

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ИСЛАМА КАРИМОВА

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ И СИСТЕМЫ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным работам



ТАШКЕНТ – 2019

Методические указания к лабораторным работам по курсу «Электрические сети и системы»/: Сост: Гайибов Т.Ш., Пулатов Б.М., Нурматов О.Ё., Мусинова Г.Ф. - Ташкент: ТашГТУ, 2019 - 68 с.

В методических указаниях приведены необходимые материалы к лабораторным работам по электрическим сетям и системам, о также необходимые теоретические материалы, принцип и порядок работ в лаборатории, порядок оформления отчёта, контрольные вопросы и варианты заданий для самостоятельного выполнения.

Приведенные задания по лабораторным работам охватывают все вопросы, изучаемые в соответствии с программой данного курса.

Данные методические указания разработаны для студентов направления 5310200 – Электроэнергетика (производство, передача и распределение электроэнергии).

Печатаются по решению научно-методическим совета ТашГТУ.

Рецензенты: к.т.н., доц. Таслимов А.Д. (ТашГТУ);
к.т.н., доц. Мирзаев А.Т. (АО «Узбекэнерго»)

ВВЕДЕНИЕ

При выполнении лабораторных работ по дисциплине «Электрические сети и системы» студенты закрепляют, углубляют и обобщают теоретические вопросы и практические навыки проектирования, расчета и анализа режимов электрических сетей. Лабораторные работы проводятся виртуально на компьютере.

Общая задача, возникающая при проектировании систем передачи и распределения электроэнергии, заключается в выборе наиболее рациональных технических решений и в выборе наилучших параметров этих решений. При этом приходится решать следующие наиболее характерные задачи:

- выбор конфигурации электрической сети и ее конструктивного исполнения (воздушная, кабельная);
- выбор числа цепей каждой из линий и числа трансформаторов подстанций;
- выбор номинального напряжения линий;
- выбор материала и площади сечений проводов линий;
- схемы замещения элементов электроэнергетических систем и электрических сетей и их параметры;
- расчет режимов работы электрических сетей;
- регулирование напряжения и частоты в электроэнергетической системе;
- потери мощности и электроэнергии в электрических сетях электроэнергетических систем;
- регулирование напряжения в электроэнергетической системе с использованием современных компьютерных технологий;
- обоснование средств повышения экономичности функционирования электрической сети.

Настоящие методические указания позволяют применять педагогические технологий на лабораторных занятиях в подгруппах по темам исследования нормальных режимов электрических систем, расчет нормального режима электрической сети методами Гаусса-Зейделя и Ньютона-Рафсона, регулирование напряжения и компенсация реактивной мощности в электрических сетях.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ИССЛЕДОВАНИЕ НОРМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Цель работы: исследование нормального режима электрических систем.

1.1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Электрическая система состоит из линейных, трансформаторных и емкостных элементов, предназначенных для имитации ЛЭП, трансформаторов и реакторов энергосистемы, нагрузочных элементов.

Все элементы могут быть соединены между собой в соответствии со схемой исследуемой сети. С помощью измерительных приборов в любой точке набранной схемы могут быть измерены: ток, напряжение, активная и реактивная мощности, соответствующие в принятом масштабе этим величинам в реальной системе.

1.1.1. Составление эквивалентной схемы замещения электрических систем

Подготовка исходных данных заключается, прежде всего, в определении параметров всех элементов рассчитываемой системы линий, трансформаторов, нагрузок. На основании этих данных составляется схема замещения сети.

Схема замещения ЛЭП представляется П - образной схемой замещения:

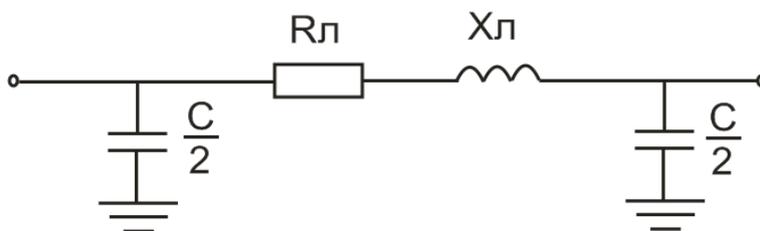


Рис. 1.1. Схема замещения ЛЭП

Определение параметров схемы замещения линий электропередачи осуществляется на основании сведений о нормальном напряжении, числе цепей, длине и марке провода. По этим данным вычисляются активные и индуктивные сопротивления,

и зарядная мощность ЛЭП. При пересчёте параметров ЛЭП в модельные единицы:

$$R_{л} = r_0 l - 0.05 x_{л} \text{ (Ом)}, \quad (1.1)$$

$$X_{л} = X_0 l \text{ (Ом)}, \quad (1.2)$$

где r_0, x_0, q_0 - удельные параметры для заданного сечения
Для 2-х цепной ЛЭП:

$$R_{2л} = \frac{R_{л}}{2}, \quad x_{2л} = \frac{x_{л0}}{2}, \quad C_{2л} = 2C. \quad (1.3)$$

Схема замещения трансформаторов представляется упрощённо:



X_T - индуктивное сопротивление для заданного типа трансформатора.

Для двух трансформаторов: $X_{2T} = \frac{x_T}{2}$.

Нагрузки подстанций задаются активной и реактивной мощностями:

$$P = S \cdot \cos \varphi (MVA), \quad Q = S \cdot \sin \varphi (MVAR) \quad (1.4)$$

При наборе на модели

$$P_{мод} = \frac{P}{16} (BT), \quad Q_{мод} = \frac{Q}{16} (BAP) \quad (1.5)$$

Рассчитанные параметры нанести на эквивалентную схему замещения сети.

1.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Сборка схемы на модели производится на основании составленной расчётной схемы. Для ускорения работы сборку обычно ведут два студента: один диктует, второй непосредственно выполняет её. После набора нагрузок, сопротивлений линейных и трансформаторных элементов, емкостных величин схема проверяется преподавателем.

Затем включается питание модели и устанавливается заданное напряжение на шинах генераторов.

Установка нормального режима ведётся методом последовательных приближений. При заданном напряжении на шинах генераторной станции устанавливаются заданные значения мощностей нагрузочных элементов. Затем производим замеры мощностей и напряжений, при этом следует обратить внимание на

соблюдение баланса активных и реактивных мощностей в узловых точках схемы.

1.3. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЁТА

1. Заданная схема, исходные данные варианта.
2. Эквивалентная схема замещения с параметрами и замерами в модельных единицах.
3. Схема замещения с пересчётом в системные единицы.

СХЕМА 1

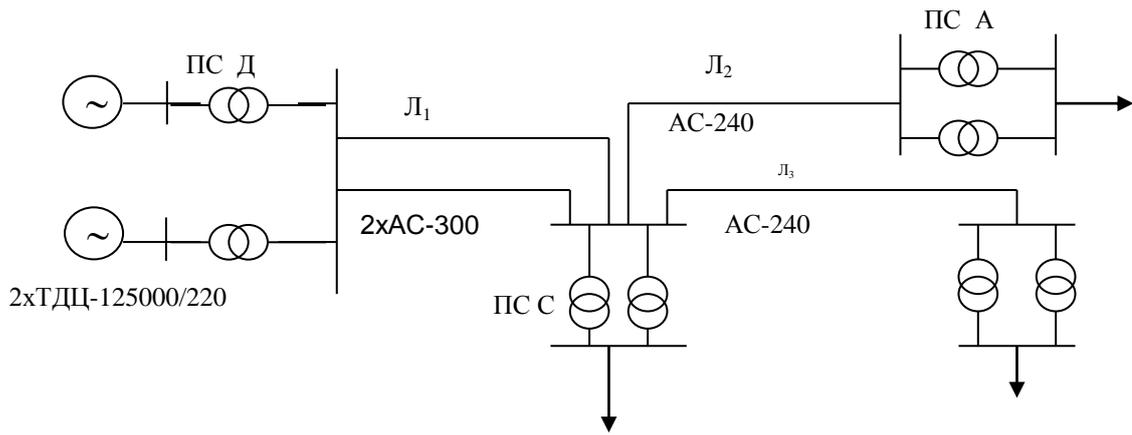


СХЕМА 2

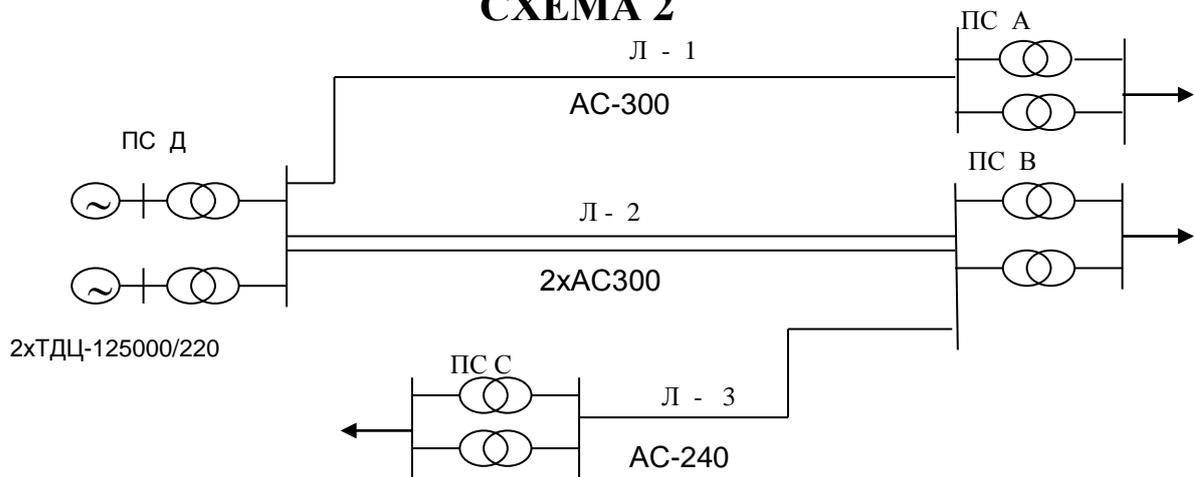
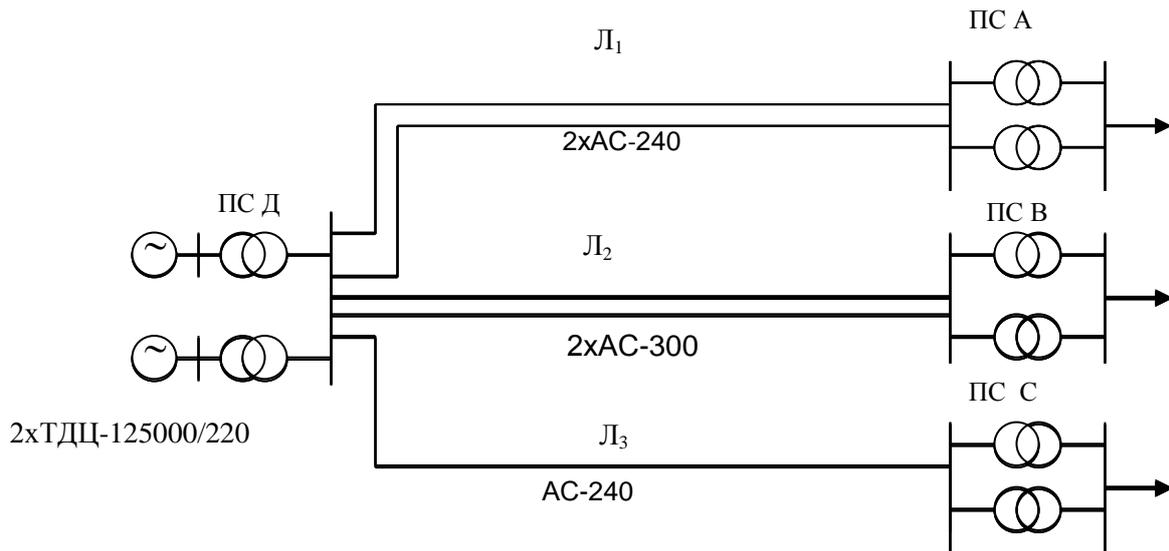


СХЕМА 3



Варианты исходных данных по лабораторной работе

Номер схемы	Варианты	Длина линия, км			Подстанции					
		Л ₁	Л ₂	Л ₃	А		В		С	
					Трансформаторы	Нагрузки	Трансформаторы	Нагрузки	Трансформаторы	Нагрузки
1	1.	50	53	48	ТРДЦН-40000/220	36МВт <i>cos φ</i> = 0.9	ТРДЦН-40000/220	54МВт <i>cos φ</i> = 0.86	ТРДЦН-63000/220	53МВт <i>cos φ</i> = 0.89
	2.	70	47	80	ТРДЦН-63000/220	52МВт <i>cos φ</i> = 0.87	ТРДЦН-40000/220	37МВт <i>cos φ</i> = 0.89	ТРДЦН-63000/220	58МВт <i>cos φ</i> = 0.9
	3.	55	50	60	ТРДЦН-40000/220	37МВт <i>cos φ</i> = 0.88	ТРДЦН-63000/220	36МВт <i>cos φ</i> = 0.9	ТРДЦН-63000/220	46МВт <i>cos φ</i> = 0.8
	4.	75	43	70	ТРДЦН-63000/220	53МВт <i>cos φ</i> = 0.91	ТРДЦН-40000/220	52МВт <i>cos φ</i> = 0.87	ТРДЦН-40000/220	32МВт <i>cos φ</i> = 0.8
	5.	52	41	65	ТРДЦН-40000/220	33МВт <i>cos φ</i> = 0.8	ТРДЦН-63000/220	33МВт <i>cos φ</i> = 0.87	ТРДЦН-40000/220	32МВт <i>cos φ</i> = 0.9
2	1.	100	30	40	ТРДЦН-63000/220	34МВт <i>cos φ</i> = 0.8	ТРДЦН-40000/22	53МВт <i>cos φ</i> = 0.87	ТРДЦН-63000/220	53МВт <i>cos φ</i> = 0.8
	2.	80	35	42	ТРДЦН-63000/220	50МВт <i>cos φ</i> = 0.9	ТРДЦН-40000/220	46МВт <i>cos φ</i> = 0.88	ТРДЦН-63000/220	36МВт <i>cos φ</i> = 0.9
	3.	60	40	44	ТРДЦН-40000/220	33МВт <i>cos φ</i> = 0.81	ТРДЦН-63000/220	49МВт <i>cos φ</i> = 0.8	ТРДЦН-40000/220	34МВт <i>cos φ</i> = 0.85

	4.	70	35	42	ТРДЦН-63000/220	45МВт $\cos \varphi = 0.9$	ТРДЦН-40000/220	53МВт $\cos \varphi = 0.81$	ТРДЦН-63000/220	46МВт $\cos \varphi = 0.85$
	5.	50	30	48	ТРДЦН-40000/220	31МВт $\cos \varphi = 0.78$	ТРДЦН-63000/220	39МВт $\cos \varphi = 0.77$	ТРДЦН-40000/220	31МВт $\cos \varphi = 0.78$
3	1.	50	75	40	ТРДЦН-63000/220	29МВт $\cos \varphi = 0.84$	ТРДЦН-40000/220	67МВт $\cos \varphi = 0.9$	ТРДЦН-63000/220	20МВт $\cos \varphi = 0.8$
	2.	55	80	75	ТРДЦН-40000/220	21МВт $\cos \varphi = 0.8$	ТРДЦН-63000/220	51МВт $\cos \varphi = 0.77$	ТРДЦН-40000/220	24МВт $\cos \varphi = 0.81$
	3.	60	65	50	ТРДЦН-63000/220	25МВт $\cos \varphi = 0.8$	ТРДЦН-40000/220	52МВт $\cos \varphi = 0.75$	ТРДЦН-63000/220	26МВт $\cos \varphi = 0.8$
	4.	53	70	49	ТРДЦН-40000/220	20МВт $\cos \varphi = 0.8$	ТРДЦН-63000/220	52МВт $\cos \varphi = 0.84$	ТРДЦН-40000/220	28МВт $\cos \varphi = 0.8$
	5.	62	75	43	ТРДЦН-63000/220	14МВт $\cos \varphi = 0.77$	ТРДЦН-40000/220	55МВт $\cos \varphi = 0.85$	ТРДЦН-63000/220	36МВт $\cos \varphi = 0.9$

1.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Начертить схему замещения ЛЭП и трансформаторов.
2. Как представляются нагрузочные элементы на модели?
3. Как определяются потери мощности и напряжения в электрических сетях?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДАЛЬНИХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Цель работы: исследование различных режимов работы дальних ЛЭП

2.1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В дальних линиях электропередач по сравнению с линиями умеренной длины (100 - 200км) имеются характерные особенности в режимах их работы. Сказывается волновой характер передачи электрической энергии, емкостной эффект линии при малых нагрузках.

Исследование режимов работы можно провести с помощью основных уравнений линии:

$$\begin{aligned} U_1 &= U_2 \operatorname{ch} \gamma_0 l + \sqrt{3} I_2 Z_b \operatorname{sh} \gamma_0 l \\ I_1 &= U_2 \frac{1}{\sqrt{3} Z_b} \operatorname{sh} \gamma_0 l + I_2 \operatorname{ch} \gamma_0 l \end{aligned} \quad (2.1)$$

Где $\gamma_0 = \sqrt{(r_0 + jx_0)(g_0 + jb_0)}$ - коэффициент распространения волны, величина комплексная: $\gamma_0 = \beta_0 + j\alpha_0$, β_0 - коэффициент затухания, α_0 - коэффициент фазы,

$$Z_b = \sqrt{\frac{r_0 + jx_0}{g_0 + jb_0}} \text{ - волновое сопротивление линии.} \quad (2.2)$$

Дальние линии электропередачи сооружаются для передачи больших количеств электрической энергии на сверхвысоких напряжениях 330, 500, 750, 1150 кВ, поэтому конструктивно выполняются проводами больших сечений, а с целью снижения потерь на корону каждая фаза расщепляется на несколько проводов. В результате этого активное сопротивление линии по сравнению с индуктивным получается достаточно малым. Это позволяет в целом ряде расчетов пренебречь активными сопротивлениями проводов и активной проводимостью.

Тогда при

$$r_0 = 0, g_0 = 0, \operatorname{sh} \gamma l = \operatorname{sh} j \gamma \alpha_0 l = j \sin \alpha_0 l \quad (2.3)$$

$$\gamma = \sqrt{x_0 b_0} = j \alpha_0, \operatorname{ch} \gamma l = \operatorname{ch} j \alpha_0 l = \cos \alpha_0 l$$

$$Z_b = \sqrt{\frac{x_0}{b_0}}$$

Уравнения линии упрощаются:

для начала ЛЭП

$$U_1 = U_2 \cos \alpha_0 l + j \sqrt{3} I_2 Z_b \sin \alpha_0 l; \quad (2.4)$$

$$I_1 = j U_2 \frac{1}{\sqrt{3} \cdot Z_b} \sin \alpha_0 l + I_2 \cos \alpha_0 l \quad (2.5)$$

для конца ЛЭП

$$U_2 = U_1 \cos \alpha_0 l - j \sqrt{3} I_1 Z_b \sin \alpha_0 l; \quad (2.6)$$

$$I_2 = j I_1 \cos \alpha_0 l - j U_1 \frac{1}{\sqrt{3} Z_b} \sin \alpha_0 l. \quad (2.7)$$

Передача электроэнергии по линии происходит распространением электромагнитных волн, скорость которых (волновая скорость), если пренебречь активным сопротивлением и проводимостью ЛЭП, определяется формулой:

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}, \text{ где} \quad (2.8)$$

L_0, C_0 - индуктивность и емкость единицы длины линии.

Для ВЛ эта скорость близка к скорости света, т.е. $v = 300000 \text{ км/с}$.

При передаче энергии по линиям конечной длины происходит отражение воли от конца линий. Можно рассматривать движение прямых и обратных волн напряжения и тока, идущих с одинаковой скоростью $|v|$ в прямом и обратном направлениях. Волны тока и напряжения в линии складываются из прямой и обратной волн. Отражения волн не будет, если сопротивление приемника электроэнергии равно волновому сопротивлению линии:

$$Z_b = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}. \quad (2.9)$$

Для передачи энергии с наименьшими потерями мощности и энергии необходимо отрегулировать на обоих концах линии напряжение и ток так, чтобы они совпадали по фазе, т.е., чтобы $\cos \varphi = 1$. При этих условиях передается мощность:

$$P = I^2 Z_b = \frac{U_\phi^2}{Z_b} \quad (2.10)$$

Мощность

$$P_{\text{нат}} = 3P = \frac{U^2}{Z_b} \quad (2.11)$$

называется натуральной мощностью линии.

При натуральной мощности на любом участке линии потери реактивной мощности равны реактивной мощности, генерируемой этим участком линии.

Потери реактивной мощности в линии на длине l :

$$\Delta Q = I^2 x = I^2 \omega L_0 l \quad (2.12)$$

Реактивная мощность, генерируемая линией:

$$Q_c = U_\phi I_c = U_\phi^2 \omega C_0 l \quad (2.13)$$

Подставляя значение U_ϕ из (I) и раскрывая значение Z_b , получаем:

$$Q_c = I^2 Z_b^2 \omega C_0 l = I^2 \omega L_0 l, \quad (2.14)$$

Т.е. $\Delta Q = Q_c$.

При работе линии с натуральной мощностью ток и напряжение вдоль нее остаются постоянными.

2.2. Предварительная подготовка

Исследование проведем на конкретном примере: для линии электропередачи напряжением $U=500\text{кВ}$ длиной 1000 км , выполненной проводом АС - 3х500.

Удельные параметры ЛЭП:

$$r_0 = 0.022, \text{ Ом/км}, X_0 = 0,296 \text{ Ом/км}, b_0 = 3.84 \cdot 10^{-6} \text{ Сим/км}$$

Коэффициент фазы:

$$\alpha = \sqrt{\chi_0 b_0} = \sqrt{0.296 \cdot 3.84 \cdot 10^{-6}} = 1.065 \cdot 10^{-3} \text{ рад/км} = 0.06 \text{ град/км}$$

Волновое сопротивление:

$$Z_b = \sqrt{\frac{x_0}{b_0}} = \sqrt{\frac{0.296}{3.84 \cdot 10^{-6}}} = 278 \text{ Ом}$$

Представим линию длиной 1000км цепью с распределенными параметрами, т.е. цепочной схемой замещения. Модель линии соберем из участков по 100км каждый.

$$X_{л(100)} = jZ_b \sin \alpha_0 l = j278 \sin 60^\circ = j278 \cdot 0.11 = j29.19 \text{ Ом},$$

$$Y_{л(100)} = j \frac{1}{Z_b} \operatorname{tg} \frac{\alpha_0 l}{2} = j \frac{1}{278} \cdot 0.05 = j0.18 \cdot 10^{-3} \text{ сим}.$$

По упрощенным формулам:

$$X_{л(100)} = x_0 \cdot l = 0.296 \cdot 100 = 2.96 \approx 30 \text{ Ом},$$

$$Y_{л(100)} = \frac{b_0 l}{2} = \frac{3.84 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot 100 = 0.192 \cdot 10^{-3} \text{ сим}$$

2.3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1) Опыт холостого хода

На шины подключаем генератор, в котором устанавливаем $U=50\text{В}$. С помощью измерительного шунта пройти через каждое 100км линии, произвести замеры напряжения. Замерять мощность P и Q на генераторе и в конце ЛЭП, Результаты опыта внести в табл.2.1.

Таблица 2.1

№ _{шин}											
L, км	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
U _{мод}											
U _{сист}											

Мощность на генераторе: $P_{Г \text{ мод}} =$

$P_{Г \text{ сис}} =$

$Q_{Г \text{ мод}} =$

$Q_{Г \text{ сис}} =$

$$\text{Мощность в конце ЛЭП: } P_{\text{к мод}} = \frac{P_{\text{к сис}}}{Q_{\text{к мод}}} = \frac{Q_{\text{к мод}}}{Q_{\text{к сис}}}$$

2) Опыт короткого замыкания

Собранную на модели линию замкнуть на землю в конце. Пройти через 100км линии, произвести замеры напряжения, мощностей на генераторе и в конце ЛЭП. Результаты опыта внести в таблицу (для каждого опыта своя таблица).

3) Нагрузочные режимы

Исследовать распределение напряжения в линии при фиксированном напряжении в начале и с нагрузкой в конце ЛЭП.

а) Подключить в конце линии нагрузочный элемент с величиной активного сопротивления $R_n = Z_b$ (Z_b было определено раньше). Замерить напряжения вдоль ЛЭП через каждые 100км, P и Q на генераторе и в конце ЛЭП. Данные внести в таблицу.

б) То же, при $R_n < Z_b$

в). То же, при $R_n > Z_b$

4) Исследование распределения напряжения вдоль линии при фиксированных напряжениях по концам линии и передаче по ЛЭП активных мощностей



$$U_{\Gamma 1} = U_{\Gamma 2} = \text{const}$$

а) холостой ход линии

Указатель фазы у обоих генераторов установить в нулевом положении. Замерить напряжение вдоль ЛЭП через каждые 100км, P и Q по концам схемы.

Данные внести в таблицу.

б) регулированием фазы у генератора I установить мощность

$$P_{\Gamma} = P_{\text{нат}}, \text{ где } P_{\text{нат}} = \frac{U^2}{Z_b} = \frac{500^2}{278} = 900 \text{ МВт.}$$

Замерить напряжения, P и Q на генераторных станциях и вычислить $\cos(\varphi_{\Gamma})$.

в) То же, при $P_{\Gamma} < Q_{\text{нат}}$.

г) То же, при $P_{\Gamma} > Q_{\text{нат}}$.

2.4. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА

По результатам всех опытов заполнить таблицы и построить зависимости $U=f(l)$.

2.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называют натуральной мощностью линии?
2. Какой характер имеет цепь при холостом ходе и при коротком замыкании?
3. Что мы учитываем при представлении дальней передачи эквивалентной П-образной схемой замещения?
4. При каких длинах можно пренебречь влиянием распределённых параметров?
5. Для чего при напряжении 500 кВ фаза представляется расщепленной?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

РАСЧЕТ НОРМАЛЬНОГО РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ МЕТОДОМ ГАУССА-ЗЕЙДЕЛЯ

Цель работы:

1. Составление уравнений узловых напряжений для электрических сетей.
2. Расчет нормальных режимов электрических сетей методом Гаусса-Зейделя.

3.1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Составление уравнений узловых напряжений для электрических сетей

Для расчета нормального режима электрической сети любой сложности с требуемой точностью обычно применяются методы, основанные на использовании уравнений узловых напряжений (узловых уравнений). При этом сначала составляют узловые напряжения, представляющие режим электрической сети.

С порядком составления узловых уравнений ознакомимся на примере схемы электрической сети, представленной на рис.3.1. В ней, в качестве исходных данных, заданы длины и марки проводов ЛЭП,

напряжение питающего узла (узел 0), активные мощности и коэффициенты активной мощности нагрузочных узлов (узлы 1 и 2).

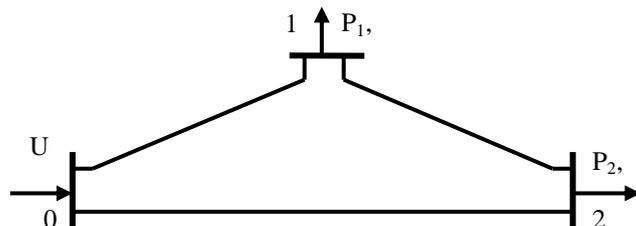


Рис. 3.1. Принципиальная схема ЭС

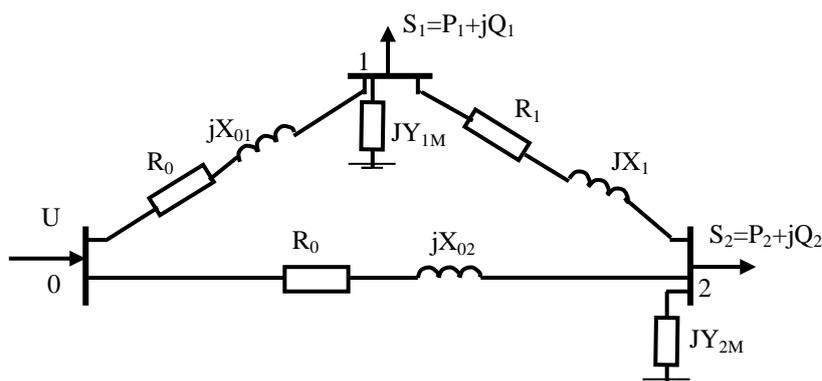


Рис.3.2. Схема замещения ЭС

Реактивные мощности узлов определяются по их активным мощностям и коэффициентам активных мощностей:

$$Q = P \cdot \operatorname{tg} \varphi = P \cdot \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi}. \quad (3.1)$$

Расчетные параметры схем замещения ЛЭП находятся по их удельным расчетным параметрам и длинам:

$$R = r_0 l; \quad X = x_0 l; \quad B = b_0 l. \quad (3.2)$$

По результатам этих расчетов строится расчетная схема замещения электрической сети (рис.3.2). Здесь $Y_{1ш}$, $Y_{2ш}$ проводимости в узлах (шунты), вычисляемые как

$$Y_{1ш} = \frac{B_{01}}{2} + \frac{B_{12}}{2}; \quad Y_{2ш} = \frac{B_{02}}{2} + \frac{B_{12}}{2}. \quad (3.3)$$

Узловые уравнения для полученной схемы электрической сети составляются следующим образом:

а) для всех узлов (кроме балансирующего – 0) составляется уравнение по 1 закону Кирхгофа;

$$\begin{aligned} \dot{I}_{10} + \dot{I}_{12} + \dot{I}_{1uu} + \dot{I}_1 &= 0, \\ \dot{I}_{20} + \dot{I}_{21} + \dot{I}_{2uu} + \dot{I}_2 &= 0. \end{aligned} \quad (3.4)$$

где \dot{I}_{ij} – ток, протекающий по ветви $i - j$ от узла i к узлу j ; \dot{I}_{iuu} – ток, протекающий по проводимости Y_{iuu} от узла i ; \dot{I}_i – ток нагрузки в узле i ;

б) выразив токи всех ветвей через их проводимости и напряжения узлов, получается система уравнений узловых напряжений;

$$\begin{aligned} (\dot{U}_1 - U_0)Y_{01} + (\dot{U}_1 - \dot{U}_2)Y_{12} + (\dot{U}_1 - 0)Y_{1uu} + \dot{I}_1 &= 0, \\ (\dot{U}_2 - U_0)Y_{02} + (\dot{U}_2 - \dot{U}_1)Y_{12} + (\dot{U}_2 - 0)Y_{2uu} + \dot{I}_2 &= 0. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Здесь $Y_{ij} = \frac{1}{Z_{ij}}$.

Сгруппировав напряжения отдельных узлов в последней системе, получим

$$\begin{aligned} (Y_{01} + Y_{12} + Y_{1uu})\dot{U}_1 - Y_{12}\dot{U}_2 &= Y_{01}U_0 - \dot{I}_1, \\ -Y_{12}\dot{U}_1 + (Y_{02} + Y_{12} + Y_{2uu})\dot{U}_2 &= Y_{02}U_0 - \dot{I}_2. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Введя соответствующие обозначения, получим систему уравнений узловых напряжений в стандартной форме для трехузловой схемы (включая балансирующий узел):

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{11}\dot{U}_1 - \bar{Y}_{12}\dot{U}_2 &= \bar{Y}_{10}U_0 - \dot{I}_1, \\ -\bar{Y}_{21}\dot{U}_1 + \bar{Y}_{22}\dot{U}_2 &= \bar{Y}_{20}U_0 - \dot{I}_2. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{11} &= Y_{01} + Y_{12} + Y_{1uu}; & \bar{Y}_{12} &= Y_{12}; & \bar{Y}_{21} &= Y_{12}; \\ \bar{Y}_{22} &= Y_{02} + Y_{12} + Y_{2uu}; & \bar{Y}_{10} &= Y_{01}; & \bar{Y}_{20} &= Y_{02}; \end{aligned}$$

Расчет нормального режима электрической сети методом Гаусса-Зейделя

Расчет нормального режима электрической сети предусматривает определения всех режимных параметров на основе решения системы узловых уравнений, описывающей её режим.

Одним из простых методов расчета нормального режима электрической сети, использующих узловые уравнения, является метод Гаусса-Зейделя. С сущностью метода ознакомимся на примере расчета режима вышеприведенной электрической сети (рис.4.2).

а) Составляются уравнения узловых напряжений, и они приводятся к стандартному виду (4.7). Затем они представляются в следующем удобном для расчета напряжений узлов виде:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \frac{\bar{Y}_{10}U_0 + \bar{Y}_{12}\dot{U}_2 - \frac{\hat{S}_1}{\hat{U}_1}}{\bar{Y}_{11}}, ; \\ \dot{U}_2 &= \frac{\bar{Y}_{20}U_0 + \bar{Y}_{21}\dot{U}_1 - \frac{\hat{S}_2}{\hat{U}_2}}{\bar{Y}_{22}}.\end{aligned}\quad (3.8)$$

б) принимается точность расчета ε_u и начальные значения напряжений узлов в (3.8) - $\dot{U}_1^{(0)}$ и $\dot{U}_2^{(0)}$ ($\kappa=0$);

в) Используя значения напряжений узлов в κ -м приближении (итерации), вычисляются их новые – более уточненные значения в $\kappa+1$ -м приближении по (3.8) как (например, в первом приближении $\kappa=0$):

$$\begin{aligned}\dot{U}_1^{(k+1)} &= \frac{\bar{Y}_{10}U_0 + \bar{Y}_{12}\dot{U}_2^{(k)} - \frac{\hat{S}_1}{\hat{U}_1^{(k)}}}{\bar{Y}_{11}}, ; \\ \dot{U}_2^{(k+1)} &= \frac{\bar{Y}_{20}U_0 + \bar{Y}_{21}\dot{U}_1^{(k+1)} - \frac{\hat{S}_2}{\hat{U}_2^{(k)}}}{\bar{Y}_{22}}.\end{aligned}\quad (3.9)$$

г) проверяется сходимость вычислительного процесса по условиям:

$$\|\dot{U}_1^{(k+1)} - \dot{U}_1^{(k)}\| \leq \varepsilon_u ; \quad \|\dot{U}_2^{(k+1)} - \dot{U}_2^{(k)}\| \leq \varepsilon_u ; \quad (3.10)$$

д) в случае выполнения всех условий в (3.10) значений напряжений, полученные в последнем приближении, считается решением узловых уравнений (3.7) и по ним вычисляются потоки и потери мощностей в электрических сетях. В противном случае, вычисляются значения напряжений в следующем приближении. Для этого расчет аналогично повторяется, начиная с пункта «в»;

е) в случае выполнения условий (4.10) вычисляются токи и потоки мощностей в ветвях по следующим формулам:

$$\begin{aligned}\dot{I}_{01} &= (U_0 - \dot{U}_1)Y_{01}; & \dot{I}_{02} &= (U_0 - \dot{U}_2)Y_{02}; & \dot{I}_{12} &= (\dot{U}_1 - \dot{U}_2)Y_{12}; \\ \dot{S}_{01}^{(0)} &= U_0 \hat{I}_{01}; & \dot{S}_{10}^{(1)} &= -U_1 \hat{I}_{01}; & \dot{S}_{02}^{(0)} &= U_0 \hat{I}_{02}; & \dot{S}_{20}^{(2)} &= -U_0 \hat{I}_{02}; & \dot{S}_{12}^{(1)} &= U_1 \hat{I}_{12}; & \dot{S}_{21}^{(2)} &= -U_2 \hat{I}_{12}; \\ \Delta \dot{S}_{01} &= \dot{S}_{01}^{(0)} + \dot{S}_{10}^{(1)}; & \Delta \dot{S}_{02} &= \dot{S}_{02}^{(0)} + \dot{S}_{20}^{(2)}; & \Delta \dot{S}_{12} &= \dot{S}_{12}^{(1)} + \dot{S}_{21}^{(2)}; & \Delta \dot{S}_\Sigma &= \Delta \dot{S}_{01} + \Delta \dot{S}_{02} + \Delta \dot{S}_{12}.\end{aligned}$$

Здесь $\dot{S}_{ij}^{(i)}$ - полная мощность, протекающая в начале ветви $i-j$ в направлении от узла i к узлу j ; $\dot{S}_{ij}^{(i)}$ - потери полной мощности в ветви $i-j$; $\Delta \dot{S}_\Sigma$ - суммарные потери полной мощности в электрических сетях.

В общем случае, формула расчета напряжения i -го узла в $\kappa+1$ -м приближении, при расчете нормального режима электрической

сети с n узлами (кроме балансирующего) методом Гаусса-Зейделя, имеет следующий вид:

$$\dot{U}_i^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left(Y_{i0} U_0 + \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} \dot{U}_j^{(k+1)} + \sum_{j=i+1}^n Y_{ij} \dot{U}_j^{(k)} - \dot{I}_i^{(k)} \right). \quad (3.11)$$

Для ускорения процесса вычисления по методу Гаусса-Зейделя вводится ускоряющий коэффициент, после начала монотонной сходимости, в следующем порядке:

$$\dot{U}_{i, \text{уск.}}^{(k+1)} = \dot{U}_i^{(k)} + \alpha (\dot{U}_i^{(k+1)} - \dot{U}_{i, \text{уск.}}^{(k)}), \quad (3.12)$$

здесь ускоряющий коэффициент принимается, исходя из условия $1 < \alpha < \alpha_{\max}$.

На практике формула в комплексной форме (3.11) представляется как две зависимые формулы в вещественной форме:

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} U_i^{\prime(k+1)} \\ U_i^{\prime(k+1)} \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} r_{ii} & -x_{ij} \\ x_{ij} & r_{ii} \end{vmatrix} \times \left\{ \begin{vmatrix} g_{i0} \\ -b_{i0} \end{vmatrix} \cdot U_0 + \sum_{j=1}^{i-1} \begin{vmatrix} g_{ij} & b_{ij} \\ -b_{ij} & g_{ij} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} U_j^{\prime(k+1)} \\ U_j^{\prime(k+1)} \end{vmatrix} + \right. \\ &+ \left. \sum_{j=i+1}^n \begin{vmatrix} g_{ij} & b_{ij} \\ -b_{ij} & g_{ij} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} U_j^{\prime(k)} \\ U_j^{\prime(k)} \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} I_i^{\prime(k)} \\ I_i^{\prime(k)} \end{vmatrix} \right\} \end{aligned} \quad (3.13)$$

где

$$\bar{Y}_{ij} = g_{ij} - jb_{ij}; \quad Z_{ii} = r_{ii} + jx_{ii} = \frac{1}{\bar{Y}_{ii}} = \frac{1}{g_{ii} - jb_{ii}}; \quad \dot{U} = U' + jU''; \quad \dot{I} = I' + jI''.$$

3.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

- 1) Строится схема замещения электрической сети и определяются её расчетные параметры. Узлы нумеруются.
- 2) Исходные данные для расчета нормального режима электрической сети методом Гаусса-Зейделя заносятся в таблицы 3.1 и 3.2.

$$N_{\text{тыг.}} = \quad ; \quad M_{\text{шох.}} = \quad ; \quad N_{\text{БТ.}} = \quad ; \quad U_{\text{БТ.}} = \quad \text{кВ}; \quad \varepsilon = \quad .$$

Таблица 3.1

№ ветви	Начало - i	Конец -j	R _{ij} , Ом	X _{ij} , Ом	K' T _i	K'' T _{ij}	B _{cij} , См

Таблица 3.2

№ ветви	$P_i, \text{МВт}$	$Q_i, \text{МВАР}$	$U_i^{(0)}, \text{кВ}$	$U''_i^{(0)} \text{кВ}$	B_i См

3) Нормальный режим электрической сети рассчитывается на ЭВМ. Результаты расчета заносятся в таблицы 3.3 и 3.4.

Таблица 3.3

Ветвь	Напряжение		Нагрузка	
	U, кВ	δ , гр	P, МВт	Q, МВА

Таблица 3.4

№ ветви	Начало - i	Конец - j	$P_{ij}, \text{МВт}$	$Q_{ij}, \text{МВА}$	$P_{ji}, \text{МВт}$	$Q_{ji}, \text{МВА}$

Суммарные потери: $\Delta S = \dots \text{ МВА}$.

4) Берутся зависимости вещественной и мнимой составляющих напряжений одного из узлов (номер узла дается преподавателем) от номера итерации.

Примечание: Принципиальная схема электрической сети и исходные данные для составляющих её элементов берутся из таблицы 3.5 в соответствии с вариантом. Номер варианта при этом определяется двухзначным числом. Первая цифра означает номер варианта принципиальной схемы электрической сети, вторая цифра – номер варианта напряжения питающего узла, мощности нагрузок, длины линии, марка проводов ВЛ.

3.3. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЁТА

В отчете по лабораторной работе должны быть приведены следующие.

- 1) Название и цель лабораторной работы.
- 2) Принципиальная схема электрической сети и исходные данные для составляющих её элементов (напряжение питающего узла, мощности нагрузок, длины линий, марки проводов и удельные расчетные параметры ВЛ, типы и каталожные данные трансформаторов и т.д.).
- 3) Схемы замещения элементов электрической сети и формулы расчета их параметров.
- 4) Схема замещения и расчетные параметры электрической сети.
- 5) Исходные данные для расчета нормального режима электрической сети методом Гаусса-Зейделя на ЭВМ.
- 6) Результаты расчета режима электрической сети на ЭВМ.
- 7) Кривая зависимости вещественной составляющей напряжения одного из узлов (номер узла дается преподавателем) от номера итерации.

ПРИЛОЖЕНИЕ

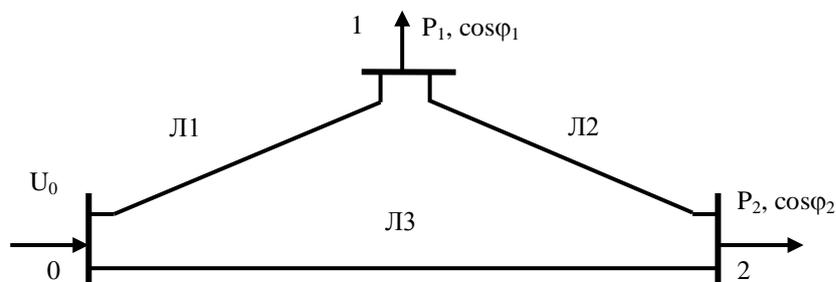


Схема 1

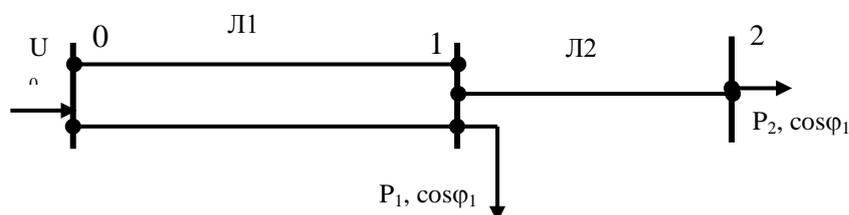


Схема 2

Таблица 3.5. Удельные параметры различных марок проводов ЛЭП

Марка провода	$r_0, \text{ Ом/км}$	$x_0, \text{ Ом/км}$		$b_0, \text{ Сим/км}$	
		110 кВ	220 кВ	110 кВ	220 кВ
АС-185	0,16	0,41	-	0,00000275	-
АС-240	0,12	0,40	0,435	0,00000281	0,0000026
АС-300	0,1	-	0,43	0,00000264	-

3.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1) Что такой установившийся режим электрической сети?
- 2) Составление уравнений узловых напряжений для электрических сетей.
- 3) Задачи расчета установившегося режима электрической сети.
- 4) Построение расчетных схем замещения элементов электрической сети и определение их параметров.
- 5) Сущность расчета нормальных режимов электрических сетей методом Гаусса-Зейделя.
- 6) Преимущества и недостатки метода Гаусса-Зейделя.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

РАСЧЕТ НОРМАЛЬНОГО РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ МЕТОДОМ НЬЮТОНА-РАФСОНА

Цель работы:

1. Изучение составления УУН различных видов
2. Изучение расчета нормального режима электрической сети методом Ньютона-Рафсона

4.1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Формы записи уравнений узловых напряжений

На практике используются различные виды УУН. Уравнения узловых напряжений в виде баланса токов и мощностей могут быть представлены в декартовой и полярной системе координат. В каждом конкретном состоянии характеристики решаемой задачи, исходя из цели решаемой задачи и из удобства применения, пользуются тем или иным видом УУН.

Ознакомимся с составлением различных видов УУН на примере схемы электрической сети показанной в предыдущей лабораторной работе на рис 4.1.

Формула (4.1) - система уравнений комплексных узловых напряжений в виде баланса токов. Если в этих уравнениях узловые токи представить в виде:

$i = \frac{\hat{S}}{\hat{U}}$, и полученные уравнения соответственно умножить на \hat{U}_1 и \hat{U}_2 то получим систему уравнений комплексных узловых напряжений в виде баланса мощностей:

$$\begin{aligned} -\hat{Y}_{10}U_0\hat{U}_1 + \hat{Y}_{11}U_1^2 - \hat{Y}_{12}\hat{U}_1\hat{U}_2 + \hat{S}_1 &= 0, \\ -\hat{Y}_{20}U_0\hat{U}_2 - \hat{Y}_{21}\hat{U}_1\hat{U}_2 + \hat{Y}_{22}U_2^2 + \hat{S}_2 &= 0. \end{aligned} \quad (4.1)$$

Если в (4.1) комплексные параметры разделить на вещественные и мнимые составляющие ($\bar{Y}_{ij} = g_{ij} - jb_{ij}$; $\dot{U} = U' + jU''$; $\dot{I} = I' + jI''$), раскрыть скобки и представить полученные уравнения в отдельном виде (вещественные и мнимые части), то получим систему уравнений узловых напряжений в декартовой системе координат:

$$\begin{aligned} g_{11}U'_1 - g_{12}U'_2 + b_{11}U''_1 - b_{12}U''_2 &= g_{10}U_0 - I'_1, \\ -g_{21}U'_1 + g_{22}U'_2 - b_{21}U''_1 + b_{22}U''_2 &= g_{20}U_0 - I'_2, \\ -b_{11}U'_1 + b_{12}U'_2 + g_{11}U''_1 - g_{12}U''_2 &= -b_{10}U_0 - I''_1, \\ b_{21}U'_1 - b_{22}U'_2 - g_{21}U''_1 + g_{22}U''_2 &= -b_{20}U_0 - I''_2. \end{aligned} \quad (4.2)$$

А также в (4.1) комплексные проводимости представить, как указано выше: напряжения как $\dot{U}_i = U_i e^{j\delta_i}$; $\dot{U}_j = U_j e^{j\delta_j}$, мощность как $S = P + jQ$; ввести обозначение $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$, то можно получить УУН в полярной системе координат в виде баланса мощностей:

$$\begin{aligned} g_{11}U_1^2 - U_1U_0(g_{10} \cos\delta_{10} + b_{10} \sin\delta_{10}) - U_1U_2(g_{12} \cos\delta_{12} + b_{12} \sin\delta_{12}) + P_1 &= 0, \\ -b_{11}U_1^2 - U_1U_0(g_{10} \sin\delta_{10} - b_{10} \cos\delta_{10}) - U_1U_2(g_{12} \sin\delta_{12} - b_{12} \cos\delta_{12}) + Q_1 &= 0, \\ g_{22}U_2^2 - U_2U_0(g_{20} \cos\delta_{20} + b_{20} \sin\delta_{20}) - U_2U_1(g_{21} \cos\delta_{21} + b_{21} \sin\delta_{21}) + P_2 &= 0, \\ -b_{22}U_2^2 - U_2U_0(g_{20} \sin\delta_{20} - b_{20} \cos\delta_{20}) - U_2U_1(g_{21} \sin\delta_{21} - b_{21} \cos\delta_{21}) + Q_2 &= 0. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Метод Ньютона-Рафсона и его использование при расчете нормального режима электрической сети

Метод Ньютона-Рафсона является одним из наиболее эффективных методов решения систем нелинейных уравнений. Суть этого метода состоит в последовательной замене нелинейной системы уравнений некоторой линейной системой, решение которой дает значения неизвестных, более близких к решению, чем предыдущее приближение.

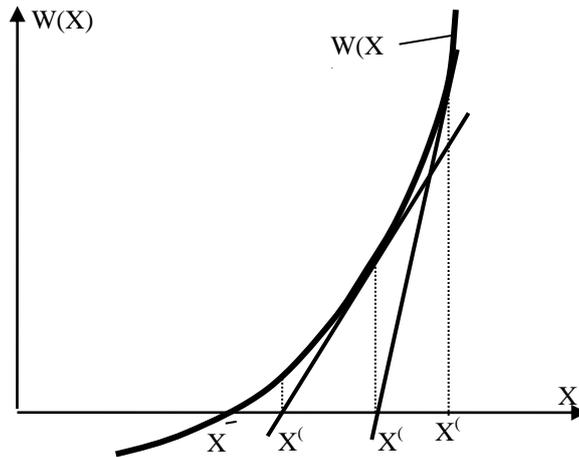


Рис.4.1. Метод Ньютона

Нелинейную систему уравнений нормального режима в самом общем виде можно записать следующим образом:

$$W(X) = 0 \quad (4.4)$$

Решение уравнения \bar{x} - точка, в которой кривая $W(X)$ проходит через нуль (рис.4.1). Зададим начальное приближение $x^{(0)}$.

Заменим уравнение (4.4) в окрестности точки $x^{(0)}$ линейным уравнением

$$w(x^{(0)}) + \frac{\partial w}{\partial x}(x^{(0)})(x - x^{(0)}) = 0. \quad (4.5)$$

левая часть которого представляет собой два первых члена разложения функций $w(x)$ в ряд Тейлора. Решим линейное уравнение (4.5) и определим поправку $\Delta X^{(1)}$ к начальному приближению:

$$\Delta X^{(1)} = x^{(1)} - x^{(0)} = - \frac{w(x^{(0)})}{\frac{\partial w}{\partial x}(x^{(0)})}. \quad (4.6)$$

За новое приближение неизвестного принимаем

$$x^{(1)} = x^{(0)} + \Delta X^{(1)} = x^{(0)} - \frac{w(x^{(0)})}{\frac{\partial w}{\partial x}(x^{(0)})}. \quad (4.7)$$

Аналогично определяются следующие приближения:

$$x^{(i+1)} = x^{(i)} + \Delta X^{(i+1)} = x^{(i)} - \frac{w(x^{(i)})}{\frac{\partial w}{\partial x}(x^{(i)})}. \quad (4.8)$$

Итерационный процесс сходится, если функция $w(x^{(i)})$ становится близкой к нулю. Сходимость считается достигнутой, если абсолютная величина невязки (или небаланса) меньше заданной, т.е. при:

$$|w(x^{(i)})| \leq \varepsilon \quad (4.9)$$

Отметим, что контроль сходимости по величине поправки $\Delta X^{(i)}$ может привести к неверным результатам.

Дадим геометрическую интерпретацию метода Ньютона (рис. 4.1.) Один шаг метода Ньютона сводится к замене кривой $w(x)$ на прямую $w(x^{(0)}) + \frac{\partial w}{\partial x}(x^{(0)})(x - x^{(0)})$, которая является касательной к этой кривой в точке $x = x^{(0)}$. Поэтому метод Ньютона называют также методом касательных. Приближение $X^{(i+1)}$ есть точка пересечения касательной к кривой $w(x)$ в точке $x = x^{(i)}$ с осью x .

Рассмотрим решение по методу Ньютона системы нелинейных алгебраических уравнений с действительными переменными:

$$\left. \begin{aligned} w_1(x_1, x_2, x_3) &= 0; \\ w_2(x_1, x_2, x_3) &= 0; \\ w_3(x_1, x_2, x_3) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

где $W(X)$ вектор-функция порядка n ; X - вектор зависимых переменных порядка n ;

$$W(x) = \begin{bmatrix} w_1(x_1, x_2, x_3) \\ w_2(x_1, x_2, x_3) \\ w_3(x_1, x_2, x_3) \end{bmatrix}; \quad X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix}, \quad (4.11)$$

то систему (4.10) можно записать в матричном виде

$$W(X) = 0 \quad (4.12)$$

Пусть $X_1^{(0)}, X_2^{(0)}, X_3^{(0)}$ - начальные приближения неизвестных. Заменим каждое из нелинейных уравнений (4.10) линейным, полученным разложением в ряд Тейлора. Например, первое уравнение после линеаризации будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} w_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, x_3^{(0)}) + \frac{\partial w_1}{\partial x_1}(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, x_3^{(0)})(x_1 - x_1^{(0)}) + \\ + \frac{\partial w_1}{\partial x_2}(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, x_3^{(0)})(x_2 - x_2^{(0)}) + \frac{\partial w_1}{\partial x_3}(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, x_3^{(0)})(x_3 - x_3^{(0)}) = 0. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Запишем матрицу Якоби, т.е. матрицу производных системы функции W_k по переменным X_k :

$$\frac{\partial w}{\partial \vec{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial w_1}{\partial x_1} & \frac{\partial w_1}{\partial x_2} & \frac{\partial w_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial w_2}{\partial x_1} & \frac{\partial w_2}{\partial x_2} & \frac{\partial w_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial w_3}{\partial x_1} & \frac{\partial w_3}{\partial x_2} & \frac{\partial w_3}{\partial x_3} \end{bmatrix} \quad - \text{ матрица производных (матрица Якоби)} \quad (4.14)$$

Тогда системы линеаризованных уравнений можно записать в матричном виде следующим образом:

$$w(x^{(0)}) + \frac{\partial w}{\partial x} (x - x^{(0)}) = 0. \quad (4.15)$$

Эта система линейна относительно поправок $\Delta x_k^{(1)} = x_k^{(1)} - x_k^{(0)}$.

Предположим, что матрица Якоби не равна нулю.

Решим линейную систему (4.15) и определим поправки. Затем найдем первое приближение переменных:

$$x^{(1)} = x^{(0)} + \Delta x^{(1)} \quad (4.16)$$

Каждый шаг итерационного процесса состоит из решения линейной системы

$$\frac{\partial w}{\partial x} (x^{(i)}) \Delta x^{(i+1)} = -w(x^{(i)}) \quad (4.17)$$

Следующие, т.е. $(i + 1)$, приближения зависимых переменных определяется по выражению

$$X^{(i+1)} = X^{(i)} + \Delta X^{(i+1)} \quad (4.18)$$

Контроль сходимости осуществляется по вектору небалансов, т.е. условие

$$|w_k(x^{(i)})| \leq \varepsilon \quad (4.19)$$

должно выполняться для всех небалансов.

Решение узловых уравнений в виде баланса мощностей

Напишем уравнение баланса мощностей:

$$\dot{w}_{sk}(\dot{U}) = \hat{S}_k + Y_{kk} \dot{U}_k \hat{U}_k - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n+1} Y_{kj} \dot{U}_j \hat{U}_k, \quad (4.20)$$

где функция $\dot{w}_{sk}(\dot{U})$ соответствует небалансу мощности в k -м узле.

Для того, чтобы оперировать с вещественными величинами, выделим в уравнении (4.20) действительные и мнимые части.

$$\text{Принимаем } w_{sk}(\dot{U}) = w_{pk}(U', U'') + jw_{Qk}(U', U'').$$

где w_{pk}, w_{Qk} - собственно небалансы активных и реактивных мощностей в узле k.

В качестве переменных при решении УУН могут использоваться модуль и фазы напряжений в узлах U и δ ; вещественные и мнимые составляющие напряжений U' и U'' .

Уравнения баланса мощностей для k-го узла, при переменных U и δ , можно получить из (4.20) в следующем виде:

$$\begin{aligned} w_{pk} &= P_k + g_{kk} U_k^2 - U_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n+1} U_j (g_{kj} \cos \delta_{kj} + b_{kj} \sin \delta_{kj}) \\ w_{Qk} &= Q_k - b_{kk} U_k^2 - U_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n+1} U_j (g_{kj} \sin \delta_{kj} + b_{kj} \cos \delta_{kj}) \end{aligned} \quad (4.21)$$

где $\delta_{kj} = \delta_k - \delta_j$; $k = 1, 2, \dots, n$.

Таким образом,

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial w_p}{\partial \delta} & \frac{\partial w_p}{\partial U} \\ \frac{\partial w_Q}{\partial \delta} & \frac{\partial w_Q}{\partial U} \end{bmatrix}, \quad (4.22)$$

где элементы матрицы Якоби - это частные производные небалансов активной и реактивной мощности по модулям и фазам напряжений узлов.

4.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Построить расчетную схему замещения электрической сети и определить его параметры. Пронумеровать узлы.
2. Определить элементы матрицы Якоби и матрицы столбца небалансов мощностей при выполнении первой итерации расчета нормального режима электрической сети методом Ньютона-Рафсона на основе использования уравнений узловых напряжений в форме баланса мощностей в полярных координатах.
3. Исходные данные для расчета нормального режима электрической сети методом Ньютона-Рафсона занести в таблицы 4.1 и 4.2.

$$N_{\text{тыг.}} = \quad ; M_{\text{шох.}} = \quad ; U_{\text{БТ.}} = \quad \text{кВ}; \quad \varepsilon =$$

Таблица 4.1

№ ветви	Начало - i	Конец - j	R_{ij} , Ом	X_{ij} , Ом	K'_{Ti}	K''_{Tij}	B_{cij} , См

Таблица 4.2

Узел	P_i , МВт			Q_i , МВАР		$U_i^{(0)}$, кВ		$\delta_i^{(0)}$, рад		B_i См	

4. Расчет нормального режима электрической сети выполнить на ЭВМ и результаты расчетов занести в таблицы 4.3 и 4.4.

Таблица 4.3

Узел	Напряжение		Нагрузка	
	U, кВ	δ , гр	P, МВт	U, кВ

Таблица 4.4

Ветвь	Начало i	Конец j	P_{ij} , МВт	Q_{ij} , МВА	P_{ij} , МВт	Q_{ij} , МВА

Суммарные потери: $\Delta S = \dots$ МВА.

Примечание: Принципиальная схема электрической сети и исходные данные для составляющих её элементов берётся из таблицы 4.5 в соответствии с вариантом, выданным преподавателем. При этом номер варианта определяется двухзначным числом: первый из которых означает номер принципиальной схемы, а второй номер варианта напряжения балансирующего узла, мощностей нагрузок, длин и марки проводов ЛЭП.

4.3. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЁТА

В отчете по лабораторной работе должны быть приведены следующие.

1. Название и цель лабораторной работы.

2. Принципиальная схема электрической сети и исходные данные для составляющих её элементов (напряжение питающего узла, мощности нагрузок, длины линий, марки проводов и удельные расчетные параметры ВЛ, типы и каталожные данные трансформаторов и т.д.).
3. Схемы замещения элементов электрической сети и формулы расчета их параметров.
4. Схема замещения и расчетные параметры электрической сети.
5. Исходные данные для расчета нормального режима электрической сети методом Ньютон-Рафсон на ЭВМ.
6. Результаты расчета режима электрической сети на ЭВМ.

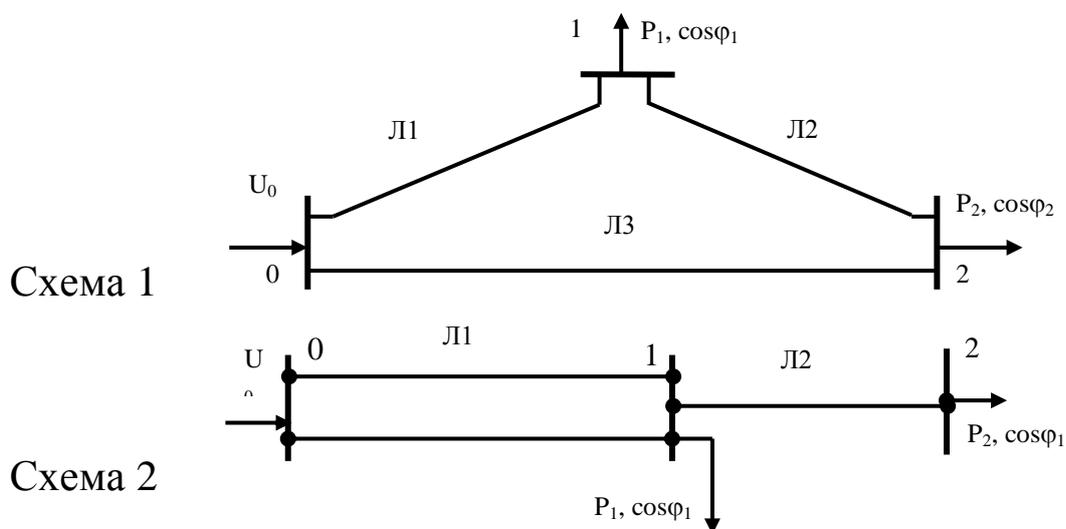


Таблица 4.5. Удельные параметры различных марок проводов ЛЭП

Марка провода	r_0 , Ом/км	x_0 , Ом/км		b_0 , Сим/км	
		110 кВ	220 кВ	110 кВ	220 кВ
АС-185	0,16	0,41	-	0,00000275	-
АС-240	0,12	0,40	0,435	0,00000281	0,0000026
АС-300	0,1	-	0,43	0,00000264	-

4.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Составление уравнений узловых напряжений для электрических сетей для различных видов.
2. Значение метода Ньютона-Рафсона и его геометрическое изображение на основе расчетов.
3. Преимущества и недостатки метода Ньютона-Рафсона.
4. Расчет элементов матрицы Якоби и его особенности.
5. Модификация метода Ньютона-Рафсона.
6. Сравнение расчетов последовательностей приближения методов Гаусса-Зейделя и Ньютона-Рафсона при нормальном режиме электрической сети. Объясните характерные особенности данных процессов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Цель работы:

1. Исследование возможности снижения потерь в электрической сети.
2. Исследование возможности регулирования напряжения электрической сети компенсацией реактивной мощности.

5.1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Активную мощность электрической сети получают от генераторов электрических станций, которые являются единственным источником активной мощности. В отличие от активной мощности реактивная мощность может генерироваться не только генераторами, но и компенсирующими устройствами — конденсаторами, синхронными компенсаторами или статическими источниками реактивной мощности (ИРМ), которые можно установить на подстанциях электрической сети. При номинальной нагрузке генераторы вырабатывают лишь около 60 % требуемой реактивной мощности, 20 % генерируется в ЛЭП с напряжением выше 110 кВ, 20 % вырабатывают компенсирующие устройства, расположенные на подстанциях или непосредственно у потребителя.

Компенсацией реактивной мощности будем называть ее выработку или потребление с помощью компенсирующих устройств.

Проблема компенсации реактивной мощности в электрических системах страны имеет большое значение по следующим причинам:

- 1) в промышленном производстве наблюдается опережающий рост потребления реактивной мощности по сравнению с активной;
- 2) в городских электрических сетях возросло потребление реактивной мощности, обусловленное ростом бытовых нагрузок;
- 3) увеличивается потребление реактивной мощности в сельских электрических сетях.

Компенсация реактивной мощности, как всякое важное техническое мероприятие, может применяться для нескольких различных целей. Во-первых, компенсация реактивной мощности необходима по условию баланса реактивной мощности. Во-вторых, установка компенсирующих устройств применяется для снижения потерь электрической энергии в сети. И, наконец, в-третьих, компенсирующие устройства применяются для регулирования напряжения.

Во всех случаях при применении компенсирующих устройств необходимо учитывать ограничения по следующим техническим и режимным требованиям: 1) необходимому резерву мощности в узлах нагрузки; 2) располагаемой реактивной мощности на шинах ее источника; 3) отклонениям напряжения; 4) пропускной способности электрических сетей.

Для уменьшения перетоков реактивной мощности по линиям и трансформаторам источники реактивной мощности должны размещаться вблизи мест ее потребления. При этом передающие элементы сети разгружаются по реактивной мощности, чем достигается снижение потерь активной мощности и напряжения. Эффект установки компенсирующих устройств в конце линии иллюстрируется рис. 5.1, где приведены схемы замещения и векторные диаграммы токов и мощностей.

Без применения компенсирующих устройств в линии протекают ток и мощность нагрузки (рис. 5.1, а)

$$I_p = I'_p - jI_p ; \quad S_p = P_p + jQ_p;$$

При установке компенсирующих устройств реактивный ток и реактивная мощность в линии уменьшаются на величину реактивного тока и реактивной мощности, генерируемых в компенсирующем

устройстве $I_{\bar{e}}$ и $Q_{\bar{e}}$. В линии будут протекать меньшие по модулю ток и мощность, соответственно равные (рис.5.1, б)

$$I_p = I'_p - j(I_p'' - I_{\bar{e}}); \quad S_{\bar{e}} = P_p + j(Q_p - Q_{\bar{e}}).$$

Таким образом, вследствие применения компенсирующих устройств на подстанции при неизменной мощности нагрузки реактивные мощности и ток в линии уменьшается—линия разгружается по реактивной мощности. При этом, как отмечалось выше, в линии уменьшаются потери мощности и потери напряжения, так как

$$\Delta D_{\bar{e}} = \frac{P_{\text{ю}}^2 + (Q_{\text{ю}} - Q_k)^2}{U_{\text{ном}}^2} r_{\text{л}}; \quad \Delta U_{\bar{e}} = \frac{P_{\text{ю}} r_{\text{л}} + (Q_{\text{ю}} - Q_k) x_{\text{л}}}{U_{\text{ном}}};$$

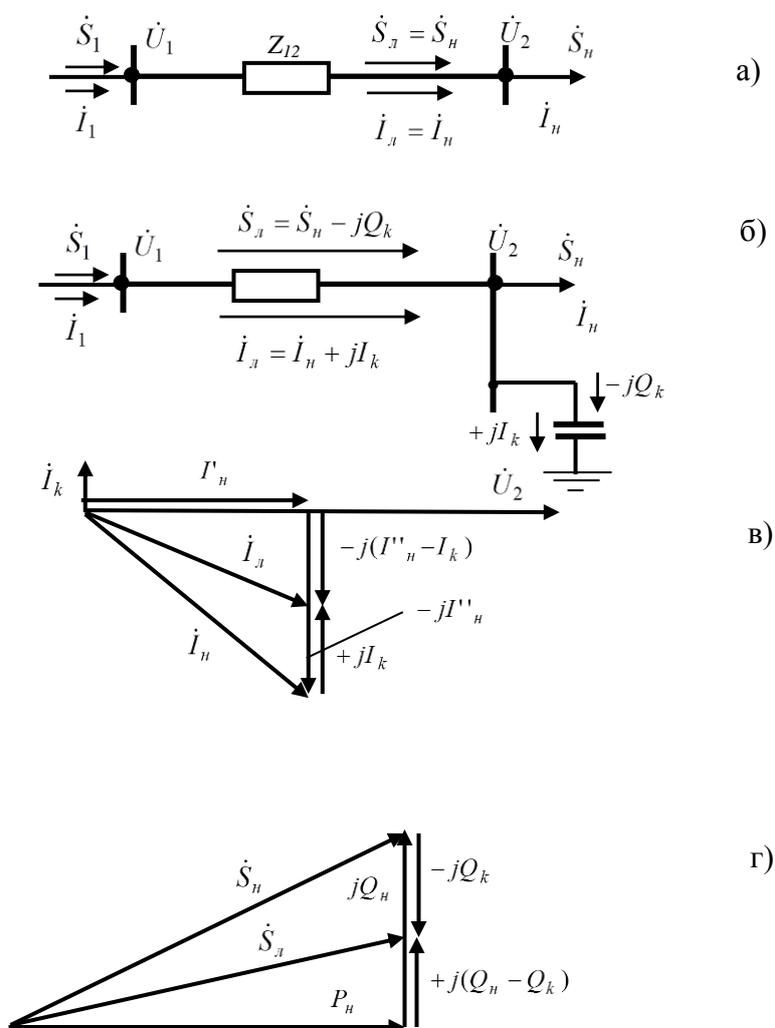


Рис. 5.1. К пояснению эффекта от применения компенсирующих устройств:

а, б — токи и потоки мощности до и после компенсации; в — векторная диаграмма токов; г — треугольник мощностей

5.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Для заданного варианта составить схему замещения электрической сети и определить расчетные параметры.

2. Выбор масштабных коэффициентов для выполнения на статической модели переменного тока. С помощью выбранных масштабных коэффициентов определить масштабные коэффициенты для сопротивления и мощности. При этом учитывать рекомендации из 1- лабораторной работы. Например, для напряжения $K_U=4 \text{ кВ сист./В мод.}$, для тока $K_I=4 \text{ кА сист./А мод.}$.

3. Составление эквивалентной модельной схемы замещения, расчет параметров в модельных единицах. Составление модельной схемы

4. Сборка схемы на модели и набор значений расчетных параметров.

5. Включается питание модели и устанавливается заданное напряжение на шинах генераторов. Установка нормального режима ведется методом последовательных приближений (как в лабораторной работе №1).

6. Произвести замеры и записать значения мощностей и напряжений для всех узлов сети (исходный режим).

7. На шинах нагрузки присоединить источник реактивной мощности батареи конденсаторов (БК). Реактивная мощность БК определяется

$$Q_{KB} = Q_H - Q_{C2} \quad \text{или} \quad Q_{KB} = Q_H - U_H^2 \cdot \frac{B_{л}}{2}.$$

Емкость БК в модельных единицах определяется как в лабораторной работе №1.

8. Напряжение питающего узла и заданная мощность нагрузки устанавливается методом последовательных приближений.

9. Произвести замеры и записать напряжения всех узлов сети, перетоки в ветвях и выдаваемую реактивную мощность БК (результатирующий режим).

5.3. ПОРЯДОК ПОДГОТОВКИ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

1. Строится исходная и результирующая схема, в ней указываются расчетные и режимные параметры в качестве исходных данных, записываются полученные значения,

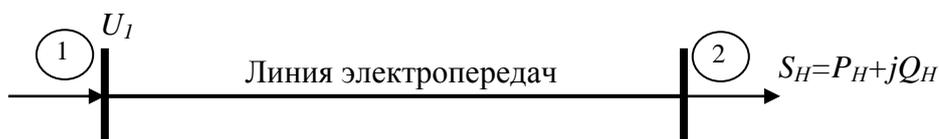
определяемые соответствующими масштабными коэффициентами, режимные параметры измеренные и записанные в результате лабораторной работы, в том числе мощности, вырабатываемой БК.

2. Сопоставить исходный режим и режим с компенсацией реактивной мощности. При этом обратить внимание на увеличение напряжения приемной шины и уменьшение потери активной мощности сети во втором режиме, чем в исходном.

Варианты по лабораторной работе

Номер варианта	U_1 , кВ	Марка провода	Длина линии, км	P_H , МВт	Q_H , МВАР
1	225	АС-300	40	100	50
2	230	АС-240	60	80	30
3	220	АС-300	50	100	45
4	240	АС-240	70	72	50
5	230	АС-300	40	110	60
6	115	АС-240	25	50	25
7	120	АС-185	30	60	30
8	110	АС-240	50	45	30
9	125	АС-185	40	55	35
10	115	АС-95	20	40	20

Принципиальная схема электрической сети



5.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется компенсацией реактивной мощности?
2. С какой целью осуществляется компенсация реактивной мощности сети?
3. Что входит в компенсацию реактивной мощности? В чем заключаются их достоинства и недостатки?

4. При выборе компенсаторов реактивной мощности какие ограничения учитываются по техническим и режимным параметрам?
5. Как определить емкость заданной реактивной мощности БК?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРАНСФОРМАЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Цель работы:

Исследование способов регулирования напряжения схемы районной электрической сети при изменении коэффициентов трансформации трансформаторов.

6.1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

На рис.6.1 приведена упрощенная схема питания электроприемников:

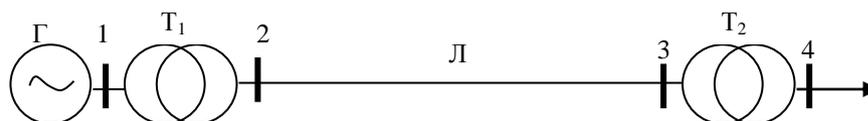


Рис. 6.1. Принципиальная схема простейшей электрической системы

От генераторов электростанций через трансформаторы T_1 электроэнергия поступает в линии L питающей сети напряжения 110 ~ 220кВ и далее в трансформаторы T_2 . К обмоткам низкого напряжения T_2 подключена сеть низкого напряжения, от которой непосредственно питается большинство потребителей. Две величины характеризуют изменение напряжения у потребителей.

1) Потери напряжения (если пренебречь влиянием поперечной составляющей падения напряжения):

$$U = U_i - U_j = \frac{PR + QX}{U_H} \quad (6.1)$$

т.е. арифметическая разность напряжений в любых двух точках передачи с напряжениями U_i и U_j ;

2) отклонение напряжения у потребителя $U_{\text{потр}} \%$ от номинального в заданной точке:

$$U_{\text{потр}\%} = \frac{U_{\text{потр}} - U_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} \cdot 100\% \quad (6.2)$$

Для заданной схемы напряжение у потребителя: $U'_4 = U_2 - \Delta U_1$, где

U'_4 - приведенное напряжение у потребителя;

U_2 - напряжение в начале ЛЭП;

ΔU_2 - суммарные потери напряжения в ЛЭП и Т2. Действительное напряжение у потребителя:

$$U_4 = \frac{U'_4}{K_{T2}}, \text{ где } K_{T2} - \text{коэффициент трансформации Т2.}$$

Окончательно получим:

$$U_4 = \frac{U_2 - \Delta U \Sigma}{K_{T2}}$$

Как видно из формулы, напряжение у потребителя зависит от трех факторов: от напряжения в начале ЛЭП; от суммарной потери напряжения; от коэффициента трансформации.

Таким образом, задача обеспечения допустимых отклонений напряжения в сетях низкого U состоит: 1) в регулировании напряжения на питающем конце сети; 2) в выборе необходимых ответвлений у трансформаторов; 3) в изменении $\Delta U \Sigma$.

Регулирование напряжения на питающем конце сети - это регулирование тока возбуждения генераторов электростанций. Применение этого способа несколько ограничено, т.к. мощность генератора будет снижаться, если напряжение на его выводах отклонится от номинального больше, чем на $\pm 5\%$ ($U_{\text{ном Г}} \pm 5\%$).

Регулирование коэффициента трансформации в трансформаторах - трансформаторы и автотрансформаторы снабжены специальными регулировочными ответвлениями, изменяющими их $K_{\text{Г}}$. Переключение этих ответвлений может производиться двумя способами:

1) с отключением трансформатора от сети, т.е. переключение без возбуждения (ПБВ);

2) без отключения трансформатора от сети, т.е. переключение под нагрузкой (РПН).

У всех трансформаторов устройства регулирования напряжения расположены на стороне ВН, у автотрансформаторов - на стороне СН. В трансформаторах с ПБВ пределы регулирования: $U_{\text{н}} \pm 2*2,5\%$,

Коэффициент трансформации в трансформаторах с РПН можно менять в более широких пределах:

$$230 \pm 8 \times 1,5 \% ,$$

$$115 \pm 9 \times 1,78 \% .$$

У автотрансформаторов РШ расположено на стороне СН:

$$121 \pm 6 \times 1,5 \% ,$$

а для обеспечения необходимого напряжения на стороне НН устанавливают линейные регуляторы.

Предварительная работа

Предварительная подготовка для выполнения лабораторной работы на примере электрической сети на рис.6.1

Составить эквивалентную схему замещения электрической сети (рис.6.2) и определить их параметры.

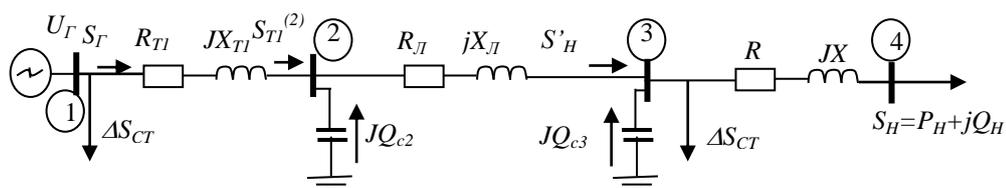


Рис. 6.2. Схема замещения электрической системы

На этой схеме расчетные параметры трансформаторов берутся из справочника. А также расчетные параметры линии в зависимости от марки провода для каждой линии длиной 1 км берутся из справочника. При этом

$$R_{л} = r_0 \cdot l; \quad X_{л} = X_0 \cdot l; \quad B_{л} = \epsilon_0 \cdot l .$$

Здесь l – длина линии, км: r_0 x_0 ϵ_0 – активное, реактивное сопротивление и емкостная проводимость линии длиной 1 км.

Осуществить расчет режима электрической сети в два этапа в следующем порядке.

Определить потери мощности в медной обмотке трансформатора T_2 :

$$\Delta P_{MT2} = \frac{P_H^2 + Q_H^2}{U_H^2} * R_{T2}; \quad \Delta Q_{MT2} = \frac{P_H^2 + Q_H^2}{U_H^2} X_{T2} \quad (6.3)$$

Определить нагрузку, приведенную к высокой стороне трансформатора T_2 :

$$Q_{с.3} = U_H^2 \frac{B_{л}}{2}; \quad (6.4)$$

$$\dot{S}'_H = P'_H + jQ'_H = P_H + jQ_H + (\Delta P_{MT2} + j\Delta Q_{MT2}) + (\Delta P_{CTT2} + j\Delta Q_{CTT2}) - jQ_{с.3}. \quad (6.5)$$

Определим потери мощности в линии:

$$\dot{S}_{\text{Л}} = \Delta P_{\text{Л}} + j\Delta Q_{\text{Л}} = \frac{P_{\text{H}}'^2 + Q_{\text{H}}'^2}{U_{\text{H}}^2} (R_{\text{Л}} + jX_{\text{Л}}) \quad (6.6)$$

Найти мощность трансформатора T_1 на высокой стороне:

$$Q_{\text{C2}} = U_{\text{H}}^2 * \frac{B_{\text{Л}}}{2}; \quad \dot{S}_{T_1}^{(2)} = P_{T_1}^{(2)} + jQ_{T_1}^{(2)} = S'_{\text{H}} + \Delta \dot{S}_{\text{Л}} - jQ_{\text{C2}}. \quad (6.7)$$

Определить потери мощности в медной обмотке трансформатора T_1 :

$$\Delta P_{\text{MT1}} = \frac{P_{T_1}^{(2)2} + Q_{T_1}^{(2)2}}{U_{\text{H}}^2} \cdot R_{T_1}, \quad \Delta Q_{\text{MT1}} = \frac{P_{T_1}^{(2)2} + Q_{T_1}^{(2)2}}{U_{\text{H}}^2} \cdot X_{\text{Л}} \quad (6.8)$$

Мощность на шинах генератора без учета $\Delta S_{\text{СТТ1}}$

$$\dot{S}_{\text{Г}} = P_{\text{Г}} + jQ_{\text{Г}} = \dot{S}_{T_1}^{(2)} + \Delta \dot{S}_{\text{MT1}}. \quad (6.9)$$

Определим суммарные потери активной мощности:

$$\Delta P_{\Sigma} = P_{\text{Г}} - P_{\text{H}} \quad (6.10)$$

После этого осуществим второй этап расчета. Считать напряжение генератора заданным: $U_{\text{ГЕН}} = 10,5 \text{ кВ}$. Определить приведенное напряжение ТТ:

$$U_1' = U_{\text{Г}} \cdot K_{T_1}, \quad \text{где} \quad K_{T_1} = \frac{U_{\text{ВТ1}}}{U_{\text{НТ1}}}.$$

$$\text{Для } U_{\text{H}} = 220 \text{ кВ}, \quad K_{T_1} = \frac{242}{10.5}$$

$$\text{Для } U_{\text{H}} = 110 \text{ кВ} \quad K_{T_2} = \frac{121}{10.5}$$

Потери напряжения в ТТ:

$$U'_{\text{Г}} = K_{T_1} \cdot U_{\text{Г}}; \quad K_{T_1} = \frac{U_{\text{ВТ1}}}{U_{\text{НТ1}}}.$$

Здесь:

Номинальные напряжения высокой и низкой стороны обмотки трансформатора T_1 :

Потери напряжения в трансформаторе ТТ:

$$\Delta U_{T_1} = \frac{P_{\text{Г}} R_{T_1} + Q_{\text{Г}} X_{T_1}}{U'_{\text{Г}}}.$$

Напряжение в начале ЛЭП: $U_2 = U'_{T_1} - \Delta U_{T_1}$

Потери ΔU в ЛЭП:

$$\Delta U_{\text{ЛЭП}} = \frac{(P_1^{(3)} + \Delta P_1) R_{\text{Л1}} + (Q_1^{(3)} + \Delta Q) X_{\text{Л1}}}{U_2}.$$

Напряжение в конце ЛЭП: $U_3 = U_2 - \Delta U_{\text{ЛЭП}}$.

Потери напряжения ΔU в T_2 :

$$\Delta U_{T_2} = \frac{(P_{\text{М}} + P_{\text{MT2}}) R_{T_2} + (Q_{\text{М}} + Q_{\text{MT2}}) X_{T_2}}{U_3}$$

Приведенное напряжение на шинах нагрузки:

$$U'_H = U_3 - \Delta U_{T2}.$$

Действительное напряжение на нагрузке:

$$U_4 = \frac{U'_4}{K_{T2}}, \text{ где } K_{T2} = \frac{U_{BT2}}{U_{HT2}}.$$

Для $U_H = 220 \text{ кВ}$, $K_{T2} = \frac{230}{U_{HT2}}$,

Для $U_H = 110 \text{ кВ}$, $K_{T2} = \frac{115}{U_{HT2}}$.

6.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Составить эквивалентную схему замещения электрической сети и расчет режима.

2. Регулирование напряжения к допустимому значению ($U_{доп.} = 10,5 \text{ кВ} \pm 5\%$) у потребителя использовать следующие методы.

- 1) Изменение напряжения на выходе генератора.
- 2) Изменение коэффициента трансформации трансформатора T_1 ;
- 3) Изменение коэффициента трансформации трансформатора T_2 ;

3. Результаты расчета напряжений свести в таблицу 6.1

Таблица 6.1

N п/п	Способы регулирования напряжения и параметры регулирующей установки	$U_G = U_1$ кВ	U_2 кВ	U_3 кВ	$U_4 = U_H$ кВ
1.	Начальное значение				
2.	При изменении напряжения на выходе генератора: $U_G =$				
3.	При изменении коэффициента трансформации трансформатора T_1 : $U_{ответ} =$				
4.	При изменении коэффициента трансформации трансформатора T_2 : $U_{ответ} =$				

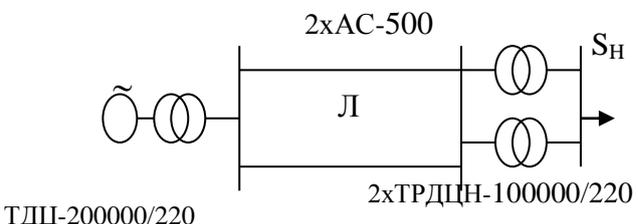
6.3. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА

В отчете должно быть представлено следующее:

1. Принципиальная схема заданной электрической сети и исходные данные.
2. Эквивалентная схема замещения электрической сети и их параметры.

3. Результаты расчета режима электрической сети методом в два этапа.
4. Расчет режима электрической сети на ЭВМ и результаты исследования методов регулирования напряжения.

ВАРИАНТЫ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Принципиальная схема электрической сети	Вариант №	S_H МВА	L , км
<p>Схема 1</p> 	1	$150+j100$	65
	2	$130+j80$	85
	3	$145+j95$	79
	4	$125+j83$	68
	5	$120+j85$	X3
	6	$146+j93$	96
	7	$151+j94$	92
	8	$128+j72$	87
	9	$136+j96$	74
	10	$123+j82$	22
	11	$150+j95$	98
	12	$148+j102$	63
	13	$143+j93$	68
	14	$147+j96$	92
	15	$98+j72$	72
	16	$95+j74$	76
	17	$89+j64$	75
	18	$93+j66$	84
	19	$90+j65$	81
	20	$83+j65$	95
	21	$87+j65$	91
	22	$96+j70$	73
	23	$94+j74$	77
	24	$88+j63$	73
	25	$93+j68$	82
	26	$92+j66$	83
	27	$94+j67$	86
	28	$99+j75$	77
	29	$75+j50$	45
	30	$85+j40$	63

6.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. От каких факторов зависит напряжение у потребителя?
2. Как влияет на напряжение изменение числа витков у трансформаторов? РПН, ПБВ.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7 РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЕЁ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Цель работы:

Исследование методов регулирования напряжения сети путем изменения сопротивлений.

7.1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

На рис.7.1 приведена упрощенная схема питания электроприемников:

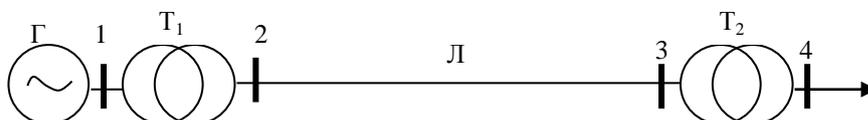


Рис. 7.1. Принципиальная схема электрической системы

От генераторов электростанций через трансформаторы T_1 электроэнергия поступает в линии Л питающей сети напряжения 110 ~ 220кВ и далее в трансформаторы T_2 . К обмоткам низкого напряжения T_2 подключена сеть низкого напряжения, от которой непосредственно питается большинство потребителей. Две величины характеризуют изменение напряжения у потребителей.

1) Потери напряжения (если пренебречь влиянием поперечной составляющей падения напряжения):

$$U = U_i - U_j = \frac{PR + QX}{U_H}, \quad (7.1)$$

т.е. арифметическая разность напряжений в любых двух точках передачи с напряжениями U_i и U_j ;

2) отклонение напряжения у потребителя $U_{\text{потр}} \%$ от номинального в заданной точке:

$$U_{\text{потр}\%} = \frac{U_{\text{потр}} - U_H}{U_H} \cdot 100\% \quad (7.2)$$

Для заданной схемы напряжение у потребителя: $U'_4 = U_2 - \Delta U_1$, где

U'_4 - приведенное напряжение у потребителя;

U_2 - напряжение в начале ЛЭП;

ΔU_2 - суммарные потери напряжения в ЛЭП и Т2. Действительное напряжение у потребителя:

$U_4 = \frac{U'_4}{K_{T2}}$, где K_{T2} - коэффициент трансформации Т2.

Окончательно получим:

$$U_4 = \frac{U_2 - \Delta U \Sigma}{K_{T2}} \quad (7.3)$$

Как видно из формулы, напряжение у потребителя зависит от трех факторов: от напряжения в начале ЛЭП; от суммарной потери напряжения; от коэффициента трансформации.

Таким образом, задача обеспечения допустимых отклонений напряжения в сетях низкого U состоит: 1) в регулировании напряжения на питающем конце сети; 2) в выборе необходимых ответвлений у трансформаторов; 3) в изменении $\Delta U \Sigma$.

Изменение потери напряжения в сети - потеря напряжения в элементах сети - ЛЭП и трансформаторах, определяемая по формуле:

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U_n} \quad (7.4)$$

зависит от L/n ом, нагрузки сети и ее электрического сопротивления.

Номинальное напряжение сети выбирается на основании технико-экономических расчетов, поэтому применение повышенных номинальных напряжений только из соображений уменьшения потери напряжения в сети обычно нецелесообразно.

Таким образом, изменять величину ΔU в сети практически возможно только путем изменения нагрузки сети или ее сопротивления.

Изменение сопротивления сети.

Активное сопротивление ЛЭП зависит от сечения провода F , которое выбирается независимо от условий режима напряжения. А индуктивное сопротивление ЛЭП V , мало зависит от сечения F . Поэтому практически снизить сопротивление ЛЭП можно за счет уменьшения X_L путем последовательного включения в ЛЭП конденсаторов. Необходимое емкостное сопротивление конденсаторной батареи при заданной потере напряжения в ЛЭП находится из уравнения:

$$\Delta U = \frac{PR + Q(X_i - X_K)}{U} \quad (7.5)$$

Зная X_K , можно определить число последовательно включенных конденсаторов и их мощность.

Предварительная работа

Предварительная подготовка для выполнения лабораторной работы на примере электрической сети на рис.7.1

Составить эквивалентную схему замещения электрической сети (рис.7.2) и определить их параметры.

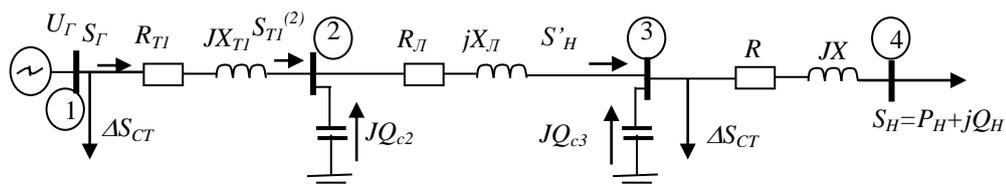


Рис. 7.2. Схема замещения электрической системы

На этой схеме расчетные параметры трансформаторов берутся из справочника. А также расчетные параметры линии в зависимости от марки провода для каждой линии длиной 1 км берутся из справочника. При этом

$$R_L = r_0 \cdot l; \quad X_L = X_0 \cdot l; \quad B_L = \epsilon_0 \cdot l.$$

Здесь l – длина линии, км: r_0 x_0 ϵ_0 – активное, реактивное сопротивление и емкостная проводимость линии длиной 1 км.

Осуществить расчет режима электрической сети в два этапа в следующем порядке.

Определить потери мощности в медной обмотке трансформатора T_2 :

$$\Delta P_{MT2} = \frac{P_H^2 + Q_H^2}{U_H^2} * R_{T2}; \quad \Delta Q_{MT2} = \frac{P_H^2 + Q_H^2}{U_H^2} X_{T2} \quad (7.6)$$

Определить нагрузку, приведенную к высокой стороне трансформатора T_2 :

$$Q_{C.3} = U_H^2 \frac{B_L}{2}; \quad (7.7)$$

$$\dot{S}'_H = P'_H + jQ'_H = P_H + jQ_H + (\Delta P_{MT2} + j\Delta Q_{MT2}) + (\Delta P_{CTT2} + j\Delta Q_{CTT2}) - jQ_{C3}. \quad (7.8)$$

Определим потери мощности в линии:

$$\dot{S}_L = \Delta P_L + j\Delta Q_L = \frac{P_H'^2 + Q_H'^2}{U_H^2} (R_L + jX_L) \quad (7.9)$$

Найти мощность трансформатора T_1 на высокой стороне:

$$Q_{C2} = U_H^2 * \frac{B_L}{2}; \quad \dot{S}_{T1}^{(2)} = P_{T1}^{(2)} + jQ_{T1}^{(2)} = S'_H + \Delta \dot{S}_L - jQ_{C2}. \quad (7.10)$$

Определить потери мощности в медной обмотке трансформатора T_1 :

$$\Delta P_{MT1} = \frac{P_{T1}^{(2)2} + Q_{T1}^{(2)2}}{U_H^2} * R_{T1}, \quad \Delta Q_{MT1} = \frac{P_{T1}^{(2)2} + Q_{T1}^{(2)2}}{U_H^2} X_L \quad (7.11)$$

Мощность на шинах генератора без учета ΔS_{CTT1}

$$\dot{S}_G = P_G + jQ_G = \dot{S}_{T1}^{(2)} + \Delta \dot{S}_{MT1}. \quad (7.12)$$

Определим суммарные потери активной мощности:

$$\Delta P_\Sigma = P_r - P_H \quad (7.13)$$

После этого осуществим второй этап расчета. Считать напряжение генератора заданным: $U_{ГЕН} = 10,5\text{кВ}$. Определить приведенное напряжение ТТ:

$$U_1' = U_G * K_{T1}, \text{ где } K_{T1} = \frac{U_{BT1}}{U_{HT1}}.$$

$$\text{Для } U_H = 220\text{кВ}, \quad K_{T1} = \frac{242}{10.5}$$

$$\text{Для } U_H = 110\text{кВ} \quad K_{T2} = \frac{121}{10.5}$$

Потери напряжения в ТТ:

$$U'_G = K_{T1} * U_G; \quad K_{T1} = \frac{U_{BT1}}{U_{HT1}}.$$

Здесь:

Номинальные напряжения высокой и низкой стороны обмотки трансформатора T_1 :

Потери напряжения в трансформаторе ТТ:

$$\Delta U_{T1} = \frac{P_G R_{T1} + Q_G X_{T1}}{U'_G} \quad (7.14)$$

Напряжение в начале ЛЭП: $U_2 = U'_{T1} - \Delta U_{T1}$

Потери ΔU в ЛЭП:

$$\Delta U_{ЛЭП} = \frac{(P_1^{(3)} + \Delta P_1) R_{Л1} + (Q_1^{(3)} + \Delta Q) X_{Л1}}{U_2} \quad (7.15)$$

Напряжение в конце ЛЭП: $U_3 = U_2 - \Delta U_{ЛЭП}$.

Потери напряжения ΔU в Т2:

$$\Delta U_{T2} = \frac{(P_M + P_{MT2}) R_{T2} + (Q_M + Q_{MT2}) X_{T2}}{U_3} \quad (7.16)$$

Приведенное напряжение на шинах нагрузки:

$$U'_H = U_3 - \Delta U_{T2}.$$

Действительное напряжение на нагрузке:

$$U_4 = \frac{U'_4}{K_{T2}}, \text{ где } K_{T2} = \frac{U_{BT2}}{U_{HT2}}.$$

Для $U_H = 220 \text{ кВ}$, $K_{T2} = \frac{230}{U_{HT2}}$,

Для $U_H = 110 \text{ кВ}$, $K_{T2} = \frac{115}{U_{HT2}}$.

7.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Составить эквивалентную схему замещения электрической сети и расчёт режима.
2. При регулировании напряжения к допустимому значению ($U_{дон.} = 10,5 \text{ кВ} \pm 5\%$) у потребителя использовать следующие методы.
 - 1) Изменение напряжения на выходе генератора.
 - 2) Установка продольных компенсаций;
3. Результаты расчета напряжений свести в таблицу 7.1

Таблица 7.1

<i>N</i> п/п	Способы регулирования напряжения и параметры регулирующей установки	$U_G = U_1$ кВ	U_2 кВ	U_3 кВ	$U_4 = U_H$ кВ
1.	Начальное значение				
2.	При изменении напряжения на выходе генератора: $U_G =$				
3.	При установка продольных компенсации: $X_{КБ.} =$				

7.3. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА

В отчете должны быть представлены следующее:

1. Принципиальная схема заданной электрической сети и исходные данные.
2. Эквивалентная схема замещения электрической сети и их параметры.
3. Результаты расчета режима электрической сети методом в два этапа.

4. Расчет режима электрической сети на ЭВМ и результаты исследования методов регулирования напряжения.

ВАРИАНТЫ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Принципиальная схема электрической сети	№ варианта	S_H , МВА	l , км
<p>Схема 1</p> <p>2xAC-500</p> <p>Л</p> <p>ТДЦ-125000/220 ТРДЦН-100000/220</p>	1	$98+j72$	72
	2	$95+j74$	76
	3	$89+j64$	75
	4	$93+j66$	84
	5	$90+j65$	81
	6	$83+j65$	95
	7	$87+j65$	91
	8	$96+j70$	73
	9	$94+j74$	77
	10	$88+j63$	73
	11	$93+j68$	82
	12	$92+j66$	83
	13	$94+j67$	86
	14	$99+j75$	77
<p>Схема 2</p> <p>2xAC-185</p> <p>Л</p> <p>ТДЦ-80000/110 2xТРДЦН-63000/110</p>	1	$75+j50$	45
	2	$85+j40$	63
	3	$72+j47$	58
	4	$63+j41$	48
	5	$60+j42$	73
	6	$73+j47$	76
	7	$75+j47$	72
	8	$64+j36$	67
	9	$68+j45$	54
	10	$61+j41$	62
	11	$75+j47$	72
	12	$74+j51$	43
	13	$71+j46$	42
	14	$147+j96$	72

7.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. От каких факторов зависит напряжение у потребителя?
2. Как можно менять потери напряжения в электрических сетях?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8 РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ИЗМЕНЕНИЕМ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Цель работы:

Исследование регулирования напряжения электрической сети изменением реактивной мощности.

8.1 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

На рис.8.1 приведена упрощенная схема питания электроприемников:

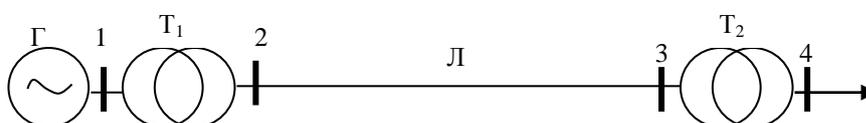


Рис. 8.1. Простейшая схема электрической системы

От генераторов электростанций через трансформаторы T_1 электроэнергия поступает в линии L питающей сети напряжения 110 ~ 220кВ и далее в трансформаторы T_2 . К обмоткам низкого напряжения T_2 подключена сеть низкого напряжения, от которой непосредственно питается большинство потребителей. Две величины характеризуют изменение напряжения у потребителей.

1) Потери напряжения (если пренебречь влиянием поперечной составляющей падения напряжения):

$$U = U_i - U_j = \frac{PR + QX}{U_H}, \quad (8.1)$$

т.е. арифметическая разность напряжений в любых двух точках передачи с напряжениями U_i и U_j ;

2) отклонение напряжения у потребителя $U_{\text{потр}} \%$ от номинального в заданной точке:

$$U_{\text{потр}\%} = \frac{U_{\text{потр}} - U_H}{U_H} \cdot 100\% \quad (8.2)$$

Для заданной схемы напряжение у потребителя: $U'_4 = U_2 - \Delta U_1$, где U'_4 - приведенное напряжение у потребителя;

U_2 - напряжение в начале ЛЭП;

ΔU_2 - суммарные потери напряжения в ЛЭП и Т2. Действительное напряжение у потребителя:

$U_4 = \frac{U'_4}{K_{T2}}$, где K_{T2} - коэффициент трансформации Т2.

Окончательно получим:

$$U_4 = \frac{U_2 - \Delta U \Sigma}{K_{T2}} \quad (8.3)$$

Как видно из формулы, напряжение у потребителя зависит от трех факторов: от напряжения в начале ЛЭП; от суммарной потери напряжения; от коэффициента трансформации.

Таким образом, задача обеспечения допустимых отклонений напряжения в сетях низкого U состоит: 1) в регулировании напряжения на питающем конце сети; 2) в выборе необходимых ответвлений у трансформаторов; 3) в изменении $\Delta U \Sigma$.

Изменение потери напряжения в сети - потеря напряжения в элементах сети - ЛЭП и трансформаторах, определяемая по формуле:

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U_H} \quad (8.4)$$

зависит от $L/\text{ном}$, нагрузки сети и ее электрического сопротивления.

Номинальное напряжение сети выбирается на основании технико-экономических расчетов, поэтому применение повышенных номинальных напряжений только из соображений уменьшения потери напряжения в сети обычно нецелесообразно.

Таким образом, изменять величину ΔU в сети практически возможно только путем изменения нагрузки сети или ее сопротивления.

Изменение нагрузок сети.

Нагрузка сети определяется мощностью, одновременно потребляемой, присоединенными к ней электроприемниками, и теряемой в элементах сети. Активная мощность вырабатывается только генераторами электростанций, что не позволяет изменять P сети в целях изменения потерь напряжения в ней.

В противоположность этому реактивная мощность может вырабатываться не только генераторами электростанций, но и другими источниками Q - компенсирующими источниками. К их числу относятся синхронные компенсаторы (СК) и батареи

конденсаторов (БК), устанавливаемые электрических сетях и вблизи потребителей.

Выбор мощности СК по условиям регулирования напряжения выражается формулой:

$$Q_{ск} = \frac{(U_{2ЖЕЛ} - U_2) \cdot U_{2ЖЕЛ}}{X_{\Sigma}} \quad (8.5)$$

где

$U_{2ЖЕЛ}$ - желаемое напряжение потребителя ;

U_2 - напряжение потребителя при отсутствии КУ;

X_{Σ} - суммарное сопротивление сети.

Разность $(U_{2ЖЕЛ} - U_2)$ - величина, на которую необходимо изменить напряжение на шинах вторичного напряжения подстанции. В режиме максимальных нагрузок эта разность положительна $U_{2ЖЕЛ} > U_2$, что соответствует работе СК с перевозбуждением. В режиме минимальных нагрузок эта разность может быть отрицательна $U_{2ЖЕЛ} < U_2$, что соответствует работе СК с недовозбуждением.

Предварительная работа

Предварительная подготовка для выполнения лабораторной работы на примере электрической сети на рис.8.1

Составить эквивалентную схему замещения электрической сети (рис.8.2) и определить их параметры.

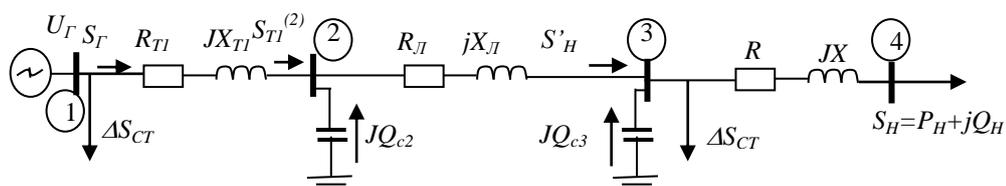


Рис. 8.2. Схема замещения электрической системы

На этой схеме расчетные параметры трансформаторов берутся из справочника. А также расчетные параметры линии в зависимости от марки провода для каждой линии длиной 1 км берутся из справочника. При этом

$$R_{л} = r_0 \cdot l; \quad X_{л} = X_0 \cdot l; \quad B_{л} = \epsilon_0 \cdot l$$

Здесь l – длина линии, км: r_0 x_0 ϵ_0 - активное, реактивное сопротивление и емкостная проводимость линии длиной 1 км.

Осуществить расчет режима электрической сети в два этапа в следующем порядке.

Определить потери мощности в медной обмотке трансформатора T_2 :

$$\Delta P_{MT2} = \frac{P_H^2 + Q_H^2}{U_H^2} * R_{T2}; \quad \Delta Q_{MT2} = \frac{P_H^2 + Q_H^2}{U_H^2} X_{T2} \quad (8.6)$$

Определить нагрузку, приведенную к высокой стороне трансформатора T_2 :

$$Q_{C.3} = U_H^2 \frac{B_{Л}}{2}; \quad (8.7)$$

$$\dot{S}'_H = P'_H + jQ'_H = P_H + jQ_H + (\Delta P_{MT2} + j\Delta Q_{MT2}) + (\Delta P_{CTT2} + j\Delta Q_{CTT2}) - jQ_{C.3}. \quad (8.8)$$

Определим потери мощности в линии:

$$\dot{S}_{Л} = \Delta P_{Л} + j\Delta Q_{Л} = \frac{P'^2_H + Q'^2_H}{U_H^2} (R_{Л} + jX_{Л}) \quad (8.9)$$

Найти мощность трансформатора T_1 на высокой стороне:

$$Q_{C2} = U_H^2 * \frac{B_{Л}}{2}; \quad \dot{S}_{T1}^{(2)} = P_{T1}^{(2)} + jQ_{T1}^{(2)} = S'_H + \Delta \dot{S}_{Л} - jQ_{C2} \quad (8.10)$$

Определить потери мощности в медной обмотке трансформатора T_1 :

$$\Delta P_{MT1} = \frac{P_{T1}^{(2)2} + Q_{T1}^{(2)2}}{U_H^2} * R_{T1}, \quad \Delta Q_{MT1} = \frac{P_{T1}^{(2)2} + Q_{T1}^{(2)2}}{U_H^2} X_{Л} \quad (8.11)$$

Мощность на шинах генератора без учета ΔS_{CTT1}

$$\dot{S}_Г = P_Г + jQ_Г = \dot{S}_{T1}^{(2)} + \Delta \dot{S}_{MT1} \quad (8.12)$$

Определим суммарные потери активной мощности:

$$\Delta P_{\Sigma} = P_Г - P_H \quad (8.13)$$

После этого осуществим второй этап расчета. Считать напряжение генератора заданным: $U_{ГЕН} = 10,5$ кВ. Определить приведенное напряжение ТТ:

$$U_1' = U_Г \cdot K_{T1}, \quad \text{где} \quad K_{T1} = \frac{U_{BT1}}{U_{HT1}}.$$

$$\text{Для } U_H = 220 \text{кВ}, \quad K_{T1} = \frac{242}{10.5}$$

$$\text{Для } U_H = 110 \text{кВ} \quad K_{T2} = \frac{121}{10.5}$$

Потери напряжения в ТТ:

$$U'_Г = K_{T1} \cdot U_Г; \quad K_{T1} = \frac{U_{BT1}}{U_{HT1}}.$$

Здесь:

Номинальные напряжения высокой и низкой стороны обмотки трансформатора T_1 :

Потери напряжения в трансформаторе ТТ:

$$\Delta U_{T1} = \frac{P_{\Gamma} R_{T1} + Q_{\Gamma} X_{T1}}{U'_{\Gamma}} \quad (8.14)$$

Напряжение в начале ЛЭП: $U_2 = U'_{T1} - \Delta U_{T1}$

Потери ΔU в ЛЭП:

$$\Delta U_{ЛЭП} = \frac{(P_1^{(3)} + \Delta P_1) R_{Л1} + (Q_1^{(3)} + \Delta Q) X_{Л1}}{U_2} \quad (8.15)$$

Напряжение в конце ЛЭП: $U_3 = U_2 - \Delta U_{ЛЭП}$.

Потери напряжения ΔU в T_2 :

$$\Delta U_{T2} = \frac{(P_M + P_{MT2}) R_{T2} + (Q_M + Q_{MT2}) X_{T2}}{U_3} \quad (8.16)$$

Приведенное напряжение на шинах нагрузки:

$$U'_H = U_3 - \Delta U_{T2}.$$

Действительное напряжение на нагрузке:

$$U_4 = \frac{U'_H}{K_{T2}}, \text{ где } K_{T2} = \frac{U_{BT2}}{U_{HT2}}.$$

$$\text{Для } U_H = 220 \text{ кВ}, K_{T2} = \frac{230}{U_{HT2}},$$

$$\text{Для } U_H = 110 \text{ кВ}, K_{T2} = \frac{115}{U_{HT2}}.$$

8.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Составить эквивалентную схему замещения электрической сети и расчёт режима.

2. При регулировании напряжения к допустимому значению ($U_{дон.} = 10,5 \text{ кВ} \pm 5\%$) у потребителя использовать следующие методы.

1) Изменение напряжения на выходе генератора.

2) Установка синхронных компенсаторов;

3. Результаты расчета напряжений свести в таблицу 8.1

Таблица 8.1

N п/п	Способы регулирования напряжения и параметры регулирующей установки	$U_{\Gamma} = U_1$ кВ	U_2 кВ	U_3 кВ	$U_4 = U_H$ кВ
1.	Начальное значение				
2.	При изменении напряжения на выходе генератора: $U_{\Gamma} =$				
3.	При установке синхронного компенсатора: $Q_{ск.} =$				

8.3. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА

В отчете должно быть представлено следующее:

1. Принципиальная схема заданной электрической сети и исходные данные.
2. Эквивалентная схема замещения электрической сети и их параметры.
3. Результаты расчета режима электрической сети методом в два этапа.
4. Расчет режима электрической сети на ЭВМ и результаты исследования методов регулирования напряжения.

ВАРИАНТЫ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Принципиальная схема электрической сети	№ варианта	S_H , МВА	l , км
<p style="text-align: center;">Схема 1</p> <p style="text-align: center;">ТДЦ-200000/220 2xТРДЦН-100000/220</p>	1	150+j100	65
	2	130+j80	85
	3	145+j95	79
	4	125+j83	68
	5	120+j85	73
	6	146+j93	96
	7	151+j94	92
	8	128+j72	87
	9	136+j96	74
	10	123+j82	22
	11	150+j95	98
	12	148+j102	63
	13	143+j93	68
	14	147+j96	92
<p style="text-align: center;">Схема 2</p> <p style="text-align: center;">ТДЦ-125000/220 ТРДЦН-100000/220</p>	1	98+j72	72
	2	95+j74	76
	3	89+j64	75
	4	93+j66	84
	5	90+j65	81
	6	83+j65	95

	7	87+j65	91
	8	96+j70	73
	9	94+j74	77
	10	88+j63	73
	11	93+j68	82
	12	92+j66	83
	13	94+j67	86
	14	99+j75	77

8.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. От каких факторов зависит напряжение у потребителя?
2. Как можно менять потери напряжения в электрических сетях?
3. Как изменится напряжение, если синхронный компенсатор, установленный у потребителя, перевести в режим потребления реактивной мощности? Почему?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9

УМЕНЬШЕНИЕ ПОТЕРЬ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Цель работы: Исследование методов по снижению потерь в электрических сетях на ЭВМ (программа Regim)

9.1 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

При передаче электроэнергии с шин электростанций до потребителей часть электроэнергии неизбежно расходуется на нагрев проводников, создание электромагнитных полей и другие эффекты. Этот расход в дальнейшем будем называть потерями электроэнергии. Использование термина «потери электроэнергии» требует внесения определенной ясности, так как в других отраслях народного хозяйства подобный термин ассоциируется с понятиями потери от брака, от нарушения технологического процесса и т.д.

Величина потерь электроэнергии в каком-либо элементе сети существенно зависит от характера нагрузки и ее изменения в течение рассматриваемого периода времени. В линии, работающей с постоянной нагрузкой и имеющей потери активной мощности ΔP , потери электроэнергии за время t составят

$$\Delta W = \Delta Pt \quad (9.1)$$

Если же нагрузка в течение года изменяется, то потери электроэнергии можно рассчитать различными способами. Все методы в зависимости от используемой математической модели можно разделить на две большие группы — детерминированные и вероятностно-статистические. Следует отметить, что перечисленные методы имеют множество модификаций и программных реализаций. Рассмотрим сначала детерминированные методы.

Наиболее точный метод расчета потерь электроэнергии ΔW — это определение их по графику нагрузок ветви, причем расчет потерь мощности производится для каждой ступени графика. Этот метод иногда называют методом графического интегрирования. При расчете за каждый час получается почасовой расчет потерь электроэнергии. Различают суточные и годовые графики нагрузок. Суточные графики отражают изменение мощности нагрузки в течение суток. На рис. 9.1, а и б приведены летний и зимний суточные графики активной и реактивной нагрузки. Годовой график строится на основе характерных суточных графиков за весенне-летний и осенне-зимний периоды. Это пример упорядоченного графика, т. е. такого, в котором все значения нагрузки расположены в порядке убывания (рис. 9.1, в). Такой график показывает длительность работы в течение года с различной нагрузкой. Начальная ордината этого графика равна максимальной нагрузке. По суточным графикам с учетом количества различных типов суток (суббота, воскресенье, понедельник, рабочий день) в году для каждого значения мощности нагрузки суммируется время, в течение которого данная нагрузка имела место в течение года. В начале определяется время, в течение которого имела место максимальная нагрузка, а затем отрезки времени для других значений мощности нагрузки, берущихся в порядке убывания. В результате получаем годовой график нагрузки, который показывает продолжительность работы при данной нагрузке. Поэтому такой график называют графиком по продолжительности.

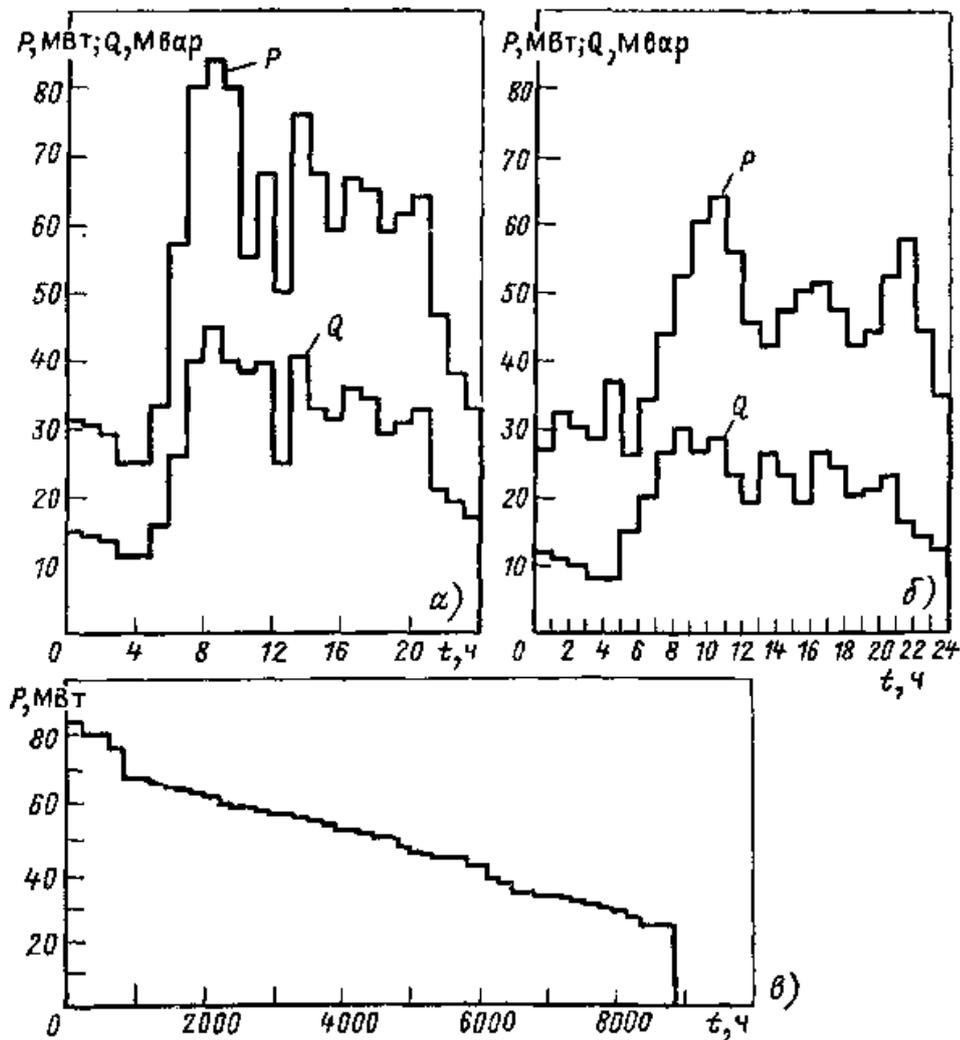


Рис. 9.1. Графики нагрузок:

а — зимний суточный, б — летний суточный, в — по продолжительности

Классификация мероприятия по снижению потерь электроэнергии. В условиях возрастающей напряженности топливно- энергетического баланса снижение потерь в электрических сетях становится одним из важнейших источников экономии топлива.

При анализе потерь электроэнергии принято различать следующие виды потерь:

отчетная величина потерь электроэнергии в энергосистеме— определяется как разность между количеством электроэнергии, отпущенной в сеть собственными электростанциями, электростанциями других ведомств и соседними

энергоуправлениями, и реализованной электроэнергией, вычисленной по сумме оплаченных счетов от потребителей;

расчетная или техническая величина потерь — определяется по известным параметрам режимов работы и параметрам элементов сети, она обусловлена расходом электроэнергии на нагрев проводников и создание электромагнитных полей;

коммерческие потери — определяются как разность между отчетными и техническими потерями, они обусловлены несовершенством системы учета, неодновременностью и неточностью снятия показаний счетчиков, погрешностью используемых приборов учета, неравномерностью оплаты электропотребления, наличием без учётных потребителей, хищениями и т. д.

Для снижения потерь электроэнергии разработано множество мероприятий. Сложность проблемы выбора оптимального состава мероприятий привела к необходимости их классификации.

В настоящее время нет единой установившейся классификации мероприятий по снижению потерь мощности и энергии. Чаще всего используется классификация, приведенная. Мероприятия делятся на три группы: организационные, технические и мероприятия по совершенствованию систем расчетного и технического учета электроэнергии.

Организационные мероприятия практически не требуют для их внедрения дополнительных капиталовложений. Технические мероприятия требуют капиталовложений. Их следует разделить на мероприятия с целевым эффектом снижения потерь и мероприятия с соответствующим снижением потерь. Технические мероприятия с целевым эффектом снижения потерь разрабатываются специально для снижения потерь электроэнергии. Капиталовложения в эти мероприятия окупаются целиком за счет снижения потерь. Срок окупаемости не должен превышать нормативного значения, равного 8,3 года. К техническим мероприятиям с сопутствующим снижением потерь относится практически весь ввод электросетевых объектов при развитии энергосистемы за счет централизованных капитальных вложений.

Расчет перетоков мощности и потерь необходимо произвести для трех режимов (максимального, минимального и аварийного).

Потери мощности в трансформаторах были подсчитаны при определении расчетных нагрузок. Потери мощности в электрической сети определены при расчете электрического режима на ЭВМ.

Потери энергии в ВЛ определяются:

$$\Delta \mathcal{E}_L = \Delta P_{\max} \cdot \tau \quad (9.2)$$

где P_{\max} - потери мощности при максимальной нагрузке, МВт

τ - время максимальных потерь, ч.

$$\tau = (0,124 + T_{\text{ср. вЗВ}} / 10000) \cdot 8760 \quad (9.3)$$

$T_{\text{ср. вЗВ}}$ - время использования максимальной нагрузки (средневзвешенное значение по системе).

Потери энергии в трансформаторах определяются:

$$\Delta \mathcal{E}_T = \Delta P_{\text{ХХ}} \cdot 8760 + \Delta P_{\text{М}} \cdot \tau, \quad (9.4)$$

где $\Delta P_{\text{ХХ}}$ - потери холостого хода, МВт;

$\Delta P_{\text{М}}$ - потери в меди, МВт;

τ - время максимальных потерь, определяемое по формуле (9.3)

где $T_{\text{тах}}$ - время использования максимальной нагрузки.

Суммирование потери энергии по отдельным элементам сети, получим $\Delta \mathcal{E}_\Sigma$

9.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Построение эквивалентной схемы замещения электрической сети и расчет их параметров.

2. Расчет методов уменьшения потерь в электроэнергетических сетях:

а) С помощью подсоединения синхронного компенсатора;

в) С помощью подсоединения устройство продольной компенсации.

Предварительная работа

Предварительная подготовка для выполнения лабораторной работы на примере электрической сети на рис.9.2

Составить эквивалентную схему замещения электрической сети (рис.9.2) и определить их параметры.

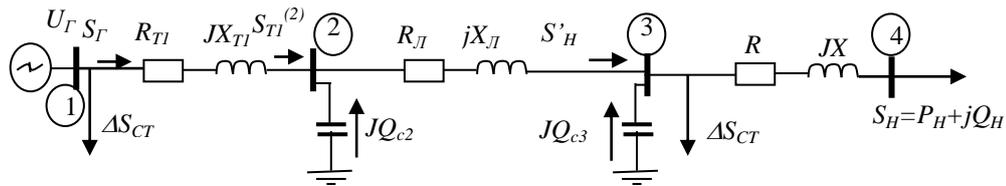


Рис. 9.2. Схема замещения электрической системы

На этой схеме расчетные параметры трансформаторов берутся из справочника. А также расчетные параметры линии в зависимости от марки провода для каждой линии длиной 1 км берутся из справочника. При этом

$$R_{л} = r_0 \cdot l; X_{л} = X_0 \cdot l; B_{л} = \epsilon_0 \cdot l. \quad (9.5)$$

Здесь l – длина линии, км: r_0 x_0 ϵ_0 -активное, реактивное сопротивление и емкостная проводимость линии длиной 1 км.

Осуществить расчет режима электрической сети в два этапа в следующем порядке.

Определить потери мощности в медной обмотке трансформатора T_2 :

$$\Delta P_{MT2} = \frac{P_H^2 + Q_H^2}{U_H^2} * R_{T2}; \Delta Q_{MT2} = \frac{P_H^2 + Q_H^2}{U_H^2} X_{T2} \quad (9.6)$$

Определить нагрузку, приведенную к высокой стороне трансформатора T_2 :

$$Q_{C.3} = U_H^2 \frac{B_{л}}{2}; \quad (9.7)$$

$$\dot{S}'_H = P'_H + jQ'_H = P_H + jQ_H + (\Delta P_{MT2} + j\Delta Q_{MT2}) + (\Delta P_{CTT2} + j\Delta Q_{CTT2}) - jQ_{C.3}. \quad (9.8)$$

Определим потери мощности в линии:

$$\dot{S}_{л} = \Delta P_{л} + j\Delta Q_{л} = \frac{P_H'^2 + Q_H'^2}{U_H^2} (R_{л} + jX_{л}) \quad (9.9)$$

Найти мощность трансформатора T_1 на высокой стороне:

$$Q_{C2} = U_H^2 * \frac{B_{л}}{2}; \dot{S}_{T1}^{(2)} = P_{T1}^{(2)} + jQ_{T1}^{(2)} = S'_H + \Delta \dot{S}_{л} - jQ_{C2}. \quad (9.10)$$

Определить потери мощности в медной обмотке трансформатора T_1 :

$$\Delta P_{MT1} = \frac{P_{T1}^{(2)2} + Q_{T1}^{(2)2}}{U_H^2} \cdot R_{T1}, \Delta Q_{MT1} = \frac{P_{T1}^{(2)2} + Q_{T1}^{(2)2}}{U_H^2} \cdot X_{л} \quad (9.11)$$

Мощность на шинах генератора без учета ΔS_{CTT1}

$$\dot{S}_r = P_r + jQ_r = \dot{S}_{r1}^{(2)} + \Delta \dot{S}_{MT1}. \quad (9.12)$$

Определим суммарные потери активной мощности:

$$\Delta P_\Sigma = P_r - P_n \quad (9.13)$$

9.3. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА

В отчете должны быть представлены следующее:

1. Принципиальная схема заданной электрической сети и исходные данные.
2. Эквивалентная схема замещения электрической сети и их параметры.
3. Результаты расчета режима электрической сети методом в два этапа.
4. Расчет режима электрической сети на ЭВМ и результаты исследования методов регулирования напряжения.

ВАРИАНТЫ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Принципиальная схема электрической сети	№ варианта	S_n , МВА	l , км
<p style="text-align: center;">Схема 1</p> <p style="text-align: center;">ТДЦ-2000000/220 2xАС-500 Л 2xТРДЦН-1000000/220</p>	1	150+j100	65
	2	130+j80	85
	3	145+j95	79
	4	125+j83	68
	5	120+j85	73
	6	146+j93	96
	7	151+j94	92
	8	128+j72	87
	9	136+j96	74
	10	123+j82	22
	11	150+j95	98
	12	148+j102	63
	13	143+j93	68
	14	147+j96	92
	1	98+j72	72
	2	95+j74	76
	3	89+j64	75
	4	93+j66	84

<p style="text-align: center;">Схема 2</p> <p style="text-align: center;">ТДЦ-125000/220 ТРДЦН-100000/220</p>	5	$90+j65$	81	
	6	$83+j65$	95	
	7	$87+j65$	91	
	8	$96+j70$	73	
	9	$94+j74$	77	
	10	$88+j63$	73	
	11	$93+j68$	82	
	12	$92+j66$	83	
	13	$94+j67$	86	
	14	$99+j75$	77	
	<p style="text-align: center;">Схема 3</p> <p style="text-align: center;">ТДЦ-80000/110 2хТРДЦН-63000/110</p>	1	$75+j50$	45
		2	$85+j40$	63
		3	$72+j47$	58
		4	$63+j41$	48
5		$60+j42$	73	
6		$73+j47$	76	
7		$75+j47$	72	
8		$64+j36$	67	
9		$68+j45$	54	
10		$61+j41$	62	
11		$75+j47$	72	
12		$74+j51$	43	
13		$71+j46$	42	
14		$147+j96$	72	

9.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. С чем связан уровень напряжения на шинах потребителя?
2. Как можно уменьшить потери электрических сетях?
3. Снижение потерь с помощью синхронного компенсатора.
4. Снижение потерь при подключении устройств продольной компенсации.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ, ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Цель работы: Изучение методов повышения экономической работы замкнутых электрических сетей.

10.1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Для обеспечения высокой надежности электроснабжения электрических потребителей используют замкнутые сети. Кроме того, использование замкнутых сетей позволяет уменьшить потери по сравнению с незамкнутыми сетями.

При однородности замкнутых сетей передача мощности потребителям производится с наименьшими потерями. Такие сети характеризуются равенством величин активных и реактивных сопротивлений участков, создающих контуры, а именно

$$\frac{x_i}{r_i} = const$$

В неоднородных замкнутых сетях сопротивления участков, создающих контуры, различны. В таких сетях естественное распределение мощности осуществляется на основании полного сопротивления $z=r+jx$.

Экономическое распределение, соответствующее наименьшим потерям мощности в замкнутых сетях, будет равно его распределению только вдоль активных сопротивлений.

Для изучения методов распределения перетока экономической мощности в неоднородной замкнутой электрической сети рассмотрим одноконтурную замкнутую сеть (рис.10.1 а). Здесь мощность передаётся потребителю через сеть, состоящую из неоднородного замкнутого контура.

$$\frac{x_1}{r_1} \neq \frac{x_2}{r_2}$$

Токи I_1 , I_2 , $I_{1\partial}$, $I_{2\partial}$ обозначенные на схеме, соответствуют естественному распределению мощности в контуре и для данной сети их значения можно определить, используя первый и второй закон Кирхгофа:

$$I_1 = I_n \cdot \frac{r_2 + jx_2}{r_1 + r_2 + j(x_1 + x_2)}, \quad I_2 = I_n \cdot \frac{r_1 + jx_1}{r_1 + r_2 + j(x_1 + x_2)} \quad (10.1)$$

Из-за неоднородности данной замкнутой сети, в ней экономическая мощность, соответствующая суммарной минимальной потере активной мощности в сети, будет одинаковой его естественному распределению при учете распределения только по активному сопротивлению. В таком случае экономический ток по участкам будет определяться следующим образом (рис.10.1):

$$I_{1э} = I_n \cdot \frac{r_2}{r_1 + r_2}, \quad I_{2э} = I_n \cdot \frac{r_1}{r_1 + r_2}. \quad (10.2)$$

Если считать, что по показанному на рис.10.1 а контуру будет протекать уравнивающий ток $I_{уп}$, за счет неоднородности сети (рис.8.1в), то в этом случае естественное и экономическое распределение токов будет связаны следующим равенством:

$$I_1 = I_{1э} + I_{уп}; \quad I_2 = I_{2э} - I_{уп}. \quad (10.3)$$

Таким образом, для минимизации потерь мощности в замкнутых сетях необходимо привести к нулю протекающие в них уравнивающие токи. Это достигается уменьшением неоднородности сети или компенсацией уравнивающих токов.

Уменьшение неоднородности сети достигается путем изменения сечения проводников или присоединением ПКУ (продольное компенсирующее устройство)

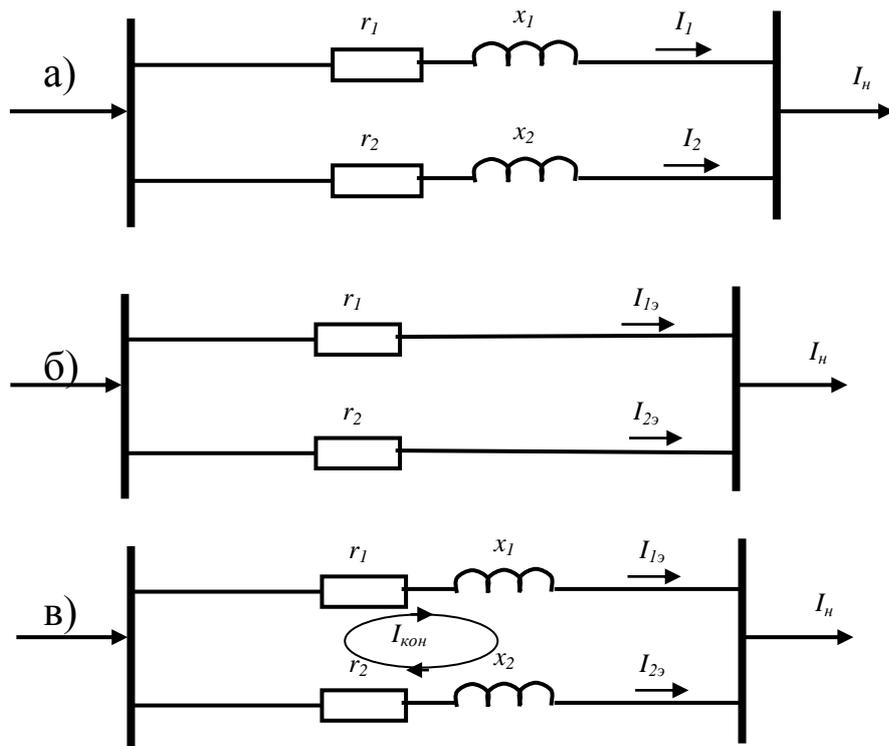


Рис.10.1. Схема замещения ЛЭП

Компенсация уравнивающих токов контура можно осуществить двумя путями:

1. Разрывом направления уравнивающих токов (путем приведения замкнутого контура к разомкнутому)

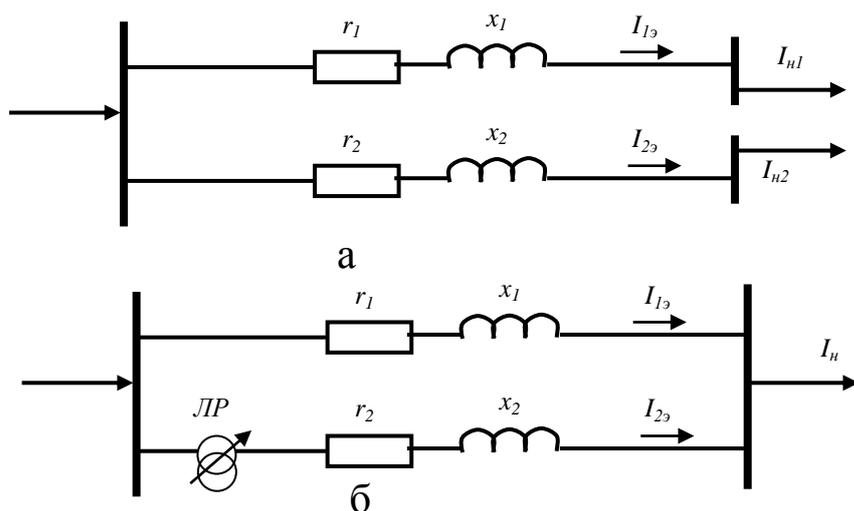


Рис.10.2. Схема компенсации

2. Созданием компенсации уравнивающих токов (регулирования перетока мощности в контуре) рис10.2б

Компенсация уравнивающих токов достигается путем введения в контуры дополнительных источников Э.Д.С. В свою очередь, дополнительный Э.Д.С. создаётся за счет линейных регуляторов, а именно, продольно-поперечным регулированием напряжения или за счет регулирования коэффициента трансформации.

Для определения величины дополнительного Э.Д.С. в снабжающей электрической сети или определения точки разрыва контура решаются специальные задачи его оптимизации. Для этого можно использовать положение расчета метод сети в нормальном режиме.

Обеспечение экономического режима путем размыкания контура

1. Рассчитывается нормальный режим электрической сети участков с учетом только активных сопротивлений (принимается, что $x=0$)

2. Определяется точка раздела потока распределения мощности в контуре на основании перетока мощностей по участкам и контур размыкается в этой точке, в полученных новых узлах ставятся мощности, направленные к точке раздела.

3. Рассчитывается нормальный режим вновь полученных разомкнутых участков с учетом полного сопротивления.

Полученные результаты считаются начальным экономическим режимом сети.

Обеспечение экономического режима путем продольно-поперечного регулирования.

1. Рассчитывается нормальный режим участков сети с учетом только активных сопротивлений (принимается $x=0$)

2. В место установки (или установленном) линейного регулятора и определяется переток мощности по первому пункту.

3. Рассчитывается нормальный режим полученных разомкнутых участков с учетом полного сопротивления

4. Рассчитываются величины напряжений в узлах полученных разомкнутых участков и коэффициенты трансформации линейных регуляторов.

10.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. На основании заданного варианта определяется схема замещения сети и его параметры. Номеруются узлы.

2. На ЭВМ рассчитывается начальный режим электрической сети.

Для этого:

2.1. Вносятся в таблицы 10.1 и 10.2 первоначальные значения.

$$N_{\text{узг.}} = \quad ; M_{\text{шох.}} = \quad ; U_{\text{БТ.}} = \quad \text{кВ}; \quad \varepsilon =$$

Таблица 10.1

№ ветви	Начало - i	Конец - j	R_{ij} , Ом	X_{ij} , Ом	K'_{Tij} ,	K''_{Tij} ,	B_{cij} , Сим

Таблица 10.2

Узел №	P_i , МВт	Q_i , МВАР	$U_i^{(0)}$, кВ	$\delta_i^{(0)}$, рад.	B_{ci} См

2.2) На ЭВМ рассчитывается нормальный режим эл.сети и результаты вносятся в таблицы 10.3 и 10.4. Выписываются значение суммарных потерь.

Таблица 10.3

Узел	Напряжения		Нагрузка	
	U, кВ	δ , гр	P, МВт	Q, МВАр

Таблица 10.4

Ветвь	Начало i	Конец, j	P_{ij} , МВт	Q_{ij}	P_{ji} , МВт	Q_{ji} , МВАр

Суммарные потери : $\Delta S =$

3. Обеспечивается экономическое состояние электрической сети путем размыкания контура. Для этого;

3.1. Рассчитывается состояние сети с учетом только активных сопротивлений ($x=0$) участков и результаты вписываются в таблицы 10.3 и 10.4.

3.2. Определяется точка раздела потока мощности на основании потока распределения определенных по пункту 10.1, и контур размыкается в этой точке.

3.3. Рассчитываются нормальные режимы вновь образованных участков с учетом полного сопротивления. Результаты расчетов вносятся в таблицы 10.3 и 10.4. Выписываются суммарные потери.

Полученные суммарные потери активной мощности сравниваются с результатами, полученными при первоначальном расчете нормального режима сети.

4. Экономическое состояние сети обеспечивается при помощи продольно-поперечного линейного регулятора. В этом случае, чтобы не повторять проделанных расчетов, рекомендуется воспользоваться результатами, Ю полученными в пункте 3.

4.1. На основании результатов напряжения узлов, появившихся при размыкания контура, определенных при выполнении пункта 3.3., определяются коэффициенты трансформации линейных регуляторов.

4.2. Устанавливая линейный регулятор с определенным коэффициентом трансформации, в точке раздела замыкают контур и рассчитываются состояние полученной сети. Результаты расчетов сводят в табл. 10.5. и 10.6. похожа на табл. 10.3. и 10.4. Выписываются суммарные потери мощности. Сравниваются результаты суммарных потерь мощности, полученные для начального режима и экономического режима контура, обеспеченного за счет его размыкания.

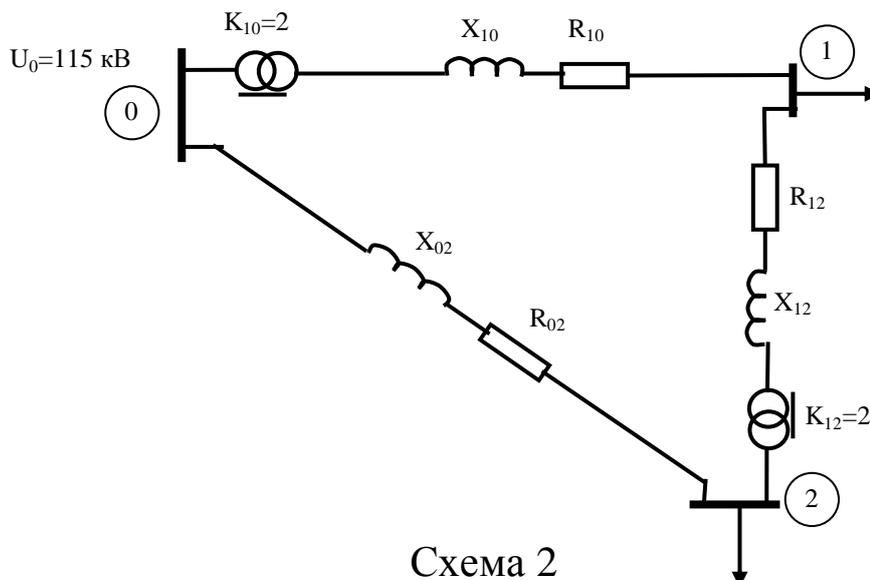
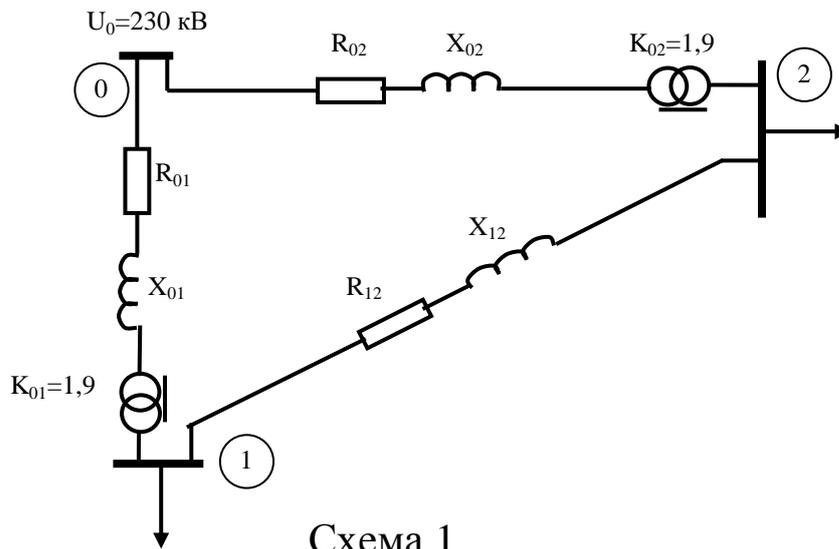
10.3. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА

В отчете выполнения лабораторной работы должно быть представлено следующее:

1. Название лабораторной работы и цель его выполнения.
2. Краткая теоретическая часть.
3. На основании варианта, выданного преподавателем, дать информацию о схеме электрической сети, нагрузках и узлах генерации.
4. Результаты расчета начального нормального режима электрической сети (заполненные таблицы и суммарные потери)
5. Результаты расчета экономического режима, полученного за счет размыкания контура (заполненные таблицы и суммарные потери)
6. Результаты расчета экономического режима электрической сети, обеспечиваемые за счет применения линейного продольно-поперечного регулятора (заполненные таблицы и суммарные потери)

Варианты по лабораторной работе

Номер	Номер	$P_1,$ МВт	$Q_1,$ МВАР	$P_2,$ МВт	$Q_2,$ МВАР	R_{01} Ом	X_{01} Ом	R_{02} Ом	$X_{02},$ Ом	$R_{12},$ Ом	X_{12} Ом
1	1	10	5	80	30	2,8	100	12,8	142	15	42
2	1	9	4	90	40	3	101	14	144	16	43
3	1	8	3	70	35	2,5	95	11,5	136	14	41
4	1	11	5	85	32	2,6	98	13	142	16,5	44
5	1	13	6	75	30	2	90	12	131	17	41
6	1	14	6	95	40	2,2	105	14,2	146	20	41
7	1	12	5	100	40	2	90	12	132	15	42
8	1	5	2	82	30	2,5	96	11,5	138	16	42
9	1	7	3	96	42	2,8	104	10,8	145	16,5	41
10	1	6	3	84	36	3	105	13	147,5	17	42,5
11	2	80	30	10	5	12,8	142	15	42	2,8	100
12	2	90	40	9	4	14	144	16	43	3	101
13	2	70	35	8	3	11,5	136	14	41	2,5	95
14	2	85	32	11	5	13	142	16,5	44	2,6	98
15	2	75	30	13	6	12	131	17	41	2	90
16	2	95	40	14	6	14,2	146	20	41	2,2	105
17	2	100	40	12	5	12	132	15	42	2	90
18	2	82	30	5	2	11,5	138	16	42	2,5	96
19	2	96	42	7	3	10,8	145	16,5	41	2,8	104
20	2	84	36	6	3	13	147,5	17	42,5	3	105



10.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что понимается под обеспечением экономического режима сети?
2. В каком случае естественное распределение мощности будет одинаковым с экономическим распределением? Объясните причины.
3. Что такое уравнивающий ток? За счет чего он появляется?
4. Какая связь между уравнивающим током и экономичным режимом сети?
5. Объясните смысл обеспечения экономического режима электрической сети.
6. Объясните смысл обеспечения экономического режима работы сети при использовании продольно-поперечного линейного регулятора.

Литература

1. Сафаров А.М., Гайибов Т.Ш., Суллийев А.Х. Электрические сети и системы. Учебное пособие.–Ташкент: Тафаккур бустони, 2013.-224 с.

2. Гайибов Т.Ш. Электрические сети и системы. Учебное пособие.– Т.: Ворис нашриёт, 2010.-160 с.

3. Гайибов Т.Ш. Электрические сети и системы. Сборник задач и примеров. –Т.: ТашГТУ, 2006.-160 с.

4. Электротехнический справочник: Производство, передача и распределение электрической энергии/Под общ. ред. профессоров МЭИ. Т.3 – М.: Изд. МЭИ, 2004. – 964 с.

5. Electric Power Systems/ В.М.Weedy, В.Ј.Sory, N.Jenkins, J.В.Yekanyake, G.Strbas.- 5th ed., UK, A. John Wiley and Sons, 2012.

5. Лыкин А.В. Электрические системы и сети: Конспект лекций. Ч.1 –Изд-во ЮНЕ Новосибирск,2000.- 83 с.

6. Лыкин А.В. Электрические системы и сети: Конспект лекций. Ч.1 –Изд-во ЮНЕ Новосибирск,2001.- 92 с.

СОДЕРЖАНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ.....	3
Лабораторная работа № 1.	Исследование нормальных режимов электрических систем.....	4
Лабораторная работа № 2.	Исследование режимов работы дальних линий электропередач.....	8
Лабораторная работа № 3.	Расчет нормального режима электрической сети методом Гаусса-Зейделя.....	13
Лабораторная работа № 4.	Расчет нормального режима электрической сети методом Ньютона-Рафсона.....	20
Лабораторная работа № 5.	Компенсация реактивной мощности электрической сети.....	28
Лабораторная работа № 6.	Регулирование напряжения в электрических сетях при изменении коэффициентов трансформации трансформаторов.....	33
Лабораторная работа № 7.	Регулирование напряжения в электрической сети при изменении её сопротивлений.....	39
Лабораторная работа № 8.	Регулирование напряжения в электрических сетях изменением реактивной мощности.....	45
Лабораторная работа № 9.	Понижения потери в электрических сетях.....	51
Лабораторная работа № 10.	Исследование методов повышения экономичности работы электрических сетей.....	59
	Литература.....	67

Редактор

Ахметжанова Г.М.