компенсации реактивной мощности на режим напряжения сети и потери активной мощности.

Исследование произвести на сети схема которой представлена на рисунке 4.1

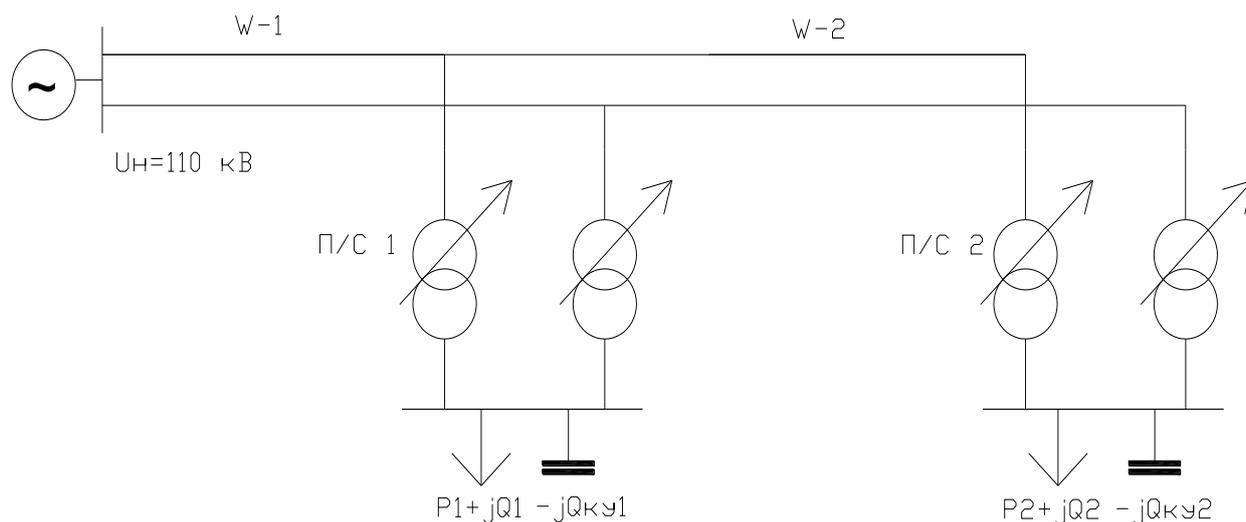


Рисунок 4.1

Составьте схему замещения сети при заданных исходных данных (Таблица А1) и рассчитайте параметры схемы замещения.

Рассчитайте установившийся режим сети, используя пакет программ RASTR.

Напряжение в центре питания задать равным 121 кВ.

Отрегулируйте напряжения на стороне НН подстанций с помощью РПН, так чтобы их значения лежали в диапазоне 10,3-10,5 кВ.

Параметры режима сети (напряжения на стороне НН подстанций –  $U_{нн}$ , номера отпак РПН трансформаторов, общие потери в сети -  $\Delta P$ ) занесите в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 - Исходный режим сети до компенсации реактивной мощности

Параметры режима	П/С 1	П/С 1
$Q_i$ , Мвар		
$U_{нн}$ , кВ		
№ отпайки РПН		
$\Delta P$ , кВт (в сети)		

Рассчитайте мощность компенсирующих устройств, которые необходимо установить на шинах НН подстанций, из условия поддержания в режиме максимальных нагрузок величины коэффициента мощности  $tg\phi_3 = 0,5$  .

Величина входной реактивной мощности, задаваемой энергосистемой в часы максимальных нагрузок на  $i$ -ой подстанции:

$$Q_{Эi} = P_i \cdot tg\phi_3 . \quad (4.1)$$

Мощность компенсирующих устройств, устанавливаемых на шинах НН  $i$ -ой подстанции:

$$Q_{кyi} = Q_i - Q_{Эi} . \quad (4.2)$$

Определите суммарную мощность компенсирующих устройств:

$$Q_{сум} = Q_{кy1} + Q_{кy2} . \quad (4.3)$$

Реактивная нагрузка подстанции после компенсации реактивной мощности (установки на шинах НН подстанции компенсирующих устройств)

$$Q'_i = Q_i - Q_{кyi} . \quad (4.4)$$

Рассчитайте режим сети после компенсации реактивных нагрузок.

Параметры режима сети (напряжения на стороне НН подстанций –  $U_{нн}$ , общие потери в сети -  $\Delta P$ ) занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 - Режим сети непосредственно после компенсации реактивной мощности

Параметры режима	П/С 1	П/С 1
$Q_{кy1}$ , Мвар		
$Q_{сум} = Q_{кy1} + Q_{кy2}$ , Мвар		
$Q_i$ , Мвар		
$U_{нн}$ , кВ		
$\Delta P$ , кВт (в сети)		

Сделайте вывод (как изменился режим напряжения на стороне НН подстанций после компенсации реактивной мощности?).

Отрегулируйте напряжения на стороне НН подстанций с помощью РПН, так чтобы их значения лежали в диапазоне 10,3-10,5 кВ.

Параметры режима сети после регулирования напряжения (напряжения на стороне НН подстанций –  $U_{нн}$ , номера отпаяк РПН трансформаторов, общие потери в сети -  $\Delta P$ ) занесите в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 - Режим сети после компенсации реактивной мощности и регулирования напряжения

Параметры режима	П/С 1	П/С 1
$U_{нн}$ , кВ		
№ отпайки РПН		
$\Delta P$ , кВт (в сети)		

Сделайте вывод. (как изменились потери мощности в сети по сравнению с режимом до компенсации реактивной мощности?)

Произведите оптимизацию распределения мощности компенсирующих устройств по подстанциям из условия минимума потерь в сети:

$$\Delta P(Q_{кy1}) \rightarrow \min \quad (4.5)$$

и выполнении условия

$$Q_{\text{сум}} = Q_{\text{кy1}} + Q_{\text{кy2}}, \quad (4.6)$$

для чего составьте целевую функцию зависимости нагрузочных потерь в сети от мощности компенсирующих устройств  $\Delta P = f(Q_{\text{кy1}}, Q_{\text{кy2}}) \Rightarrow \min$ .

Для расчета потерь мощности в элементах сети используйте упрощенные формулы (по номинальному напряжению).

Потери в трансформаторах

$$\Delta P_i = \frac{\Delta P_{\text{кi}}}{n_i} \cdot \frac{P_i^2 + (Q_i - Q_{\text{кyi}})^2}{S_{\text{нmi}}^2}, \quad (4.7)$$

где  $\Delta P_i$  - потери мощности в трансформаторах  $i$ -ой подстанции;

$n_i$  - количество трансформаторов на подстанции;

$\Delta P_{\text{кi}}$  - потери короткого замыкания трансформатора;

$S_{\text{нmi}}$  - номинальная мощность трансформатора;

$Q_{\text{кyI}}$  - мощность компенсирующего устройства, установленного на стороне НН подстанции.

Потери мощности в линии электропередачи

$$\Delta P_{\text{лиj}} = \frac{P_{\text{лиj}}^2 + (Q_{\text{лиj}} - \sum Q_{\text{кy}})^2}{U_{\text{н}}^2} \cdot R_{\text{лиj}}, \quad (4.8)$$

где  $\Delta P_{\text{лиj}}$  - потери мощности в линии электропередачи;

$P_{\text{лиj}}$  - поток активной мощности, протекающей по линии;

$Q_{\text{лиj}}$  - поток реактивной мощности, протекающей по линии;

.....  $\sum Q_{\text{кy}}$  - суммарная мощность компенсирующих устройств установленных за линией;

$U_{\text{н}}$  - номинальное напряжение сети;

$R_{\text{лиj}}$  - активное сопротивление линии.

Определите оптимальную мощность компенсирующих устройств и величины

реактивных нагрузок на подстанциях после оптимальной компенсации.

Оптимизацию произведите с использованием приложения Excel.

Пусть в ячейке **B2** записано выражение целевой функции  $\Delta P(Q_{kyi})$  (выражение 4.5), ячейки **H12** и **I12** соответственно зарезервированы под переменные  $Q_{ky1}$  и  $Q_{ky2}$ . В ячейке **C16** записана величина суммарной мощности компенсирующих устройств -  $Q_{сум}$ , подлежащая распределению между  $Q_{ky1}$  и  $Q_{ky2}$ . В ячейке **B16** записано выражение **=H12+I12**, то есть вычисляется сумма  $Q_{ky1} + Q_{ky2}$ .

В меню Сервис выберите команду **Поиск решения**. Появится вкладка **Поиск решения** (Рисунок 4.2).

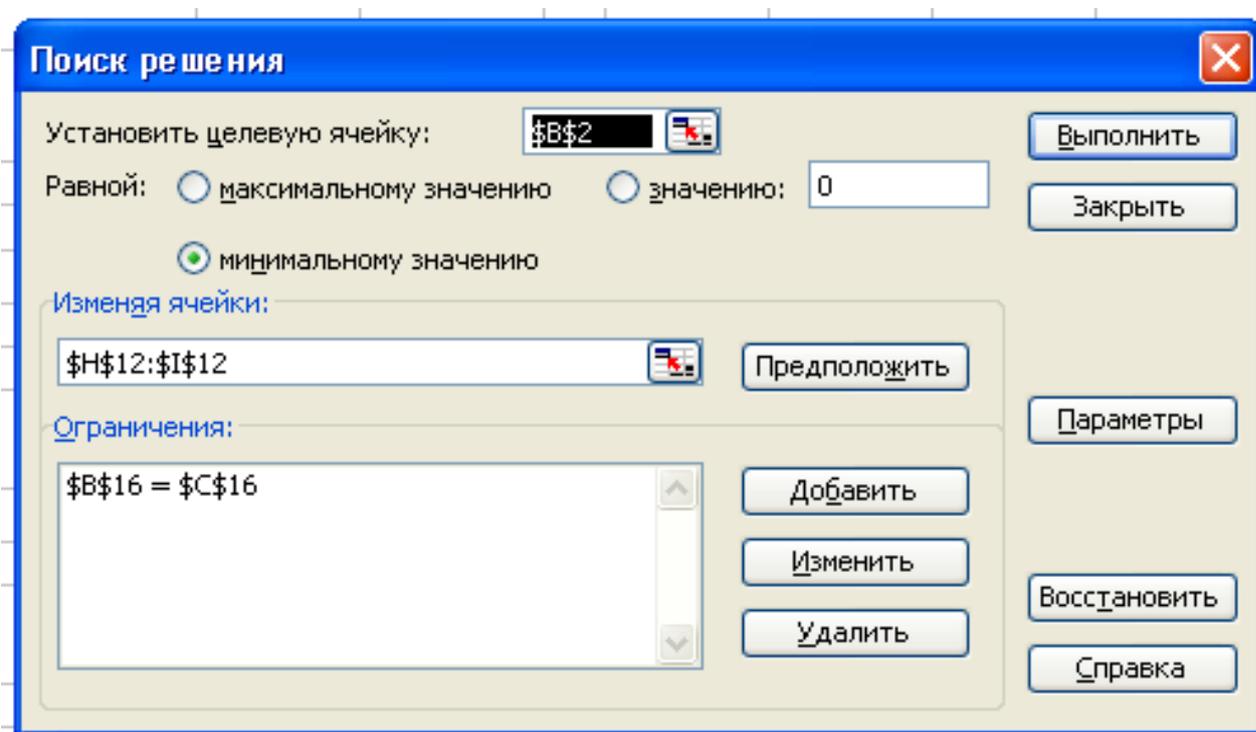


Рисунок 4.2

На этой вкладке в поле **Установить целевую ячейку** введите [ссылку на ячейку](#) которая содержит [формулу](#)  $\Delta P(Q_{ky})$  - ячейка **B2** (здесь и далее ссылки на ячейки на рисунках представляются в формате абсолютной адресации **\$B\$2**).

Чтобы минимизировать значение этой ячейки путем изменения значений влияющих ячеек **H12** и **I12**, установите переключатель в положение **минимальному значению**.

В поле **Изменяя ячейки** введите ссылки на изменяемые ячейки, или их диапазон, в данном случае **H12:I12**.

В поле **Ограничения** введите ограничение  $Q_{\text{сум}} = Q_{\text{ку1}} + Q_{\text{ку2}}$  накладываемое на поиск решения.

Для этого нажмите кнопку **Добавить**. Появится вкладка **Добавление ограничения**, рисунок 4.3 . На ней в поле **Ссылка на ячейку** введите [адрес](#) ячейки, на значение которой накладываются ограничения (**B16**).

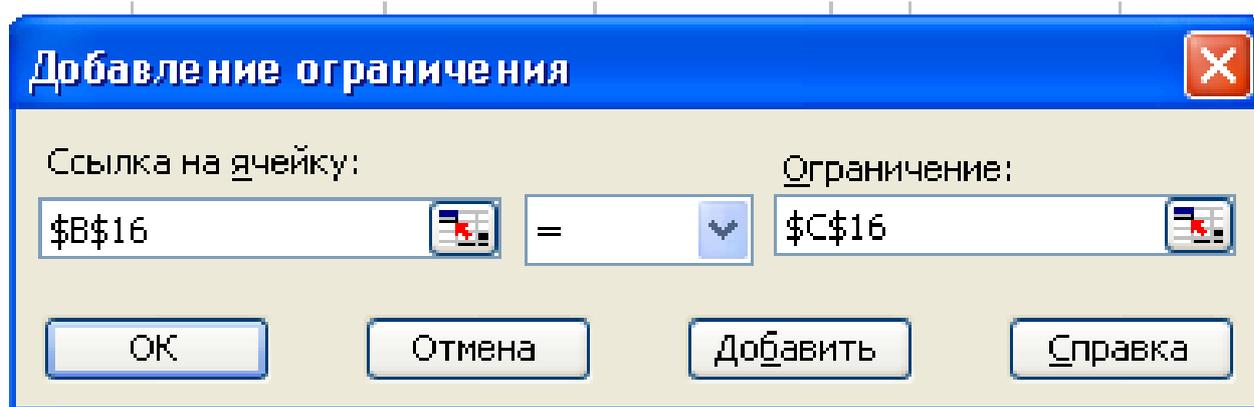


Рисунок 4.3

Выберите из раскрывающегося списка условный оператор ( = ), который должен располагаться между ссылкой и полем **Ограничение**.

В поле **Ограничение** введите ссылку на ячейку **C16** и нажмите кнопку **ОК**.

На вкладке **Поиск решения** (рисунок 4.2) нажмите кнопку **Параметры**.

Появится вкладка **Параметры поиска решения** (Рисунок 4.4)

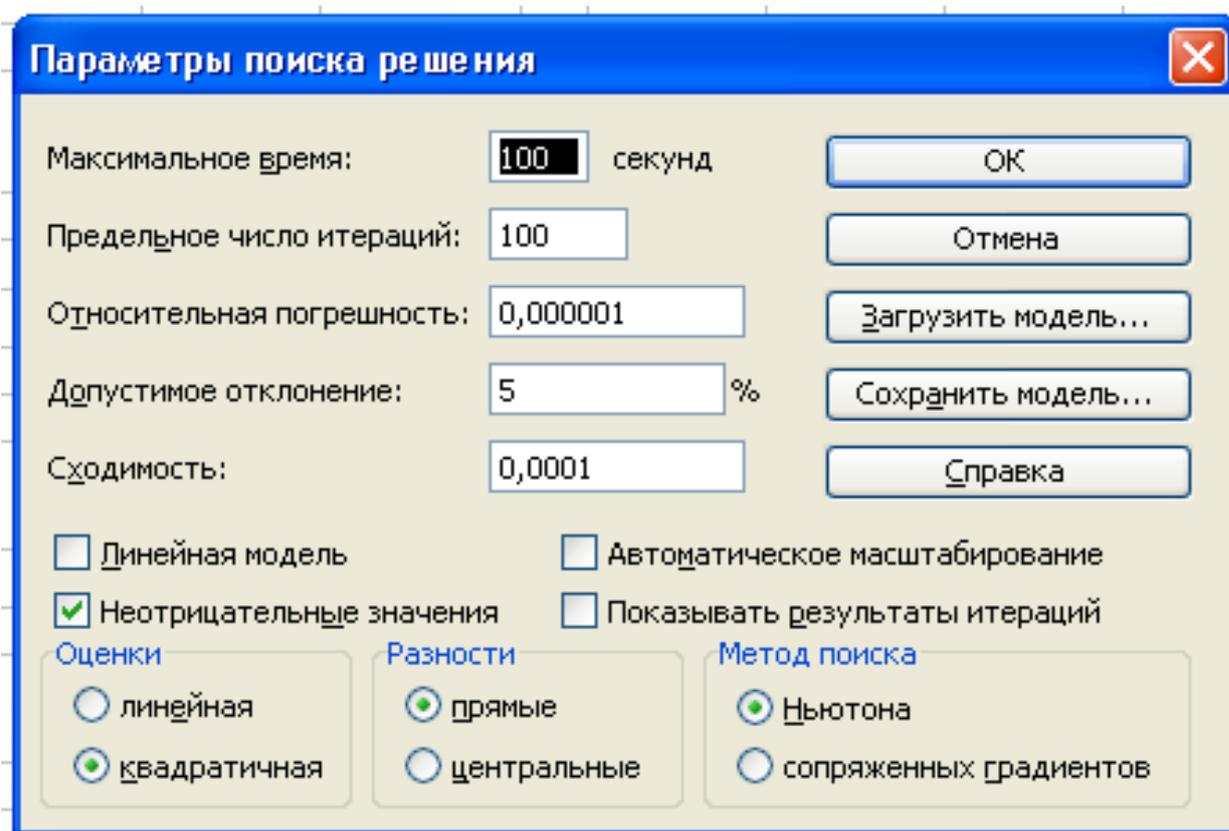


Рисунок 4.4

Установите в диалоговом окне **Параметры поиска решения** флажок **Неотрицательные значения**. Установите переключатель **квадратичная** модель (**Оценки**). Нажмите клавишу **ОК**.

В диалоговом окне **Поиск решения** нажмите клавишу **Выполнить**.

При нахождении оптимального решения появится диалоговое окно **Результаты поиска решения** (рисунок 4.5).

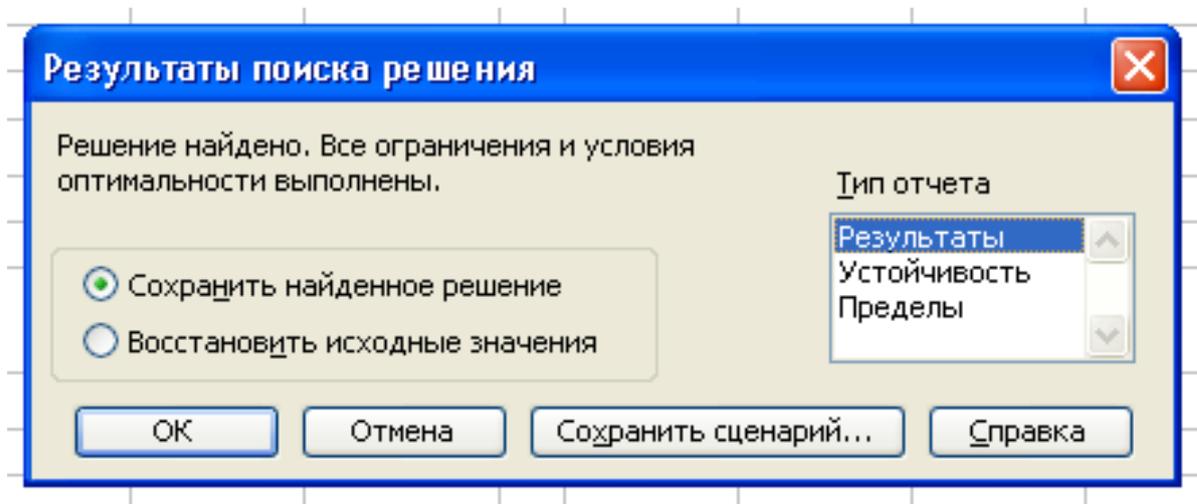


Рисунок 4.5

Установите переключатель **Сохранить найденное значение**. Если в поле **Тип отчета** выбрать опцию **Результаты** и нажать клавишу **ОК**, то в ячейках **H12** и **I12** сохранятся найденные значения оптимальных величин переменных  $Q_{ky1}$  и  $Q_{ky2}$ , появится дополнительный лист Excel **Отчет по результатам**, на котором отобразится информация о ячейках, представленных в модели оптимизации (рисунок 4.6)

Целевая ячейка (Минимум)

Ячейка	Имя	Исходное значение	Результат
\$B\$2	F=	2459,25	2459,25

Изменяемые ячейки

Ячейка	Имя	Исходное значение	Результат
\$H\$12	Q <sub>ky1</sub> , Мвар	3,02	3,02
\$I\$12	Q <sub>ky2</sub> , Мвар	11,98	11,98

Ограничения

Ячейка	Имя	Значение	Формула	Статус	Разница
\$B\$16		15,00	\$B\$16=\$C\$16	не связан.	0

Рисунок 4.6

Рассчитайте установившийся режим сети при оптимальной мощности компенсирующих устройств, используя пакет программ RASTR. Отрегулируйте

напряжения на стороне НН подстанций с помощью РПН, так чтобы их значения лежали в диапазоне 10,3-10,5 кВ.

Параметры режима сети (напряжения на стороне НН подстанций -  $U_{НН}$ , номера отпаяк РПН трансформаторов, общие потери в сети -  $\Delta P$ ) занесите в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 - Режим сети после оптимальной компенсации реактивной мощности

Параметры режима	П/С 1	П/С 1
$Q_{кy1}$ , Мвар		
$Q_{сум} = Q_{кy1} + Q_{кy2}$ , Мвар		
$Q'_i$ , Мвар		
$U_{НН}$ , кВ		
$\Delta P$ , кВт (в сети)		

Определите снижение потерь мощности и электроэнергии при оптимальной компенсации ( $\Delta P$  таблица 4.4) по сравнению с компенсацией по постоянству коэффициента мощности по подстанциям ( $\Delta P$  таблица 4.2).

Расчет потерь электроэнергии произведите по времени максимальных потерь

$$\Delta W = \Delta P \cdot \tau, \quad (4.9)$$

где  $\tau$  - время максимальных потерь

$$\tau = (0.124 + \frac{T_M}{10000})^2 \cdot 8760, \quad (4.10)$$

где  $T_M$  - число часов использования максимума нагрузки (Принять  $T_M = 5000$  ч.).

Определите экономический эффект от оптимизации распределения компенсирующих устройств по подстанциям

$$\mathcal{E} = \beta \cdot (\Delta W' - \Delta W^*), \quad (4.11)$$

где  $\beta$  - стоимость потерь электроэнергии;

$\Delta W'$  - потери электроэнергии в сети при распределении компенсирующих устройств по подстанциям из условия постоянства коэффициента мощности;

$\Delta W^*$  - потери мощности в сети при оптимальном распределении компенсирующих устройств по подстанциям.

Результаты расчета занести в таблицу 4.5.

Таблица 4.5 - Эффект от оптимальной компенсации реактивной мощности

Параметры	Режим сети	
	Компенсация реактивной мощности из условия постоянства коэффициента мощности по подстанциям	Оптимальная компенсации по критерию минимума потерь мощности в сети
$\Delta P$ , кВт (в сети)		
$\Delta W$ , кВт*ч		
Э, руб		

Сделайте вывод.

### Вопросы для самоконтроля

- 1 Что такое реактивная мощность?
- 2 Почему требуется компенсация реактивной мощности в электрических сетях?
- 3 Как связан баланс реактивной мощности в сети и уровень напряжения?
- 4 Что такое перекомпенсация реактивной мощности?
- 5 К каким отрицательным последствиям приводит перекомпенсация в ночные часы при малых нагрузках.
- 6 Какие типы компенсирующих устройств вы знаете?
- 7 Приведите экономико-математические модели различных компенсирующих

устройств.

8 С какими положительными влияниями на параметры режима сети связана компенсация реактивной мощности?

9 За счет чего можно получить положительный экономический эффект от компенсации реактивной мощности при проектировании систем электроснабжения?

10 Какие виды компенсации реактивной мощности вы знаете.

11 У каких конденсаторных установок (ВН или НН) удельная стоимость, руб/квар меньше?

12 опишите достоинства и недостатки конденсаторных установок, как источников реактивной мощности.

13 Каков регулирующий эффект нагрузки по реактивной мощности конденсаторных батарей?

14 В чем заключаются особенности вывода в ремонт конденсаторных установок?

15 Каким синхронным двигателям с точки зрения их скорости вращения следует отдавать предпочтение при компенсации реактивной мощности и почему?

16 От чего зависит располагаемая реактивная мощность синхронных двигателей?

## Лабораторная работа 5. Исследование зависимости потерь мощности в сети от уровня напряжения в центре питания

Потери активной мощности в сети складываются из нагрузочных потерь, к которым относятся: потери мощности в активных сопротивлениях продольных ветвей схем замещения ЛЭП (потери в проводах ЛЭП), потери в активных сопротивлениях продольных ветвей схем замещения трансформаторов (потери в меди или потери в обмотках трансформатора) и условно-постоянные потери в поперечных ветвях схем замещения ЛЭП и трансформаторов (в ЛЭП к этим потерям относят потери в изоляции и потери на «корону» ВЛ, а в трансформаторах - потери в стали или в магнитопроводе).

$$\Delta P = \Delta P_{нагр} + \Delta P_{усл.пост.} \quad (5.1)$$

$$\Delta P = \sum_1^{N_L} \Delta P_{Л} + \sum_1^{N_T} (\Delta P_M + \Delta P_C), \quad (5.2)$$

где  $\Delta P_{нагр}$  - нагрузочные потери;

$\Delta P_{усл.пост.}$  - условно-постоянные потери;

$\Delta P_{Л}$  - потери в активном сопротивлении продольной ветви схемы замещения ЛЭП;

$\Delta P_M$  - потери в меди трансформатора;

$\Delta P_C$  - потери в стали трансформатора;

$N_L$  - количество линий в сети;

$N_T$  - количество трансформаторов.

Нагрузочные потери уменьшаются с ростом уровня напряжения в сети, а условно постоянные потери возрастают.

**Цель работы:** Исследовать зависимость потерь активных потерь в сети от уровня напряжения в двух режимах: максимальных нагрузок и минимальных нагрузок.

## **Порядок проведения работы**

Расчеты произвести с использованием пакета программ «RASTR».

Расчет произвести для сети, рассмотренной в лабораторной работе № 2, для соответствующего варианта в двух режимах: режим максимальных нагрузок; режим минимальных нагрузок.

### **1) Режим максимальных нагрузок**

За режим максимальных нагрузок принять режим с нагрузками, заданными в работе № 2.

Для режима максимальных нагрузок произвести серию расчетов установившихся режимов при изменении напряжения базисного узла (напряжения центра питания) в диапазоне от  $0,9 U_n$  до  $1,15 U_n$ . Максимальное граничное значение рассматриваемого диапазона ( $1,15 U_n$ ) ограничивается ГОСТ 21128 для сетей 35-220 кВ на уровне 15% от номинального напряжения по условиям защиты изоляции оборудования сетей.

При расчете режима сети одновременно с изменением напряжения в центре питания производите изменение коэффициентов трансформации соответствующих трансформаторов на подстанциях в соответствии с принципом встречного регулирования напряжения. То есть в режиме максимальных нагрузок напряжение на стороне НН подстанций поддерживайте на уровне не ниже 10,5 кВ, а в режиме минимальных нагрузок на уровне не выше 10 кВ.

Если при регулировании напряжении в центре питания, не удастся нормализовать напряжения на вторичной стороне подстанций до требуемого уровня, то этот режим считайте недопустимым.

Результаты расчетов для режима максимальных нагрузок сведите в таблицы 5.1 и 5.2.

Таблица 5.1 - Потери напряжения в режиме максимальных нагрузок

$U_{\text{б,}}$ о.е.	$U_{\text{б,}}$ кВ	$\Delta P_{\text{л,}}$ МВт	$\Delta P_{\text{м,}}$ МВт	$\Delta P_{\text{с,}}$ МВт	$\Delta P,$ МВт
0,9	99				
0,95	104,5				
1	110				
1,05	115,5				
1,1	121				
1,15	126,5				

Таблица 5.2 - Отпайки трансформаторов на подстанциях

$U_{\text{б,}}$ о.е.	$U_{\text{б,}}$ кВ	номера отпаяек на подстанциях:		
		П/С 1	П/С 2	П/С 3
0,9	99			
0,95	104,5			
1	110			
1,05	115,5			
1,1	121			
1,15	126,5			

Построить на одном графике зависимости потерь в сети ( $\Delta P$ ) и составляющих  $\Delta P_{\text{л}}$ ,  $\Delta P_{\text{м}}$ ,  $\Delta P_{\text{с}}$  от уровня напряжения (в относительных единицах) в центре питания в режиме максимальных нагрузок.

## 2) Режим минимальных нагрузок

Для рассматриваемой сети принять минимальные нагрузки на уровне 0,1 от максимальных нагрузок.

Результаты расчетов для режима минимальных нагрузок свести в таблицы 5.3 и 5.4.

Таблица 5.3 - Потери напряжения в режиме минимальных нагрузок

$U_6$ , о.е.	$U_6$ , кВ	$\Delta P_{Л}$ , МВт	$\Delta P_{М}$ , МВт	$\Delta P_{С}$ , МВт	$\Delta P$ , МВт
0,9	99				
0,95	104,5				
1	110				
1,05	115,5				
1,1	121				
1,15	126,5				

Таблица 5.4 - Отпайки трансформаторов на подстанциях

$U_6$ , о.е.	$U_6$ , кВ	номера отпаек на подстанциях:		
		П/С 1	П/С 2	П/С 3
0,9	99			
0,95	104,5			
1	110			
1,05	115,5			
1,1	121			
1,15	126,5			

Построить на одном графике зависимости потерь в сети ( $\Delta P$ ) и составляющих ( $\Delta P_{Л}$ ,  $\Delta P_{М}$ ,  $\Delta P_{С}$ ) от уровня напряжения (в относительных единицах) в центре питания в режиме минимальных нагрузок.

Сделать выводы по работе.

### Вопросы для самоконтроля

- 1 Охарактеризуйте структуру технических потерь в сети.
- 2 Как зависят нагрузочные потери в элементах сети (в линиях и трансформаторах) от уровня напряжения.
- 3 Как зависят условно-постоянные потери в элементах сети (в линиях и трансформаторах) от уровня напряжения.
- 4 Какие виды потерь преобладают в часы максимальных нагрузок?
- 5 Какой уровень напряжения следует держать в центре питания для снижения потерь в этом режиме?
- 6 Какие виды потерь могут преобладать в сети в часы минимальных нагрузок?
- 7 Какой уровень напряжения следует держать в центре питания для снижения

потерь в этом режиме?

8 Чем ограничивается минимальное напряжение в центре питания?

9 В чем заключается принцип встречного регулирования напряжения

## Лабораторная работа 6. Определение потерь электроэнергии

На рисунке 6.1 показана схема электропередачи 35 кВ.

Варианты исходных данных приведены в таблице В.1 Приложения В и в таблице Г.1 Приложения Г.

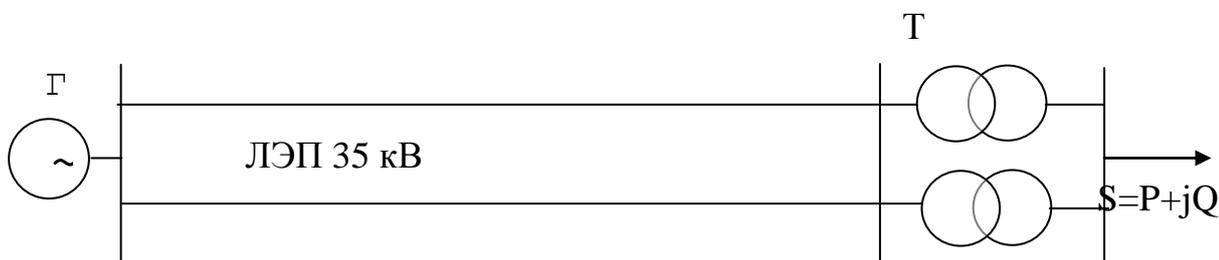


Рисунок 6.1

где  $P$  и  $Q$  - максимальная активная и реактивная мощность нагрузки подстанции.

Требуется определить годовые потери электроэнергии в сети при заданном графике нагрузки потребителя следующими методами:

- 1) по ступеням годового графика нагрузки (метод оперативных расчетов);
- 2) средних нагрузок;
- 3) числа часов максимальных потерь.

Определение потерь мощности выполнить с помощью пакета программ RASTR.

### Порядок выполнения работы:

- 1) Построить на основе суточных (зимнего и летнего) графиков нагрузки годовой график нагрузки по продолжительности и определить на основе его число часов использования максимума нагрузки -  $T_m$  и время максимальных потерь -  $\tau$ .

## Методика построение годового графика нагрузок по продолжительности.

Для упрощения расчетов принято, что графики активной и реактивной мощности в относительных единицах совпадают во времени и, следовательно, совпадают с графиком полной мощности.

По суточному графику требуется построить годовой график активной нагрузки по продолжительности, который строится в порядке убывания ступеней графика и показывает, сколько часов в году предприятие (подстанция) работает с той или иной активной мощностью нагрузки. Площадь такого графика, построенного в именованных единицах равна полной энергии, потребленной предприятием (передаваемой через подстанцию) за год. Площадь графика, построенного в относительных единицах равна числу часов использования максимальной нагрузки -  $T_M$ .

### Пример

На рисунке 6.2 приведены суточные графики нагрузок для некоторой отрасли промышленности. Построим годовой график нагрузки по продолжительности и найдем число часов использования максимума нагрузки.

S  
о.е.

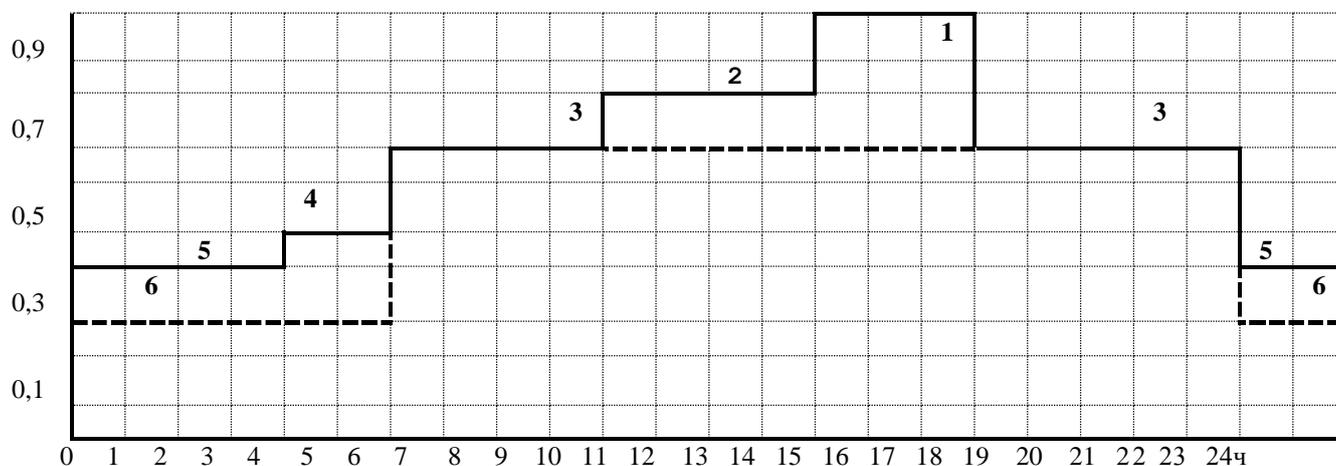


Рисунок 6.2 - суточные графики нагрузок

Условно принимаем число «зимних» суток равным 213 и число «летних» суток - 152

Ранжируем (нумеруем) ступени графиков зимнего и летнего, начиная с максимального значения. Получаем шесть рангов - шесть ступеней по величине мощности (числами на рисунке 2 показаны номера ступеней в порядке убывания).

Суммарная продолжительность  $i$ -ой ступени годового графика -  $T_i = T_{из} + T_{ил}$ ;

где  $T_{из}$  - суммарная годовая продолжительность  $i$ -ой ступени по зимнему графику;

$T_{ил}$  - суммарная годовая продолжительность  $i$ -ой ступени по летнему графику.

$$T_{ил} = t_{ил} * 152, \quad (6.1)$$

$$T_{из} = t_{из} * 213, \quad (6.2)$$

где  $t_{ил}$  - суммарная продолжительность  $i$ -ой ступени по суточному летнему графику;

$t_{из}$  - суммарная продолжительность  $i$ -ой ступени по суточному зимнему графику;

Расчет сводим в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 - Построение годового графика нагрузки по продолжительности

№ ступени	$P_i$ , о.е.	$t_{из}$ , ч	$t_{ил}$ , ч	$T_{из}$ , ч	$T_{ил}$ , ч	$T_i = T_{из} + T_{ил}$ , ч	$P_i(\text{о.е.}) * T_i$ , ч
1	1	3		639	0	639	639
2	0,8	4		852	0	852	682
3	0,7	9	16	1917	2432	4349	3044
4	0,5	2		426	0	426	213
5	0,4	6		1278	0	1278	511
6	0,3		8	0	1216	1216	365
Итого:		24	24	5112	3648	8760	5454

Проверкой правильности расчетов являются контрольные цифры в строке «Итого:». В столбцах 3 и 4 должно получиться число 24 (число часов в сутках), а в столбце 7 - число 8760 (число часов в невисокосном году).

Находим число часов использования максимума нагрузки

$$T_M = \frac{\sum P_i * T_i}{P_M}, \quad (3)$$

$T_M$  - это время, за которое потребитель, работая с максимальной нагрузкой потребляет такое же количество электроэнергии, как и при работе по действительному графику в течение года.

Так как  $P_M(\text{о.е.})=1$  (в относительных единицах), то  $T_M = \sum P_i * T_i$ , то есть это число, стоящее в правом нижнем углу таблицы 6.1.

Находим число часов использования максимума нагрузки:

$$T_M = 5454 \text{ ч}$$

Годовой график активной нагрузки по продолжительности, строится в порядке убывания ступеней графика  $P_i$  и показывает, сколько часов в году -  $T_i$  предприятие работает с той или иной активной мощностью нагрузки.

Время максимальных потерь

$$\tau = (0,124 + \frac{T_M}{10^4})^2 8760 \quad (6.4)$$

2) Определить среднеквадратичное значение мощности годового графика нагрузки в относительных единицах.

Среднеквадратичная нагрузка в относительных единицах

$$S_{\text{ск}}^* = \sqrt{\frac{\sum_1^k S_i^{*2} \cdot T_i}{\sum_1^k T_i}}, \quad (6.5)$$

где  $S_i^*$  - мощность ступени нагрузки в относительных единицах;

$T_i$  - продолжительность ступени в часах;

$k$  - количество ступеней графика.

3) Определить среднее значение мощности годового графика нагрузки в относительных единицах.

$$S_{\text{ср}}^* = \frac{\sum_1^k S_i^* \cdot T_i}{\sum_1^k T_i} \quad (6.6)$$

4) Определить коэффициент формы годового графика по продолжительности

$$k_{\text{ф}} = \frac{S_{\text{ск}}^*}{S_{\text{ср}}^*} \quad (6.7)$$

5) Составить схему замещения сети.

ЛЭП 35 кВ представить схемой замещения без поперечных ветвей. Нагрузку представить моделью постоянной мощности.

Напряжение базисного узла принять равным  $1.1 \cdot U_{\text{н}}$ .

б) Выполнить расчет параметров схемы замещения.

Результаты расчета свести в таблицы 6.2, 6.3 и 6.4:

Таблица 6.2 - ЛЭП 35 кВ

Марка провода	Длина, км	$r_0$ , Ом/км	$x_0$ , Ом/км	$r_{\text{л}}$ , Ом	$x_{\text{л}}$ , Ом

Таблица 6.3 - Трансформатор

Марка	$S_{HT}$ , кВА	$U_H$ , кВ		$U_K$ , %	$\Delta P_K$ , кВт	$\Delta P_X$ , кВт	$I_{XX}$ , %	$r_T$ , Ом	$x_T$ , Ом	$g_T$ , мкСм	$b_T$ , мкСм
		ВН	НН								

Таблица 6.4 - Коэффициенты трансформации

Номер анцапфы, (отпайки) m	Коэффициент трансформации $K_T$
...	
2	
1	
0	
-1	
-2	
...	

7) Сформировать для расчета режима сети в пакете программ RASTR таблицы 6.5 «Узлы» и 6.6 «Ветви»

Таблица 6.5 - Узлы

Номер	$U_{ном}$	$P_{наг}$	$Q_{наг}$

Таблица 6.6 - Ветви

$N_{нач}$	$N_{кон}$	$N_{п}$	$R_{лин}$	$X_{лин}$	$G_{лин}$	$B_{лин}$	$K_{T/B}$

8) Выполнить расчеты потерь мощности и электроэнергии в пакете программ RASTR для каждой ступени годового графика нагрузки по продолжительности.

Для каждого режима подобрать коэффициент трансформации, так, чтобы напряжение на стороне НН было примерно равно  $U_H$ .

Результаты расчетов свести в таблицу 6.7:

Таблица 6.7 - Расчет потерь электроэнергии по ступеням годового графика по продолжительности

№ ступени графика	$S_i^*$ , о.е.	$P_i$ , МВт	$Q_i$ , Мвар	$\Delta P_{\text{прод } i}$ , МВт	$\Delta P_{\text{поп } i}$ , МВт	$\Delta P_i$ , МВт	$T_i$ , ч	$\Delta P_i * T_i$ , МВт*ч
Итого:								

где  $P_i$ ,  $Q_i$  - активная и реактивная мощность нагрузки  $i$ -ой ступени годового графика нагрузки по продолжительности

$$P_i = S_i^* * P \quad (6.8)$$

$$Q_i = S_i^* * Q \quad (6.9)$$

$\Delta P_{\text{прод}}$  - потери в продольных ветвях, МВт

$\Delta P_{\text{поп}}$  - потери в поперечных ветвях, МВт

$\Delta P$  - общие потери, МВт

$T_i$  - продолжительность ступени, ч

9) Определить годовые потери электроэнергии по **методу оперативных расчетов**

$$\Delta W_{\text{оп}} = \sum_{i=1}^k \Delta P_i * T_i \quad (6.10)$$

10) Определить годовые потери электроэнергии по **методу средних нагрузок**

Определить среднюю активную и реактивную нагрузку

$$P_{cp} = P * S_{cp}^*, \quad (6.11)$$

$$Q_{cp} = Q * S_{cp}^*, \quad (6.12)$$

Выполнить расчет установившегося режима сети при средней нагрузке.

Подобрать коэффициент трансформации, так, чтобы напряжение на стороне НН было примерно равно  $U_H$ .

Определить потери мощности в сети от средней нагрузки.

Расчет свести в таблицу 6.8

Таблица 6.8

$S_{cp}^*$ , о.е.	$P_{cp}$ , МВт	$Q_{cp}$ , Мвар	$\Delta P_{prod\ cp}$ , МВт	$\Delta P_{pop\ cp}$ , МВт	$\Delta P_{cp}$ , МВт

Определить потери электроэнергии по методу средних нагрузок

$$\Delta W_{cp} = \Delta P_{prod\ cp} * k_{\phi}^2 * T_{\Gamma} + \Delta P_{pop\ cp} * T_{\Gamma} \quad (6.13)$$

где  $T_{\Gamma}$  - годовой фонд времени, равный 8760 часов.

11) Определить потери электроэнергии в сети **по времени максимальных потерь**.

Величины потерь мощности для режима максимальных нагрузок взять из таблицы пункта 8 для ступени максимальной нагрузки  $S_1^* = 1$ .

Потери электроэнергии

$$\Delta W_M = \Delta P_{prod\ m} * \tau + \Delta P_{pop\ m} * T_{\Gamma} \quad (6.14)$$

где  $\Delta P_{prod\ m}$  - суммарные потери мощности в продольных ветвях схемы замещения сети в режиме максимальных нагрузок;

где  $\Delta P_{\text{поп м}}$  - суммарные потери мощности в поперечных ветвях схемы замещения сети в режиме максимальных нагрузок;

11) Сравнить полученные результаты расчета потерь электроэнергии тремя методами. За эталонный взять расчет потерь по методу оперативных расчетов.

Результаты сравнения свести в таблицу 6.9

Таблица 6.9

Метод расчета потерь электроэнергии	$\Delta W$ , МВт*ч	Погрешность, МВт*ч	Погрешность, %
оперативных расчетов		0	0
средних нагрузок			
времени максимальных потерь			

12 Сделать выводы по работе.

### Вопросы для самоконтроля

- 1) Дайте определение **фактическим (отчетным) потерям** электроэнергии.
- 2) Какие составляющие входят в **технологические потери** электроэнергии?
- 3) Какие составляющие входят в **технологические потери при транспортировке** электроэнергии?
- 4) Какие составляющие входят в **потери при реализации** электроэнергии?
- 5) Какие составляющие входят в **технические потери**?
- 6) Перечислите методы (в порядке снижения точности расчета) для расчета нагрузочных потерь электроэнергии.
- 7) Какие потери относятся к **условно-постоянным потерям** электроэнергии?
- 8) Какие потери относятся к **потерям зависящих от погодных условий**? Как они определяются?
- 9) Как определяется расход электроэнергии на **собственные нужды** подстанций?

10) Что нужно учесть при определении расхода электроэнергии на собственные нужды подстанций, если приборы учета установлены на шинах 0,4 кВ трансформаторов собственных нужд?

11) Перечислите основные способы снижения потерь **при реализации электроэнергии («коммерческих потерь».**

## Лабораторная работа 7. Уменьшение потерь активной мощности в распределительной электрической сети с односторонним питанием путем продольной компенсации реактивной мощности нагрузки

**Цель работы:** Определить снижение потерь активной мощности в распределительной электрической сети с односторонним питанием путем продольной компенсации реактивной мощности нагрузки, определение экономической эффективности данного типа.

### Перечень аппаратуры, используемой в лабораторной работе

В таблице 7.1 приведен перечень компонентов стенда, используемых в данной работе

Таблица 7.1

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218.2	~ 220 В / 3 А
A1	Автоматический однополюсный выключатель	359	~ 230 В / 0,5 А
A2	Однофазный трансформатор	372.1	80 ВА 220 / 198...242 В
A3	Модель линии электропередачи	313.3	~ 220 В / 0,3 А
A4	Активная нагрузка	306.4	~ 220 В / 0...30 Вт
A6	Индуктивная нагрузка	324.4	~ 220 В / 0...30 ВАр
A13	Устройство продольной емкостной компенсации	1315.3	0; 47; 94; 141; 188 мкФ / 0,3 А
A18	Переключатель	2306	~ 220 В / 6 А
P1	Блок мультиметров	509.2	2 мультиметра 0...1000 В $\varnothing$ ; 0...10 А $\varnothing$ ; 0...20 МОм
P2	Измеритель мощностей	507.3	15; 60; 150; 300; 450 В / 0,1; 0,2; 0,5; 1 А.

На рисунке 7.1 приведена схема опыта.

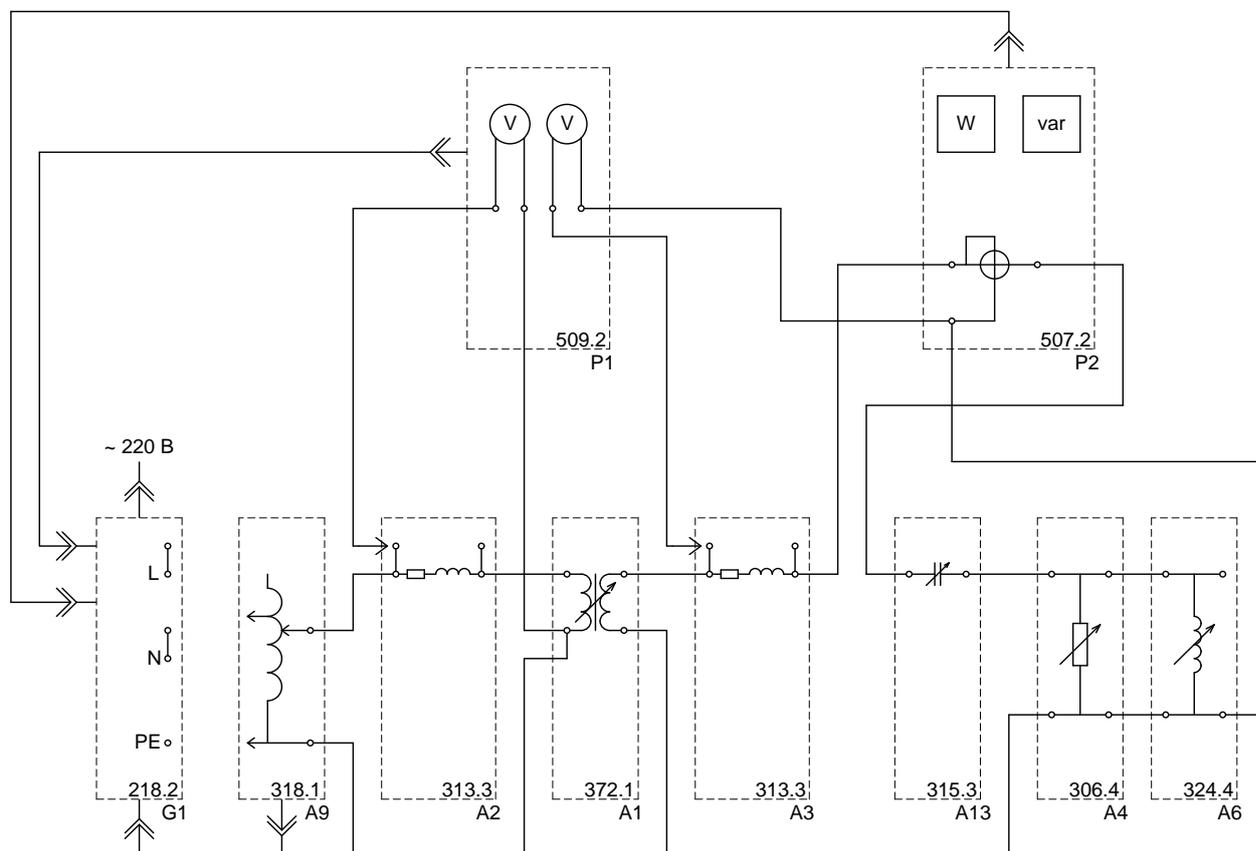


Рисунок 7.1 - Схема опыта

### Указания по проведению эксперимента

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

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

3 Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений,

приведенной на рисунке 7.1.

4 Отключите (если включен) выключатель «СЕТЬ» автотрансформатора А9 и установите регулировочную рукоятку последнего в крайнее против часовой стрелки положение.

5 Установите переключателем желаемое значение коэффициента трансформации трансформатора А1.

6 Установите переключателями желаемые параметры моделей А2, А3 линий электропередачи и нагрузок А4, А6.

7 Переключатель устройства продольной емкостной компенсации А13 установите в положение «0 мкФ».

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

9 Включите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров Р1 и измерителя мощностей Р2.

10 Активизируйте используемые мультиметры.

11 Включите выключатель «СЕТЬ» автотрансформатора А9 и установите на его выходе по вольтметру блока мультиметров Р1 требуемое напряжение (задается преподавателем).

12 С помощью мультиметров, включенных как вольтметры, блока Р1 измеряйте напряжения в интересующих точках исследуемой сети.

13 С помощью измерителя Р2 определяйте величины активной и реактивной мощностей, потребляемых нагрузкой.

14 Регулирование напряжения осуществляйте изменением величины емкости устройства продольной емкостной компенсации А13.

15 По завершении эксперимента отключите источник G1, выключатели «СЕТЬ» измерителя мощностей Р2, блока мультиметров Р1 и автотрансформатора А9.

Сделайте выводы о влиянии компенсации реактивной мощности нагрузки на потери активной мощности в линии электропередачи распределительной электрической сети и о возможности уменьшения этих потерь, определите

экономическую эффективность данного типа компенсации реактивной мощности.

### **Вопросы для самоконтроля**

- 1) Для чего применяется установка продольной компенсации реактивной мощности?
- 2) Перечислите преимущества применения установок продольной компенсации (УПК).
- 3) Какие виды защит устанавливаются на УПК?

## Лабораторная работа 8. Оценка влияния разницы напряжений на шинах центров питания на потери активной мощности в местной распределительной электрической сети, выполненной по петлевой (кольцевой) схеме, при ее работе в замкнутом режиме

На рисунке 8.1 представлена схема местной сети, выполненной по петлевой (кольцевой) схеме, обеспечивающей двухстороннее питание каждой трансформаторной подстанции.

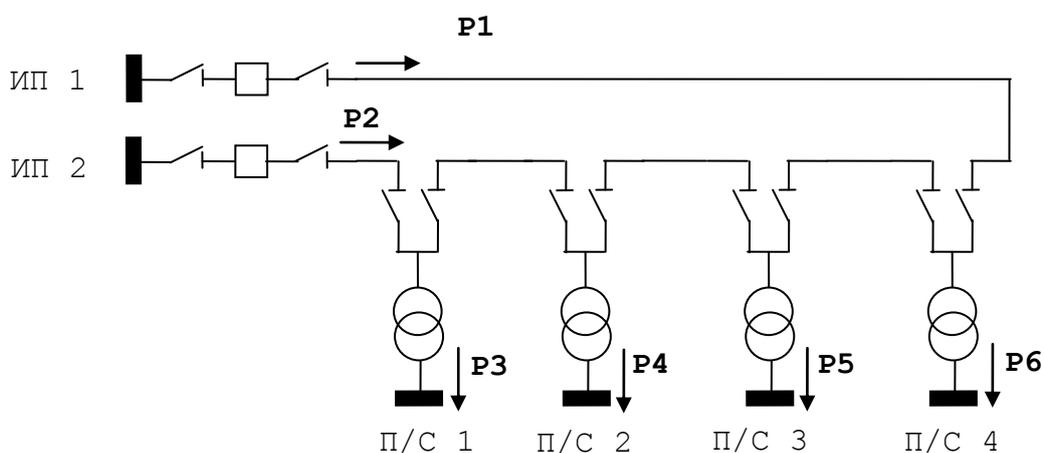


Рисунок 8.1

Источники питания (центры питания ИП 1 и ИП 2) такой сети являются независимыми и территориально могут находиться как в одном месте, так, и разнесены по территории электроснабжаемого района. Если напряжения источников отличаются друг от друга, то при работе такой сети в замкнутом режиме по линиям сети начинают протекать уравнивающие (паразитные) токи, которые создают дополнительные потери мощности (электроэнергии) и дополнительные потери напряжения, ухудшающие показатели качества электроэнергии.

**Цель работы:** Исследовать влияние разницы напряжений на шинах центров питания на потери активной мощности в местной распределительной электрической сети, выполненной по петлевой (кольцевой) схеме, при ее работе в замкнутом режиме.

## Порядок проведения работы

Для проведения работы используется схема (рисунок 8.2)

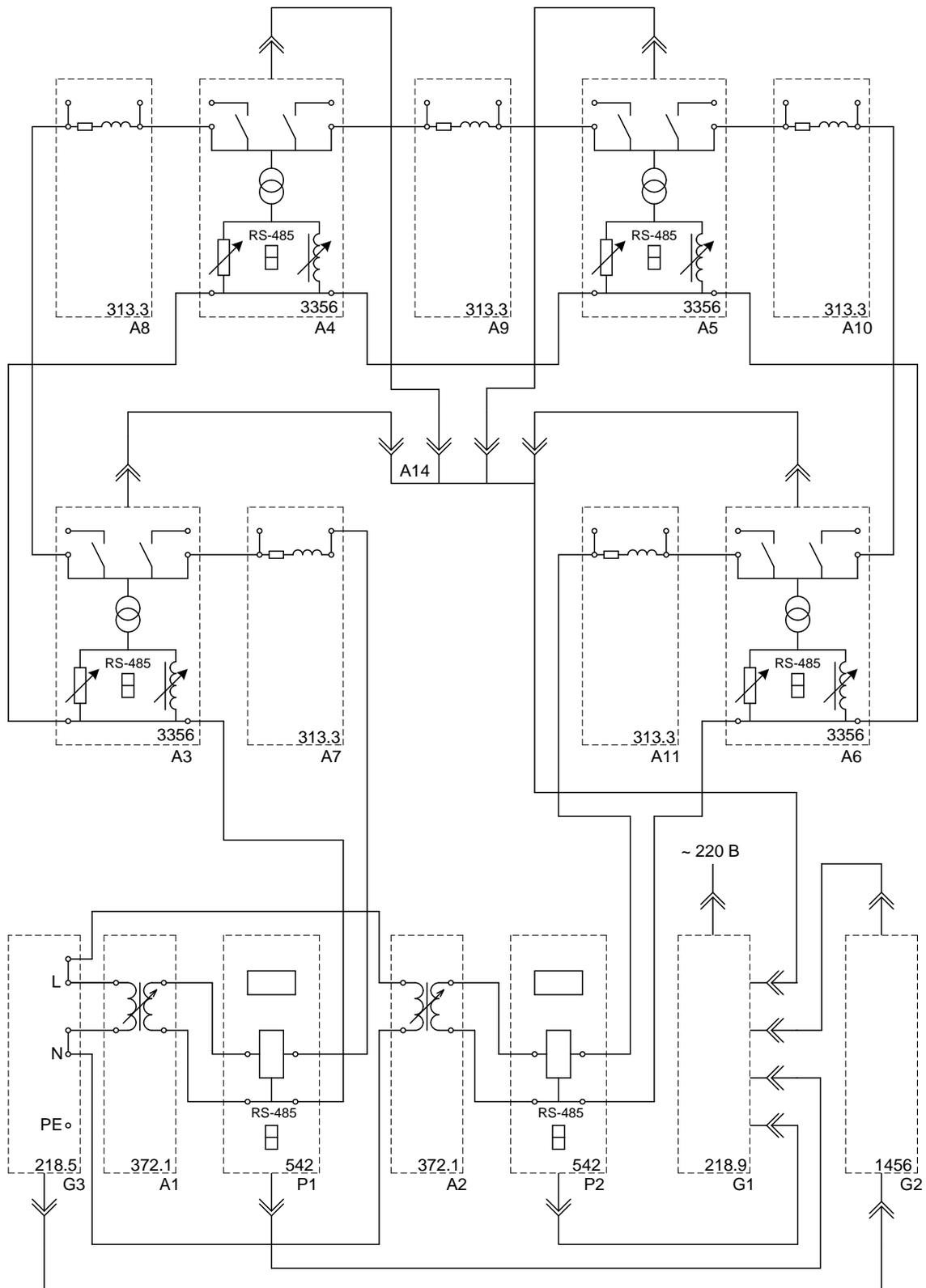


Рисунок 8.2

Перечень аппаратуры используемой в эксперименте приведен в таблице 8.1

Таблица 8.1

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218.9	~ 220 В / 16 А
G2	Источник бесперебойного питания	1456	1000 ВА ~ 230 В
G3	Однофазный источник питания	218.5	~ 220 В / 10 А
A1, A2	Однофазный трансформатор	372.1	80 ВА 220 / 198...242 В
A3...A6	Модель трансформаторной подстанции и нагрузки	3356	~ 220 В / 0...20 Вт / 0...20 ВАр
A7...A11	Модель линии электропередачи	313.3	~ 220 В / 0,3 А
A14	Удлинитель переносной четырехместный	-	~ 220 В / 16 А
P1, P2	Измеритель параметров однофазной сети	542	0...500 В / 0...5 А / 2500 ВА

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

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

2 Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рисунке 8.2.

3 Установите переключателями значения коэффициентов трансформации трансформаторов A1 и A2 равными 1,0. Это будет соответствовать режиму равенства напряжений в центрах питания сети.

4 Установите переключателями параметры активного сопротивления и индуктивности моделей A7...A11 линий электропередачи по заданию преподавателя.

5 Установите переключателями параметры нагрузок (активную и реактивную мощность) моделей A3...A6 по заданию преподавателя

6 Включите источник G1. О наличии напряжения на его выходе должна

сигнализировать светящаяся лампочка.

7 Включите выключатели «СЕТЬ» измерителей параметров P1, P2 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 С помощью измерителей P1 и P2 измерьте активные мощности  $P_1$  и  $P_2$ , поступающие в электрическую сеть соответственно через трансформаторы А1 и А2 первого и второго центров питания.

11 С помощью измерителей моделей трансформаторных подстанций А3...А6 измерьте соответствующие активные мощности  $P_3... P_6$ , потребляемые нагрузками этих подстанций.

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

$$\Delta P_1 = (P_1 + P_2) - (P_3 + P_4 + P_5 + P_6) \quad (8.1)$$

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

$$\Delta P_1^* = 100 \times \Delta P / (P_1 + P_2) \quad (8.2)$$

14 Отключите однофазный источник питания G3, источник бесперебойного питания G2, выключатели «СЕТЬ» измерителей параметров P1, P2 и моделей А3...А6, однофазный источник питания G1.

15 Установите переключателями значения коэффициентов трансформации трансформаторов А1 и А2 равными 1,0 и 0,9.

16 Включите источник G1.

17 Включите выключатели «СЕТЬ» измерителей параметров P1, P2 и моделей

A3...A6.

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

19 Включите однофазный источник питания G3.

20 Определите согласно пп. 10 - 13 настоящих указаний при разных коэффициентах трансформации трансформаторов A1 и A2 потерю активной мощности в электрической сети в относительных единицах (процентах)  $\Delta P^*_2$ .

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.

### **Вопросы для самоконтроля**

- 1) Что такое уравнивающая мощность (уравнивающий ток) в сети с двухсторонним питанием?
- 2) От чего зависит уравнивающий ток?
- 3) К каким последствиям приводит появление в сети уравнивающего тока?
- 4) Как снизить уравнивающий ток?
- 5) Можно ли избавиться от уравнивающего тока, отключив все нагрузки в сети?

## Лабораторная работа 9. Оценка влияния места разрыва (разреза) местной распределительной электрической сети, выполненной по петлевой схеме, на потерю в ней активной мощности

**Цель работы:** Исследовать влияние места разрыва (разреза) сети, выполненной по петлевой (кольцевой) схеме, на потерю в ней активной мощности.

В лабораторной работе моделируется сеть, представленная на рисунке 9.1. Для моделирования сети используется оборудование, приведенное в таблице 9.1.

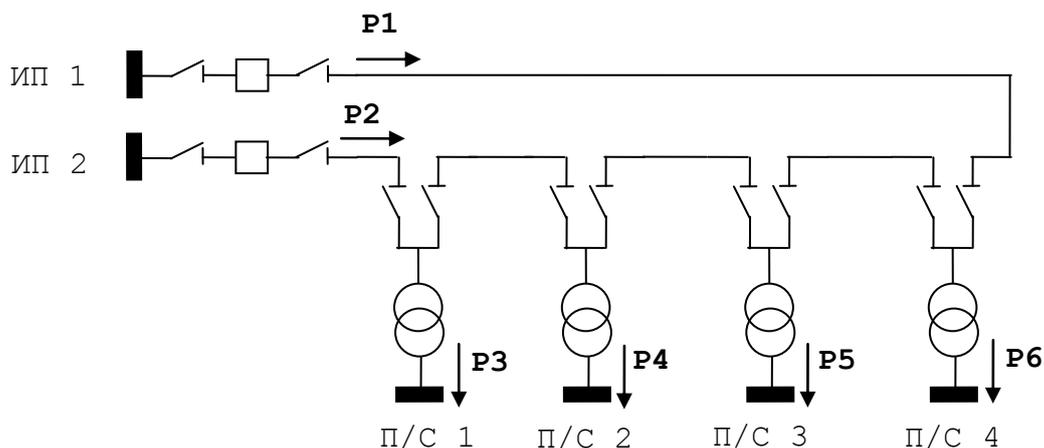


Рисунок 9.1

Таблица 9.1

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218.9	~ 220 В / 16 А
G2	Источник бесперебойного питания	1456	1000 ВА ~ 230 В
G3	Однофазный источник питания	218.5	~ 220 В / 10 А
A1, A2	Однофазный трансформатор	372.1	80 ВА 220 / 198...242 В
A3...A6	Модель трансформаторной подстанции и нагрузки	3356	~ 220 В / 0...20 Вт / 0...20 ВАр
A7...A11	Модель линии электропередачи	313.3	~ 220 В / 0,3 А
A14	Удлинитель переносной четырехместный	-	~ 220 В / 16 А
P1, P2	Измеритель параметров однофазной сети	542	0...500 В / 0...5 А / 2500 ВА

## Порядок проведения работы

Для проведения работы используется схема (рисунок 9.2)

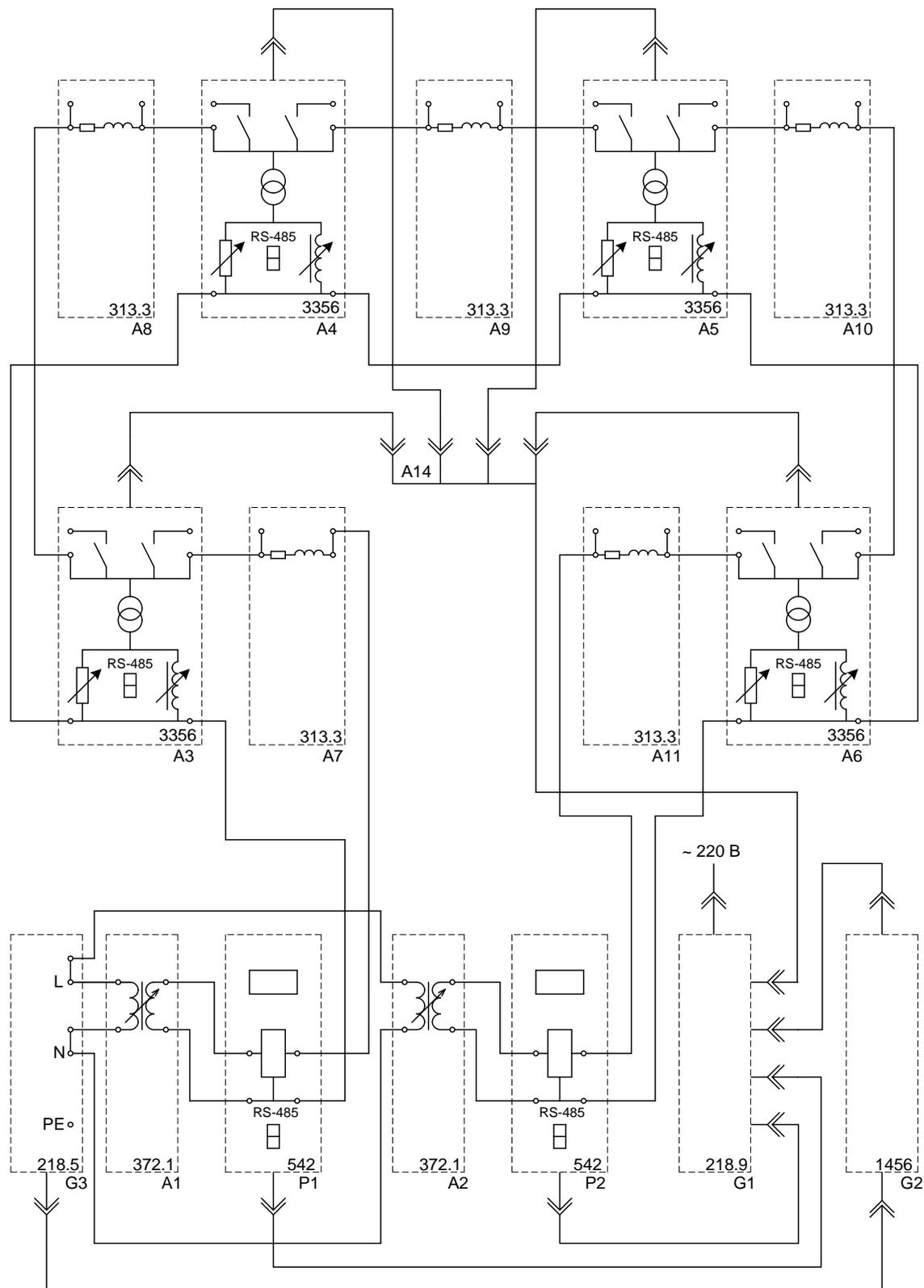


Рисунок 9.2

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

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

2 Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рисунке 8.2.

3 Установите переключателями значения коэффициентов трансформации трансформаторов A1 и A2 равными 1,0. Это будет соответствовать режиму равенства напряжений в центрах питания сети.

4 Установите переключателями параметры активного сопротивления и индуктивности моделей A7...A11 линий электропередачи по заданию преподавателя.

5 Установите переключателями параметры нагрузок (активную и реактивную мощность) моделей A3...A6 по заданию преподавателя

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...A6.

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.

*Определите потерю активной мощности в электрической сети в относительных единицах (процентах)  $\Delta P^*_1$  при разрыве (разрезе) электрической сети между моделью трансформаторной подстанции A3 и моделью линии электропередачи A7.*

10 Выполните разрыв (разрез) в электрической сети между моделью трансформаторной подстанции A3 и моделью линии электропередачи A7

11 С помощью измерителей P1 и P2 измерьте активные мощности  $P_1$  и  $P_2$ , поступающие в электрическую сеть соответственно через трансформаторы A1 и A2

первого и второго центров питания.

12 С помощью измерителей моделей трансформаторных подстанций А3...А6 измерьте соответствующие активные мощности  $P_3... P_6$ , потребляемые нагрузками этих подстанций.

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

$$\Delta P_1 = (P_1 + P_2) - (P_3 + P_4 + P_5 + P_6) \quad (9.1)$$

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

$$\Delta P^*_1 = 100 \times \Delta P / (P_1 + P_2) \quad (9.2)$$

*Определите 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. Для этого:*

Восстановите разрыв (разрез) в электрической сети между моделью трансформаторной подстанции А3 и моделью линии электропередачи А7.

Выполните разрыв (разрез) в электрической сети между моделью трансформаторной подстанции А4 и моделью линии электропередачи А8.

*Далее повторите пункты 11-14, заменив в выражениях 9.1 и 9.2  $\Delta P^*_1$  на  $\Delta P^*_2$ .*

*Определите 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. Для этого:*

Восстановите разрыв (разрез) в электрической сети между моделью трансформаторной подстанции А4 и моделью линии электропередачи А8.

Выполните разрыв (разрез) в электрической сети между моделью трансформаторной подстанции А4 и моделью линии электропередачи А9.

*Далее повторите пункты 11-14, заменив в выражениях 9.1 и 9.2  $\Delta P^*_1$  на  $\Delta P^*_3$ .*

Определите 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. Для этого:

Восстановите разрыв (разрез) в электрической сети между моделью трансформаторной подстанции А4 и моделью линии электропередачи А9.

Выполните разрыв (разрез) в электрической сети между моделью трансформаторной подстанции А5 и моделью линии электропередачи А10.

*Далее повторите пункты 11-14, заменив в выражениях 9.1 и 9.2  $\Delta P^*_1$  на  $\Delta P^*_4$ .*

Определите 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. Для этого:

Восстановите разрыв (разрез) в электрической сети между моделью трансформаторной подстанции А5 и моделью линии электропередачи А10.

Выполните разрыв (разрез) в электрической сети между моделью трансформаторной подстанции А6 и моделью линии электропередачи А11.

*Далее повторите пункты 11-14, заменив в выражениях 9.1 и 9.2  $\Delta P^*_1$  на  $\Delta P^*_5$ .*

Восстановите разрыв (разрез) в электрической сети между моделью трансформаторной подстанции А6 и моделью линии электропередачи А11.

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

*Определение точки нормального (оптимального) разрыва (разреза) в местной распределительной электрической сети, выполненной по петлевой схеме, по*

*критерию минимума потери активной мощности*

15) С помощью измерителей P1 и P2 измерьте полные мощности S1 и S2, поступающие в электрическую сеть соответственно через трансформаторы A1 и A2 первого и второго центров питания.

16) С помощью измерителей моделей трансформаторных подстанций A3...A6 измерьте соответствующие полные мощности S3... S6, потребляемые нагрузками этих подстанций.

17) Вычислите поток полной мощности от первого центра питания (трансформатора A1) по модели линии электропередачи A7 к модели подстанции и нагрузок A3 по выражению

$$S_{13} = \frac{(S_3(\mathbf{R}_8+\mathbf{R}_9+\mathbf{R}_{10}+\mathbf{R}_{11})+S_4(\mathbf{R}_9+\mathbf{R}_{10}+\mathbf{R}_{11})+S_5(\mathbf{R}_{10}+\mathbf{R}_{11})+S_6\mathbf{R}_{11})}{(\mathbf{R}_7+\mathbf{R}_8+\mathbf{R}_9+\mathbf{R}_{10}+\mathbf{R}_{11})} \quad (9.3)$$

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

$$S_{26} = \frac{(S_6(\mathbf{R}_7+\mathbf{R}_8+\mathbf{R}_9+\mathbf{R}_{10})+S_5(\mathbf{R}_7+\mathbf{R}_8+\mathbf{R}_9)+S_4(\mathbf{R}_7+\mathbf{R}_8)+S_3\mathbf{R}_7)}{(\mathbf{R}_7+\mathbf{R}_8+\mathbf{R}_9+\mathbf{R}_{10}+\mathbf{R}_{11})} \quad (9.4)$$

19) Вычислите поток полной мощности по модели линии электропередачи A8 от модели подстанции A3 к модели подстанции A4 по выражению

$$S_{34} = S_{13} - S_3 \quad (9.5)$$

20) Вычислите поток полной мощности по модели линии электропередачи A9 от модели подстанции A4 к модели подстанции A5 по выражению

$$S_{45} = S_{34} - S_4 \quad (9.6)$$

21) Вычислите поток полной мощности по модели линии электропередачи А10 от модели подстанции А5 к модели подстанции А6 по выражению

$$S_{56} = S_{45} - S_5 \quad (9.7)$$

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

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

24) В качестве точки нормального (оптимального) разрыва (разреза) электрической сети выберите точку, примыкающую к узлу потокораздела со стороны меньшего потока мощности и выполните в ней разрыв (разрез).

25) Определите потерю активной мощности в электрической сети в относительных единицах (процентах)  $\Delta P^*_0$  при разрыве (разрезе) электрической сети в точке нормального (оптимального) разрыва (разреза). Для этого *повторите пункты 11-14, заменив в выражениях 9.1 и 9.2  $\Delta P^*_1$  на  $\Delta P^*_0$ .*

26) По завершении эксперимента отключите источников  $G_2$ ,  $G_1$ ,  $G_3$ , выключатели «СЕТЬ» измерителей мощностей  $P_1$  и  $P_2$

Сделайте выводы.

### **Вопросы для самоконтроля**

- 1) Что такое точка потокораздела в замкнутой сети?
- 2) Как найти точку потокораздела ?
- 3) Какая сеть называется однородной.
- 4) Какими свойствами обладает однородная сеть
- 5) Какими способами можно снизить влияние неоднородности электрической сети
- 6) Как определить оптимальную точку размыкания

## Список рекомендуемой литературы

- 1 Евдокунин Г.А. Электрические системы и сети: Учебное пособие для вузов. – СПб: Из-во М.П.Сизова, 2004. – 304 с.
- 2 Фадеева, Г.А. Проектирование распределительных электрических сетей [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Г.А. Фадеева, В.Т. Федин; под общ. ред. В.Т. Федина. - Минск: Выш. шк., 2009. – 365 с.: ил. – ISBN 978-985-06-1597-8.
- 3 Идельчик В.И. Электрические системы и сети: учебник для вузов. – М.: ООО «Издательский дом Альянс», 2009. – 592 с.
- 4 Справочник по проектированию электрических сетей / Под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: ЭНАС, 2009. – 392 с.
- 5 Программные комплексы RastrWin, Bars, Lincor, Rustab, RastrKZ, RastrMDP [Электронный ресурс] / © «RastrWin», 1988-2014 – Режим доступа : <http://www.rastrwin.ru/> – Загл. с экрана.
- 6 СТО 02069024.101-2015 РАБОТЫ СТУДЕНЧЕСКИЕ. Общие требования и правила оформления.

## Приложение А

### Варианты заданий к лабораторной работе.

На рисунке А1 приведена схема электрической сети. Линии 1-2, 2-3, 3-4 и 1-4 имеют номинальное напряжение 110 кВ. Номинальное напряжение подстанций на стороне НН – 10 кВ. Напряжение на шинах источника питания – базисное напряжение,  $U_6 = 121$  кВ.

Варианты исходных данных приведены в таблицах А1 и А2.

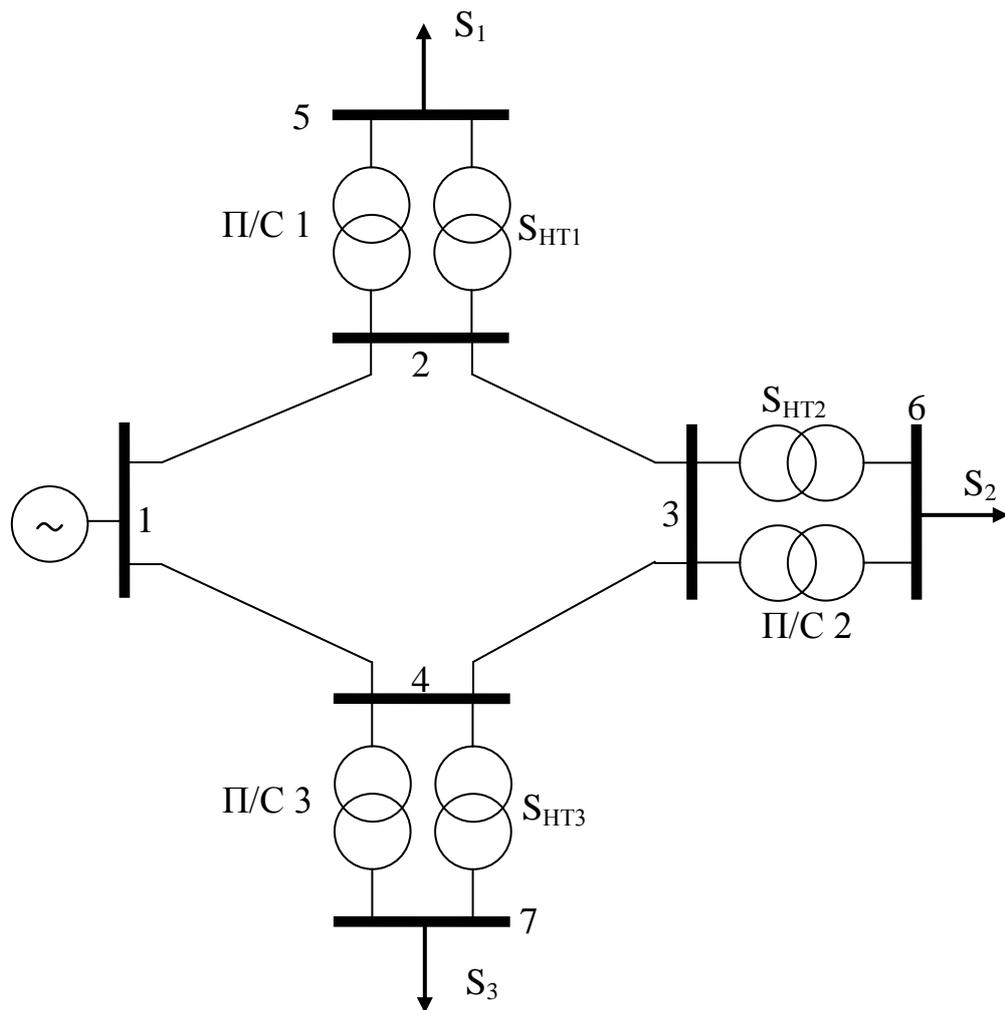


Рисунок А.1

Таблица А1 – Варианты исходных данных (нагрузки и трансформаторы)

№ варианта	$P_1$ , МВт	$Q_1$ , Мвар	$P_2$ , МВт	$Q_2$ , Мвар	$P_3$ , МВт	$Q_3$ , Мвар	$S_{HT1}$ , МВА	$S_{HT2}$ , МВА	$S_{HT3}$ , МВА
1	12	7	22	13	30	16	10	16	25
2	28	15	18	10	32	18	25	16	25
3	40	22	30	15	12	6	32	25	10
4	32	16	28	15	22	11	25	25	16
5	24	18	40	21	18	10	25	32	16
6	16	10	24	16	42	20	16	25	32
7	24	16	36	20	29	18	25	32	32
8	18	10	33	18	34	19	16	25	25
9	26	18	34	19	41	20	25	25	32
10	16	9	40	21	18	10	16	32	16
11	20	12	32	16	21	14	16	25	16
12	25	13	35	20	40	25	25	25	32
13	18	10	21	12	28	15	16	16	25
14	31	14	27	16	25	13	25	25	16
15	26	18	42	20	19	10	25	32	16
16	18	11	26	15	43	19	16	25	32
17	28	16	37	22	29	20	25	32	25
18	20	10	32	18	36	21	16	25	25
19	25	19	36	21	40	22	25	25	32
20	18	10	42	22	20	11	16	32	16

Таблица А2 - Варианты исходных данных (ЛЭП)

№ варианта	$l_{12}$ , км	$l_{23}$ , км	$l_{34}$ , км	$l_{14}$ , км	$F_{12}$ , мм <sup>2</sup>	$F_{23}$ , мм <sup>2</sup>	$F_{34}$ , мм <sup>2</sup>	$F_{14}$ , мм <sup>2</sup>
1	10	8	12	19	185	70	70	185
2	11	10	8	22	240	70	70	240
3	15	12	9	14	240	70	150	240
4	14	15	16	15	240	70	95	240
5	12	18	19	13	240	120	120	240
6	13	16	17	15	185	95	70	185
7	16	17	19	18	240	120	95	240
8	17	18	16	19	240	120	70	240
9	18	12	13	20	240	120	70	240
10	12	18	16	14	240	120	120	240
11	13	15	19	13	240	95	70	185
12	15	18	21	18	240	150	70	240
13	17	11	17	21	240	120	70	185
14	16	16	15	15	240	70	95	240
15	22	19	14	12	240	120	120	240
16	23	16	19	13	185	95	70	185
17	26	19	10	16	240	120	95	240
18	27	38	15	29	240	120	70	240
19	38	32	23	40	240	120	70	240
20	52	28	36	14	240	120	120	240

## Приложение Б Справочные данные

Таблица Б1 - Справочные данные трехфазных трансформаторов 110 кВ

Тип	$S_n$ , кВА	Пределы регулиру- вания РПН, $\pm m \times \Delta U_{ст}$ %	$U_{ВН}$ , кВ	$U_{НН}$ , кВ	$U_K$ %	$\Delta P_K$ , кВт	$\Delta P_{ХХ}$ , кВт	$I_{ХХ}$ , %
ТМН- 2500/110	2500	$\pm 8 \times 1,5\%$	110	11	10,5	22	5	1,5
ТМН- 6300/110	6300	$\pm 9 \times 1,78\%$	115	11	10,5	50	10	1,0
ТДН- 10000/110	10000	$\pm 9 \times 1,78\%$	115	11	10,5	60	14	0,9
ТДН- 16000/110	16000	$\pm 9 \times 1,78\%$	115	11	10,5	85	21	0,85
ТРДН- 25000/110	25000	$\pm 9 \times 1,78\%$	115	10,5	10,5	120	29	0,8
ТРДН- 32000/110	32000	$\pm 9 \times 1,78\%$	115	10,5	10,5	145	35	0,75
ТРДН- 40000/110	40000	$\pm 9 \times 1,78\%$	115	10,5	10,5	175	42	0,7
ТРДН- 80000/110	80000	$\pm 9 \times 1,78\%$	115	10,5	10,5	315	70	0,6

Таблица Б.2 - Справочные данные ВЛ 110 кВ со сталеалюминевыми проводами (марки АС)

Сечение провода, $мм^2$	$I_{доп}$ , А	$r_0$ , Ом/км	$x_0$ , Ом/км	$b_0$ , мкСм/км
70	265	0,42	0,44	2,58
95	330	0,314	0,42	2,65
120	380	0,249	0,423	2,69
150	445	0,195	0,416	2,74
185	510	0,156	0,409	2,82
240	610	0,12	0,401	2,85
300	690	0,098	0,392	2,91

Таблица Б.3 – коэффициенты аппроксимации моделей нагрузки

Тип модели	$p_0$	$p_1$	$p_2$	$q_0$	$q_1$	$q_2$
Постоянной мощности	1	0	0	1	0	0
Постоянного тока	0	1	0	0	1	0
Постоянной проводимости	0	0	1	0	0	1
Типовая СХН 6,10 кВ	0,83	-0,3	0,47	4,9	-10,1	6,2

## Приложение В Исходные данные

Таблица В.1 - Варианты исходных данных

№ варианта	Тип трансформатора	Максимальная нагрузка, $P+jQ$ кВА	Длина линии, $l$ , км	Марка провода
1	ТМ-100/35	$120 + j90$	2	АС-70
2	ТМ -100/35	$140 + j100$	4	АС-70
3	ТМ -160/35	$250 + j110$	6	АС-70
4	ТМ -160/35	$190 + j120$	8	АС-95
5	ТМ -250/35	$350 + j170$	3	АС-95
6	ТМ -250/35	$420 + j140$	5	АС-70
7	ТМ -400/35	$400 + j200$	7	АС-70
8	ТМ -400/35	$520 + j160$	1	АС-70
9	ТМ -630/35	$800 + j200$	2	АС-95
10	ТМ -630/35	$960 + j300$	3	АС-95
11	ТМ-1000/35	$1000 + j800$	10	АС-70
12	ТМ -1000/35	$1400 + j600$	12	АС-70
13	ТМ -1600/35	$2100 + j1000$	14	АС-70
14	ТМ -1600/35	$1800 + j1400$	16	АС-95
15	ТМ -2500/35	$3400 + j1700$	18	АС-95
16	ТМ -2500/35	$4000 + j1500$	20	АС-120
17	ТМ -4000/35	$4200 + j2000$	22	АС-120
18	ТМ -4000/35	$5400 + j1700$	24	АС-150
19	ТМ -6300/35	$8000 + j2000$	23	АС-150
20	ТМ -6300/35	$9400 + j3000$	21	АС-150

Таблица В.2 – Справочные данные трехфазных двухобмоточных трансформаторов

Марка	S <sub>нт</sub> , кВА	Пределы регулирования	U <sub>н</sub> , кВ		U <sub>к</sub> , %	ΔP <sub>к</sub> , кВт	ΔP <sub>х</sub> , кВт	I <sub>хх</sub> , %
			ВН	НН				
ТМ-100/35	100	±2*1,5	35	0,4	6,5	1,9	0,5	2,6
ТМ-160/35	160	±2*1,5	35	0,4;0,69	6,5	2,6	0,7	2,4
ТМ-250/35	250	±2*1,5	35	0,4;0,69	6,5	3,7	1,0	2,3
ТМ-400/35	400	±6*1,5	35	0,4;0,69	6,5	8,5	1,9	2,0
ТМ-630/35	630	±6*1,5	35	0,4;0,69; 6,3;11	6,5	12,2	2,7	1,5
ТМ-1000/35	1000	±6*1,5	35	0,4;0,69; 6,3;11	6,5	18	3,6	1,4
ТМ-1600/35	1600	±6*1,5	35	6,3;11	6,5	26	5,1	1,1
ТМ-2500/35	2500	±6*1,5	35	6,3;11	6,5	26	5,1	1,1
ТМ-4000/35	4000	±6*1,5	35	6,3;11	7,5	33,5	6,7	1,0
ТМ-6300/35	6300	±6*1,5	35	6,3;11	7,5	46,5	9,2	0,9

Таблица В.3 - Справочные данные ВЛ 35 кВ

Марка	R <sub>0</sub> , Ом/км	X <sub>0</sub> , Ом/км
АС-70/11	0,428	0,432
АС-95/16	0,306	0,421
АС-120/19	0,249	0,414
АС-150/24	0,198	0,406

## Приложение Г Варианты заданий

Таблица Г.1

№ варианта	Номер рисунка
1	Г.1
2	Г.2
3	Г.3
4	Г.4
5	Г.5
6	Г.6
7	Б.7
8	Г.8
9	Г.9
10	Г.10
11	Г.1
12	Г.2
13	Г.3
14	Г.4
15	Г.5
16	Г.6
17	Г.7
18	Г.8
19	Г.9
20	Г.10

## Зимние и летние графики нагрузок различных отраслей промышленности

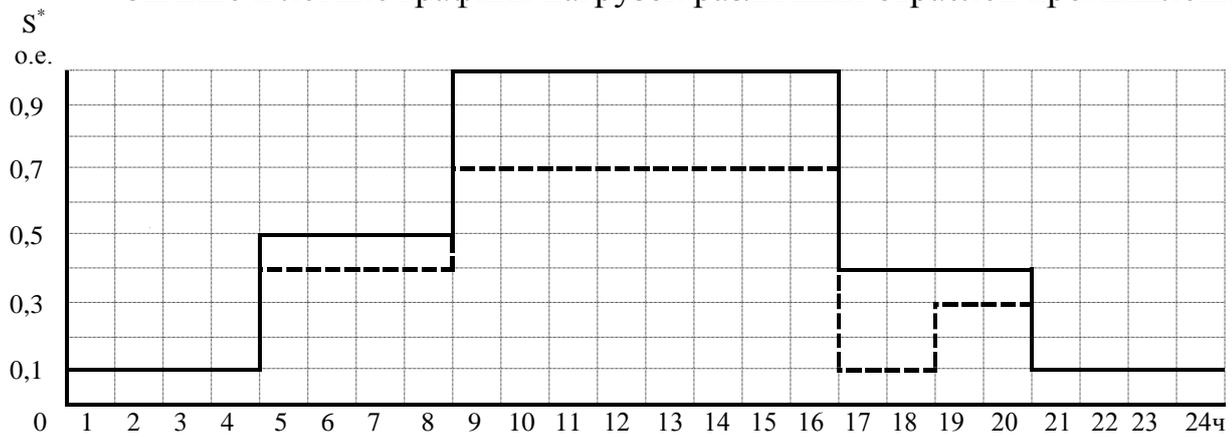


Рисунок Г.1 – Графики нагрузки пищевой промышленности

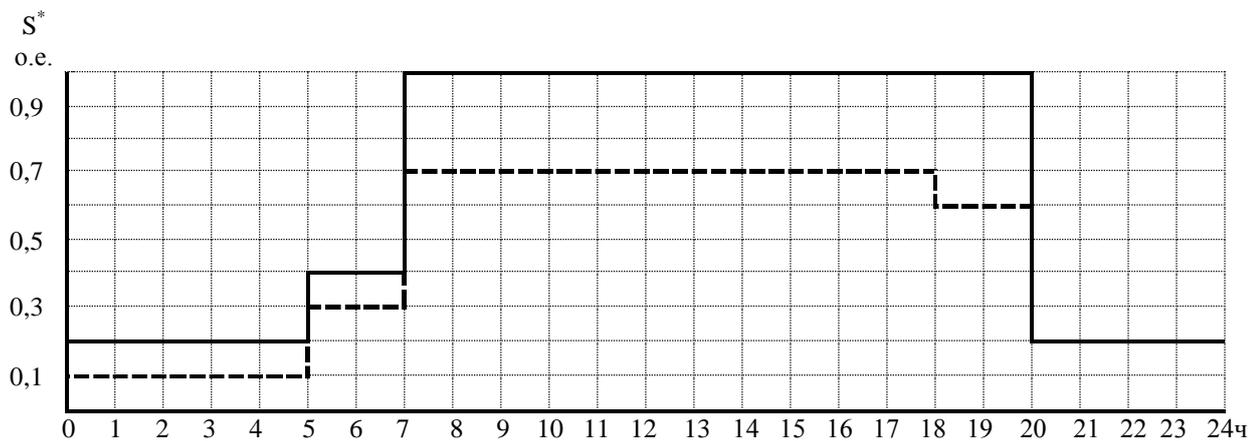


Рисунок Г.2- Графики нагрузки химической промышленности

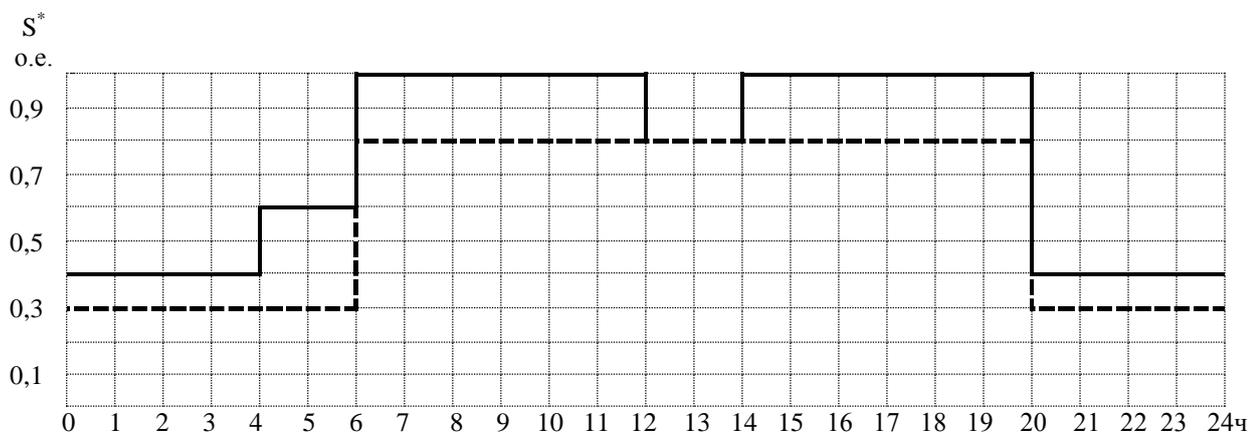


Рисунок Г.3 - Графики нагрузки резинотехнической промышленности



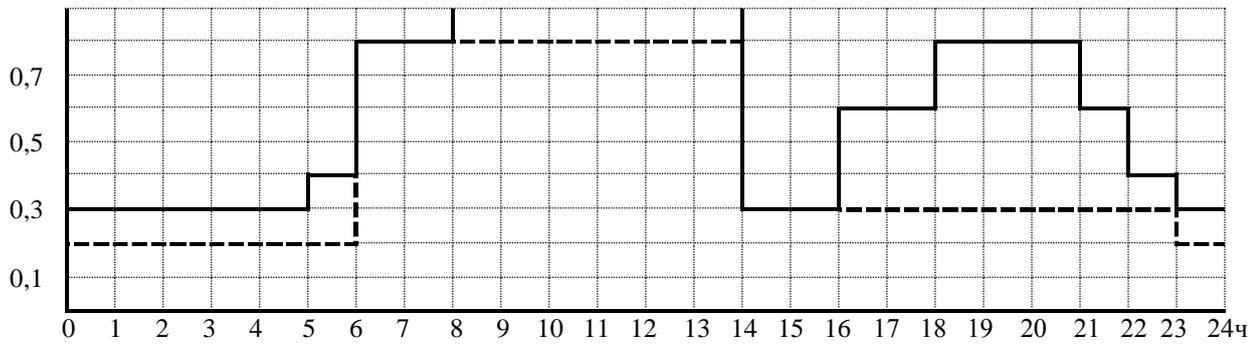


Рисунок Г.4 - Графики нагрузки металлообрабатывающей промышленности

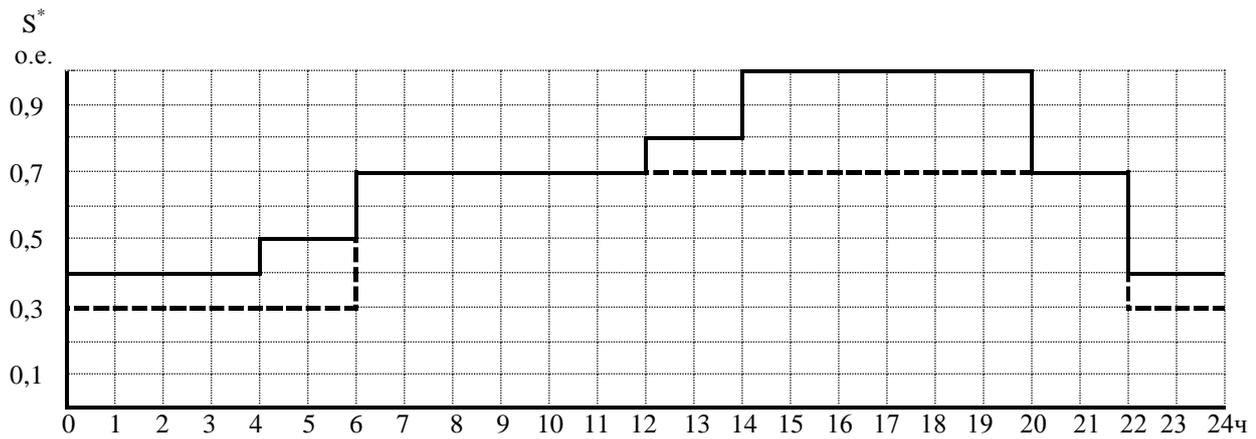


Рисунок Г.5 - Графики нагрузки бумажной промышленности

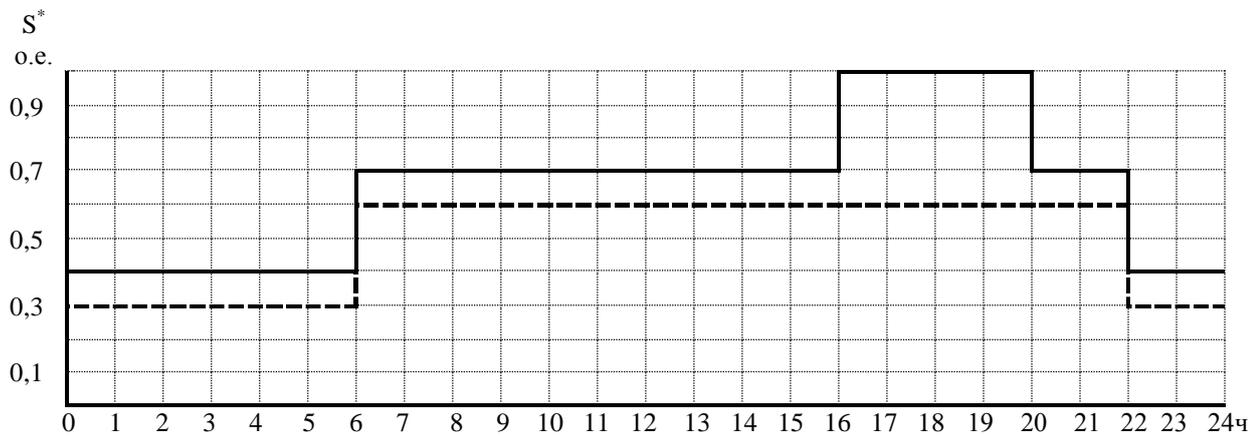
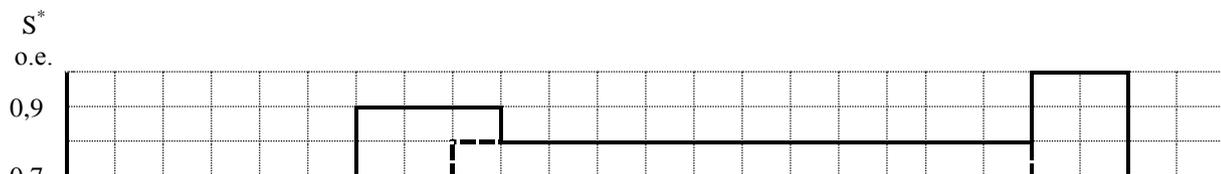


Рисунок Г.6 - Графики нагрузки легкой промышленности



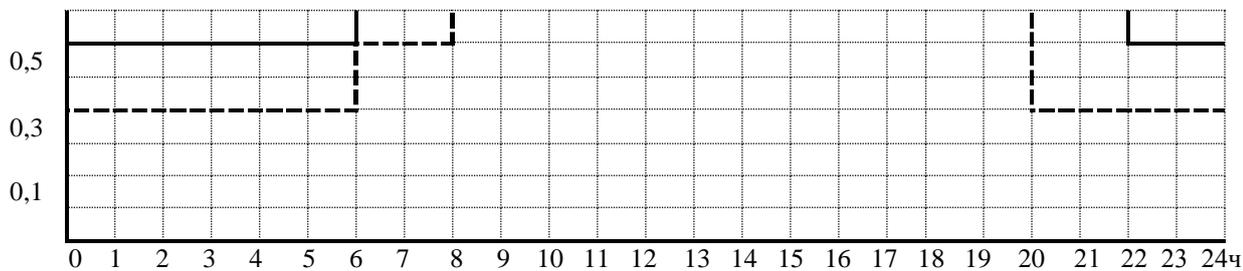


Рисунок Г.7 - Графики нагрузки предприятий черной металлургии

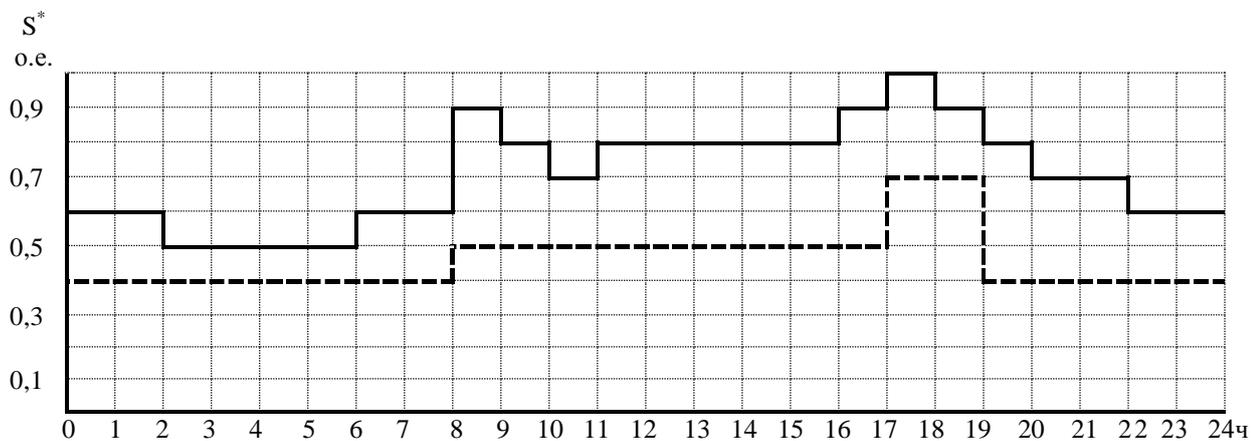


Рисунок Г.8 - Графики нагрузки предприятий тяжелого машиностроения

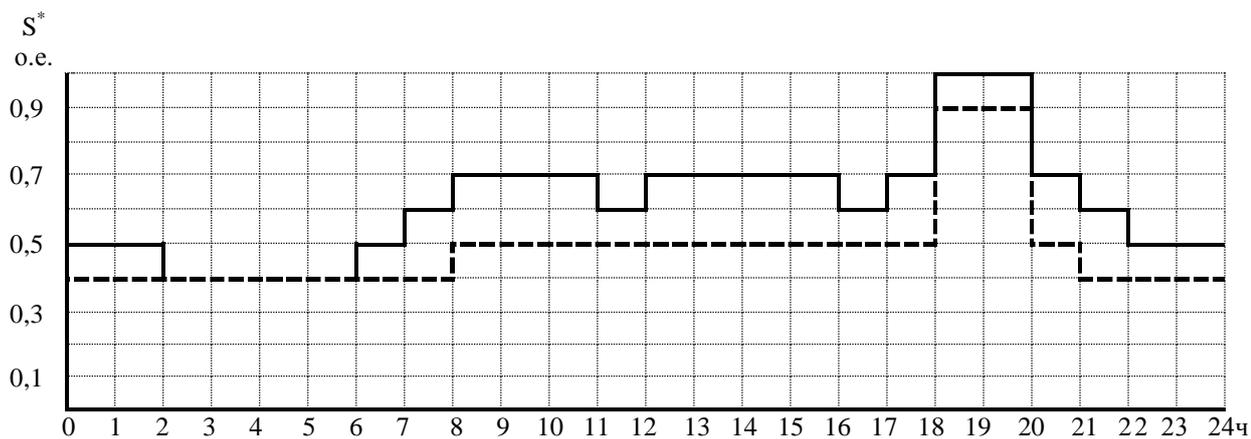
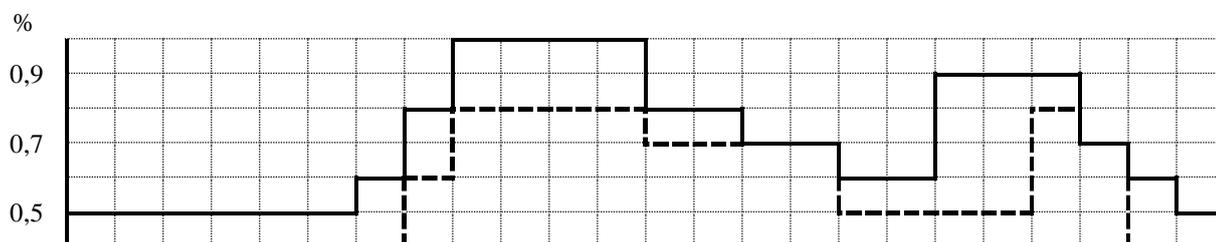


Рисунок Г.9 - Графики нагрузки предприятий цветной металлургии



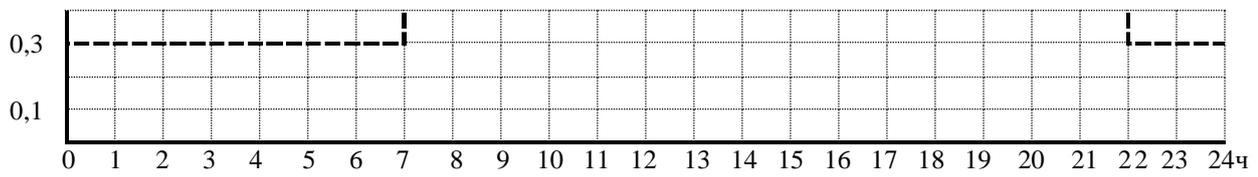


Рисунок Г.10 - Графики нагрузки деревообрабатывающей промышленности

Примечание: Условные обозначения на рисунках Г.1 – Г.10

- зимний суточный график
- - - - - летний суточный график

## **Приложение Д**

### **Правила техники безопасности**

#### **1 Допуск к лабораторной работе**

1.1) К выполнению лабораторной работы допускаются студенты прошедшие инструктаж по технике безопасности, о чем свидетельствует роспись в журнале инструктажа по технике безопасности на рабочем месте.

1.2) К выполнению лабораторной работы допускаются студенты, ознакомившиеся с методическими указаниями по выполняемой лабораторной работе после проверки преподавателем знаний о целях, задачах и ходе выполнения лабораторной работы.

1.3) Выполнять лабораторную работу разрешается только после проверки схемы преподавателем и получения его разрешения на выполнение работы.

#### **2 ЗАПРЕЩАЕТСЯ**

2.1) Приступать к выполнению лабораторной работы без проверки схемы преподавателем и получения его разрешения на выполнение работы.

2.2) Выполнять лабораторную работу при нахождении в зоне лабораторного стенда (расстояние вытянутой руки) лиц, не выполняющих или не допущенных к работе со стендом.

2.3) Располагаться и включать стенд при нахождении членов бригады сбоку или сзади стенда.

2.4) Выполнять коммутации блоков стенда, находящихся под напряжением.

2.5) Оставлять без наблюдения установку, находящуюся под напряжением.

2.6) Загромождать рабочее место посторонними предметами.

## **Приложение Е**

### **Требования к оформлению отчета**

Отчет оформляется на листах формата А4. Отчет должен соответствовать стандарту организации [6].

В отчете обязательно должны присутствовать следующие элементы:

- название лабораторной работы;
- цель работы;
- задачи;
- электрическая схема (схемы), с которой выполняются эксперименты;
- сведения об используемых измерительных приборах;
- таблица экспериментальных данных;
- необходимые вычисления;
- выводы.

К отчету допускается прилагать дополнительные материалы.

## Приложение Ж

### Описание электрооборудования, применяемого в лабораторных работах

#### Активная нагрузка А4

Активная нагрузка А4 (далее - нагрузка) предназначена для моделирования однофазных потребителей активной мощности с регулированием вручную. Нагрузка допускает работу при температурах от +10 до +35°C и относительной влажности воздуха до 80% при 25°C.

#### *Технические характеристики*

1. Потребляемая мощность, Вт, не более 30
2. Число фаз 1
3. Дискретность регулирования потребляемой мощности одной фазой, % 10
4. Номинальное напряжение, В 220
5. Номинальная частота напряжения, Гц 50
6. Защита фазы от перегрузки по току осуществляется предохранителем с номинальным током, А 0,16
7. Класс защиты от поражения электрическим током I

#### *Устройство и принцип работы*

Конструктивно нагрузка выполнена в виде коробки с лицевой панелью и кожухом. На лицевой панели нанесена электрическая мнемосхема соединений нагрузки и в соответствии с ней размещены предохранитель в держателе, гнезда для присоединения внешних устройств и защитного заземления и рукоятка переключателя для изменения активного сопротивления нагрузки.

В качестве рабочих элементов нагрузки применены постоянные металлодиэлектрические резисторы.

Перед эксплуатацией нагрузки соедините ее гнездо защитного заземления, обозначенное символом “⊕”, с гнездом “РЕ” источника питания.

### **Модель линии электропередачи АЗ**

Модель линии электропередачи АЗ (далее – модель) предназначена для моделирования линий электропередачи переменного и постоянного тока. Модель допускает работу при температурах от +10 до +35°С и относительной влажности воздуха до 80% при 25°С.

#### *Технические характеристики*

1. Номинальное напряжение, В 220
2. Номинальный ток, А 0,3
3. Номинальная частота тока, Гц 50
4. Число фаз 1
5. Индуктивность/активное сопротивление фазы, Гн/Ом 0...0,3/0..100
6. Класс защиты от поражения электрическим током 01

#### *Устройство и принцип работы*

Конструктивно модель выполнена в виде коробки с лицевой панелью и кожухом. На лицевой панели нанесена мнемосхема электрическая соединений модели и в соответствии с ней размещены гнезда для присоединения внешних устройств и переключатели для изменения параметров модели.

В качестве рабочих элементов в модели использованы резисторы и дроссель.

Перед эксплуатацией модели соедините ее гнездо защитного заземления, обозначенное символом “⊕”, с гнездом “РЕ” источника питания.

### **Устройство продольной емкостной компенсации А13**

Устройство продольной емкостной компенсации А13 (далее - устройство) предназначено для моделирования устройства продольной емкостной компенсации линии электропередачи. Устройство допускает работу при температурах от +10 до +35°С и относительной влажности воздуха до 80% при 25°С.

#### *Технические характеристики*

1. Емкость фазы, мкФ 0, 47, 94, 141, 188
2. Число фаз 1
3. Номинальный ток фазы, А 0,3

4. Номинальное напряжение изоляции фазы, В400
- 2.5. Номинальная частота напряжения, Гц 50
- 2.6. Класс защиты от поражения электрическим током 0I

Конструктивно устройство выполнено в виде коробки с лицевой панелью и кожухом. На лицевой панели нанесена мнемосхема электрическая соединений устройства и в соответствии с ней размещены гнезда для присоединения внешних устройств, а также рукоятка переключателя для изменения емкости устройства и гнездо защитного заземления.

В качестве рабочих элементов устройства использованы полиэтилентерефталатные конденсаторы.

Перед эксплуатацией устройства соедините его гнездо защитного заземления, обозначенное символом “⊕”, с гнездом “РЕ” источника питания.

### **Емкостная нагрузка А12**

Емкостная нагрузка А12 (далее - нагрузка) предназначена для моделирования однофазных источников реактивной мощности. Нагрузка допускает работу при температурах от +10 до +35°C и относительной влажности воздуха до 80% при 25°C.

Технические характеристики

1. Генерируемая мощность, В·Ар, не более 30
2. Число фаз 1
3. Дискретность регулирования потребляемой мощности одной фазой, % 10
4. Номинальное напряжение, В 220
5. Номинальная частота напряжения, Гц 50
6. Защита фазы от перегрузки по току осуществляется предохранителем с номинальным током, А 0,16
7. Класс защиты от поражения электрическим током I

Конструктивно нагрузка выполнена в виде коробки с лицевой панелью и кожухом. На лицевой панели нанесена электрическая мнемосхема соединений нагрузки и в соответствии с ней размещены предохранитель в держателе, гнезда для присоединения внешних устройств и защитного заземления и рукоятка

переключателя для изменения емкости фаз нагрузки.

В качестве рабочих элементов нагрузки применены полиэтилентерефталатные конденсаторы постоянной емкости.

Перед эксплуатацией нагрузки соедините ее гнездо защитного заземления, обозначенное символом “⊕”, с гнездом “РЕ” источника питания.

### **Регулируемый автотрансформатор А9**

Регулируемый автотрансформатор А9 (далее - автотрансформатор) предназначен для преобразования однофазного нерегулируемого напряжения промышленной частоты в однофазное регулируемое напряжение той же частоты. Автотрансформатор допускает работу при температурах от +10 до +35°C и относительной влажности воздуха до 80% при 25С.

Технические характеристики

1. Число фаз 1
2. Номинальная мощность, В-А 500
3. Номинальное напряжение, В:
  - первичной обмотки 220;
  - вторичной обмотки 0...240.
4. Частота напряжения, Гц 50-0,5
5. Класс защиты от поражения электрическим током 01
6. Защита от перегрузки по току

Конструктивно автотрансформатор выполнен в виде коробки с лицевой панелью и кожухом. На лицевой панели нанесена электрическая мнемосхема соединений автотрансформатора и в соответствии с ней размещены регулировочная рукоятка, гнезда для присоединения внешних устройств и защитного заземления, предохранитель в держателе, вольтметр для контроля выходного напряжения.

Основным рабочим элементом является встроенный лабораторный регулируемый автотрансформатор.

Перед эксплуатацией автотрансформатора соедините его гнездо защитного заземления, обозначенное символом “⊕”, с гнездом “РЕ” трехфазного источника

питания.

### **Индуктивная нагрузка А6**

Индуктивная нагрузка А6 (далее - нагрузка) предназначена для моделирования однофазных потребителей реактивной мощности с регулированием вручную. Нагрузка допускает работу при температурах от +10 до +35°C и относительной влажности воздуха до 80% при 25°C.

Технические характеристики

1. Потребляемая мощность,  $V \cdot A_r$ , не более 30
2. Число фаз 1
3. Дискретность регулирования потребляемой мощности одной фазой, % 10
4. Номинальное напряжение, В 220
5. Номинальная частота напряжения, Гц 50
6. Защита фазы от перегрузки по току осуществляется предохранителем с номинальным током, А 0,25
7. Класс защиты от поражения электрическим током I

Конструктивно нагрузка выполнена в виде коробки с лицевой панелью и кожухом. На лицевой панели нанесена электрическая мнемосхема соединений нагрузки и в соответствии с ней размещены предохранитель в держателе, гнезда для присоединения внешних устройств и защитного заземления, рукоятка переключателя для изменения индуктивности фазы нагрузки.

В качестве рабочего элемента нагрузки применен дроссель.

Перед эксплуатацией нагрузки соедините ее гнездо защитного заземления, обозначенное символом  $\oplus$ , с гнездом "РЕ" источника питания.

### **Автоматический однополюсный выключатель**

Автоматический однополюсный выключатель (далее – выключатель) предназначен для коммутации электрических цепей. Выключатель допускает работу при температурах от +10 до +35°C и относительной влажности воздуха до 80% при 25°C.

#### Технические характеристики

1. Номинальное напряжение, В 230
2. Номинальный ток, А 0,5
3. Число полюсов 1
4. Класс защиты от поражения электрическим током 01

Конструктивно выключатель выполнен в виде коробки с лицевой панелью и кожухом. На лицевой панели нанесена мнемосхема электрическая соединений выключателя и в соответствии с ней размещены собственно выключатель и гнезда для присоединения внешних устройств.

В качестве рабочего элемента использован выключатель S231 RC10.

Перед эксплуатацией выключателя соедините его гнездо защитного заземления, обозначенное символом “⊕”, с гнездом “РЕ” трехфазного источника питания.

#### **Однофазный трансформатор**

Однофазный трансформатор (далее - трансформатор) предназначен для трансформирования напряжения однофазного тока промышленной частоты. Трансформатор допускает работу при температурах от +10 до +35°C и относительной влажности воздуха до 80% при 25°C.

#### Технические характеристики

1. Количество фаз 1
2. Номинальная мощность трансформатора, ВА 80
3. Номинальное напряжение, В
  - первичной обмотки 220;
  - вторичной обмотки 198...242.
4. Регулирование коэффициента трансформации дискретное
5. Частота напряжения, Гц 50
6. Ток холостого хода трансформатора, А, не более 0,03
7. Класс защиты от поражения электрическим током 01

Конструктивно трансформатор выполнен в виде коробки с лицевой панелью и

кожухом. На лицевой панели нанесена мнемосхема электрическая соединений трансформатора и в соответствии с ней размещены гнезда, соединенные с выводами обмоток трансформатора, гнездо защитного заземления и переключатель коэффициента трансформации.

Рабочим элементом трансформатора являются классический однофазный двухобмоточный трансформатор.

Перед эксплуатацией трансформатора соедините его гнездо защитного заземления, обозначенное символом “⊕”, с гнездом “РЕ” источника питания.

### **Одноклавишный выключатель**

Одноклавишный выключатель (далее – выключатель) предназначен для коммутации электрической цепи. Выключатель допускает работу при температурах от +10 до +35°C и относительной влажности воздуха до 80% при 25°C.

Технические характеристики

1. Номинальное напряжение переменного тока, В 220
2. Номинальный ток, А 10
3. Число полюсов 1
4. Класс защиты от поражения электрическим током 0

Конструктивно выключатель выполнен в виде коробки с лицевой панелью и кожухом. На лицевой панели нанесена мнемосхема электрическая соединений выключателя и в соответствии с ней размещен собственно выключатель и гнезда для присоединения внешних устройств.

В качестве рабочего элемента использован одноклавишный выключатель для скрытой установки фирмы «Wessen».

### **Переключатель**

Переключатель предназначен для коммутации электрических цепей. Переключатель допускает работу при температурах от +10 до +35°C и относительной влажности воздуха до 80% при 25°C.

Технические характеристики

1. Номинальное напряжение переменного тока, В 220
2. Номинальный ток, А 6
3. Число полюсов 1
4. Класс защиты от поражения электрическим током 0

Конструктивно переключатель выполнен в виде коробки с лицевой панелью и кожухом. На лицевой панели нанесена мнемосхема электрическая соединений выключателя и в соответствии с ней размещен собственно переключатель и гнезда для присоединения внешних устройств.

В качестве рабочего элемента использован переключатель для скрытой установки фирмы «Wessen».

#### **Электророзетка с заземляющими контактами**

Электророзетка с заземляющими контактами (далее - электророзетка) предназначена для коммутации электрической цепи. Электророзетка допускает работу при температурах от +10 до +35°C и относительной влажности воздуха до 80% при 25°C.

Технические характеристики

1. Номинальное напряжение переменного тока, В 220
2. Номинальный ток, А 16
3. Класс защиты от поражения электрическим током 0

Конструктивно электророзетка выполнена в виде коробки с лицевой панелью и кожухом. На лицевой панели нанесена мнемосхема электрическая соединений электророзетки и в соответствии с ней размещена собственно электророзетка и гнезда для присоединения внешних устройств.

В качестве рабочего элемента использована электророзетка для скрытой установки РС16-264.