

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САХАЛИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В. П. Максимов, И. Г. Минервин, О. А. Федоров

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ

Учебно-методическое пособие для выполнения
лабораторных работ

Южно-Сахалинск
СахГУ
2015

УДК 621.31(076)
ББК 31.2-5
М 172

Печатается по решению учебно-методического совета
Сахалинского государственного университета, 2014 г.

Рецензент:

Н. А. Дробышев, доцент кафедры электроэнергетики
ФГБОУ ВПО «Комсомольск-на-Амуре государственный
технический университет», кандидат технических наук,
доцент.

М 172 **Максимов, В. П. Электроэнергетические системы и сети :**
учебно-методическое пособие для выполнения лаборатор-
ных работ / В. П. Максимов, И. Г. Минервин, О. А. Федоров. –
Южно-Сахалинск : СахГУ, 2015. – 68 с.
ISBN 978-5-88811-501-5

В учебно-методическом пособии изложены общие тре-
бования к выполнению практических работ в лаборатории
электроэнергетики. Содержание пособия включает все не-
обходимые данные, определен объем работы и порядок ее
выполнения. В работе указаны вопросы, на которые должны
быть даны ответы.

Учебно-методическое пособие предназначено для сту-
дентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика
и электротехника», изучающих дисциплину «Электроэнерге-
тические системы и сети».

УДК 621.31(076)
ББК 31.2-5

ISBN 978-5-88811-501-5

© Максимов В. П., 2015
© Минервин И. Г., 2015
© Федоров О. А., 2015
© Сахалинский государственный
университет, 2015

Содержание

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. «Натурное моделирование установившегося режима работы фазы электрической сети с односторонним питанием»	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. «Натурное моделирование установившегося режима работы фазы электрической сети с двусторонним питанием»	23
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. «Натурное моделирование установившегося режима работы трехфазной электрической сети с односторонним питанием»	42

Лабораторная работа № 1.

«Натурное моделирование установившегося режима работы фазы электрической сети с односторонним питанием»

1.1. Цель работы

Изучение установившегося режима работы одной фазы электрической сети с использованием лабораторного стенда, моделирующего фазу электрической сети с односторонним питанием.

1.2. Программа работы

1. Изучение теоретической части о сетях с односторонним питанием и определение их параметров режимов.

2. Ознакомление с лабораторным стендом и изучение его схемы и принципа действия для данной лабораторной работы.

3. Сборка схемы модели фазы электрической сети с односторонним питанием.

4. Измерение параметров режима в соответствии с указаниями по проведению эксперимента.

Анализ результатов и выводы.

1.3. Теоретическая часть

1.3.1. Схемы электрических систем и их элементы

Электрическая система – это электрическая цепь, предназначенная для производства, распределения и потребления электроэнергии.

Схемой замещения электрической цепи называют графическое изображение электрической цепи, показывающее последовательность соединения ее участков и отображающее свойства рассматриваемой электрической цепи. Электрическая цепь и соответственно ее схема содержат ветви, узлы и в общем случае контуры.

Ветвью называют участок электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных элементов (с одним и тем же током).

Узлом называют место соединения двух или большего числа ветвей. Одной ветвью может быть источник тока.

Контур – это любой замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям.

Если схема электрической цепи не содержит контуров, то она называется разомкнутой.

В теории цепей различают так называемые устранимые и неустраиваемые узлы и контуры. Устранимый узел – это такой, в котором соединяются только две ветви, устранимый контур образуется только двумя ветвями. Такие узлы и контуры можно легко устранить, применяя известное положение о последовательном и параллельном соединениях, если в число ветвей, соединяющихся в данном узле, не входят нелинейные источники тока. В дальнейшем будем говорить о неустраиваемых узлах и контурах.

В разомкнутых сетях питание каждой нагрузки можно осуществлять только с одной стороны. Каждый узел получает питание не более чем по одной ветви.

Схема, содержащая хотя бы один контур, называется замкнутой. В замкнутой сети есть хотя бы один узел, получающий питание по двум или более ветвям. Отключение какой-либо ветви не приводит к прекращению питания.

Элементы электрических схем делятся на *активные и пассивные*.

Пассивные элементы схем замещения (сопротивления и проводимости) создают пути для прохождения электрических токов. Пассивные элементы (ветви) электрических систем обычно разделяют на *продольные и поперечные*.

Поперечные пассивные элементы – это ветви, включенные между узлами схемы и нейтралью, то есть узлом, имеющим напряжение, равное нулю. На рис. 1.1 а, нейтраль – это узел О. На рис. 1.1 б этот же узел – земля. Продольные элементы – это ветви, соединяющие все узлы, кроме узла с напряжением, равным нулю, то есть продольные ветви не соединены с нейтралью. Продольные ветви включают активные и индуктивные сопротивления линий электропередачи (на рис. 1.1 а, б) и обмоток трансформатора, емкость устройств продольной компенсации.

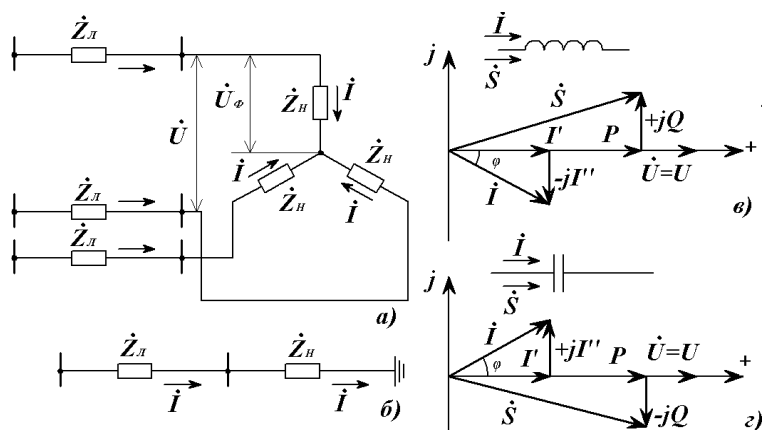


Рис. 1.1 – Пояснения к системе обозначений:
а, б – трехфазная и однофазная схема замещения;
в, г – векторные диаграммы токов, мощностей
 и напряжений активно-индуктивного и активно-
 емкостного элементов сети

Поперечные пассивные элементы соответствуют проводимостям линий электропередачи на землю, реакторам и конденсаторам, включенным на землю. В некоторых случаях потери в стали трансформаторов представляются в схеме замещения как поперечные проводимости.

Активные элементы схем замещения – источники ЭДС и тока. Для них наиболее характерным является то, что они определяют напряжение или токи в точках присоединения этих элементов в соответствующей цепи независимо от ее остальных параметров. Источники ЭДС в расчетах электрических систем используются редко.

Источники тока в расчетах электрических систем соответствуют нагрузкам потребителей и генераторов электрических станций. Именно в этих активных элементах потребляется и генерируется мощность.

Установившиеся режимы цепей, содержащих только линейные пассивные элементы и постоянные не изменяющиеся по модулю и фазе источники тока, описываются линейными алгебраическими уравнениями – линейными уравнениями устано-

вившегося режима. Такие цепи называются линейными электрическими цепями. Этот случай соответствует расчету установившихся режимов электрических систем при задании постоянных по модулю и фазе токов нагрузки потребителей и генераторов во всех узлах электрической системы, кроме одного.

В расчетах установившихся режимов электрических систем нелинейность пассивных элементов, как правило, не учитывается. В этом случае продольная часть схемы замещения всегда линейна. В то же время, как правило, при расчетах установившихся режимов электрических систем учитываются нелинейные характеристики источника тока. Нелинейность источника тока соответствует заданию в узлах нагрузки потребителей или генераторов с постоянной мощностью либо заданию нагрузки ее статистическими характеристиками, определяющими зависимость мощности от напряжения. Установившиеся режимы электрических систем с нелинейными источниками тока описываются нелинейными алгебраическими уравнениями – нелинейными уравнениями установившегося режима.

1.3.2. Расчет режима линии электропередачи при заданной мощности нагрузки

По заданному напряжению в конце линии $\dot{U}_2 = const$. Известны (рис. 1.2) мощность нагрузки $\dot{S}_2$, напряжение $\dot{U}_2$, сопротивление и проводимость линии $\dot{Z}_{12} = r_{12} + jx_{12}$, b_{12} . Надо определить напряжение $\dot{U}_1$, мощность в конце и в начале продольной части линии $\dot{S}_{12}^K$, $\dot{S}_{12}^H$, потери мощности $\Delta\dot{S}_{12}$, мощность в начале линии $\dot{S}_1$. Для проверки ограничений по нагреву иногда определяют ток в линии $\dot{S}_{12}$.

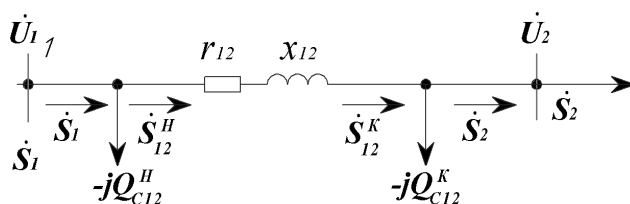


Рис. 1.2 – Схема замещения линии для расчета при заданной мощности нагрузки

Расчет состоит в последовательном определении от конца линии к началу неизвестных мощностей и напряжений при использовании первого закона Кирхгофа и закона Ома. Будем использовать мощности трех фаз и линейные напряжения. Зарядная (емкостная) мощность трех фаз в конце линии:

$$-jQ_{C12}^K = 3I_{C12}^{*K} \dot{U}_{2\Phi} = -\frac{1}{2} U_2^2 j b_{12} \quad (1.1)$$

Мощность в конце продольной части линии по первому закону Кирхгофа:

$$\dot{S}_{12}^K = \dot{S}_2 - jQ_{C12}^K. \quad (1.2)$$

Потери мощности в линии в соответствии с [1]:

$$\Delta \dot{S}_{12} = 3I_{12}^2 \dot{Z}_{12} = \frac{\dot{S}_{12}^{K2}}{U_2^2} \dot{Z}_{12} \quad (1.3)$$

Ток в начале и в конце продольной ветви линии одинаков. Мощность в начале продольной ветви линии больше, чем мощность в конце, на величину потерь мощности в линии, то есть:

$$\dot{S}_{12}^H = \dot{S}_{12}^K + \Delta \dot{S}_{12} \quad (1.4)$$

Линейное напряжение в начале линии по закону Ома [1] равно:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \sqrt{3} \dot{I}_{12} \dot{Z}_{12} = \dot{U}_2 + \frac{\dot{S}_{12}^{*K}}{\dot{U}_2^*} \dot{Z}_{12} \quad (1.5)$$

Емкостная мощность в начале линии:

$$-jQ_{C12}^H = -\frac{1}{2} U_1^2 j b_{12} \quad (1.6)$$

Мощность в начале линии:

$$\dot{S}_1 = \dot{S}_{12}^H - jQ_{C12}^H. \quad (1.7)$$

Задано напряжение в начале линии $\dot{U}_1 = const$. Известны (рис. 1.2) $\dot{S}_2, \dot{U}_2, \dot{Z}_{12} = r_{12} + j\dot{x}_{12}, b_{12}$.

Надо определить $\dot{U}_2, \dot{S}_{12}^K, \dot{S}_{12}^H, \Delta \dot{S}_{12}, \dot{S}_1$.

В данном случае невозможно последовательно от конца ли-

нии к началу определить неизвестные токи и напряжения по первому закону Кирхгофа и закону Ома, так как $\dot{U}_2$ неизвестно.

Можно осуществить приближенный расчет в два этапа.

Предположим, что

$$\dot{U}_2 = U_{\text{ном}}, \quad (1.8)$$

и определим потоки и потери мощности аналогично выражениям (1.1)–(1.4), используя (1.8):

$$-jQ_{c12}^K = -\frac{1}{2}U_{\text{ном}}^2jb_{12}; \quad (1.9)$$

$$\dot{S}_{12}^K = \dot{S}_2 - jQ_{c12}. \quad (1.10)$$

$$\Delta\dot{S}_{12} = \frac{\dot{S}_{12}^{K2}}{\dot{U}_{\text{ном}}^2} \dot{Z}_{12}; \quad (1.11)$$

$$\dot{S}_{12}^H = \dot{S}_{12}^K + \Delta\dot{S}_{12}. \quad (1.12)$$

Определим напряжение $\dot{U}_2$ по закону Ома, используя поток мощности $\dot{S}_{12}^H$ (рис. 1.2), найденный в первом этапе. Для этого используем закон Ома в виде (1.5), но выразим ток i_2 через $\dot{S}_{12}^H$ и $\dot{U}_1$:

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 - \sqrt{3}i_{12}\dot{Z}_{12} = \dot{U}_1 - \frac{\dot{S}_{12}^{*H}}{\dot{U}_1^*}\dot{Z}_{12}. \quad (1.13)$$

Потоки мощности на первом этапе определены приближенно, поскольку в (1.9) и (1.10) вместо $\dot{U}_2$ использовали $U_{\text{ном}}$. Соответственно напряжение $\dot{U}_2$ на втором этапе также определено приближенно, так как в (1.13) используется приближенное значение $\dot{S}_{12}^H$, определенное на первом этапе.

Возможно итерационное повторение расчета, то есть повторение первого и второго этапов для получения более точных значений мощностей и напряжений. Как правило, при проведении расчетов вручную такое уточнение не требуется.

1.3.3. Падение и потеря напряжения в линии

На рис. 1.3 приведена векторная диаграмма для линейных напряжений в начале и в конце линии $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_2$.

Падение напряжения – геометрическая (векторная) разность между комплексами напряжений начала и конца линий. На рис. 1.3 падение напряжения – это вектор $\overrightarrow{AB}$, то есть:

$$\overrightarrow{AB} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \sqrt{3}\dot{I}_{12}\dot{Z}_{12} \quad (1.14)$$

Продольной составляющей падения напряжения ΔU_{12}^K называют проекцию падения напряжения на действительную ось или на напряжения $\dot{U}_2$. $\Delta U_{12}^K = AC$ на рис. 1.3. Индекс «к» означает, что ΔU_{12}^K – проекция на напряжение конца линии $\dot{U}_2$. Обычно ΔU_{12}^K выражается через данные в конце линии: U_2, P_{12}^K, Q_{12}^K .

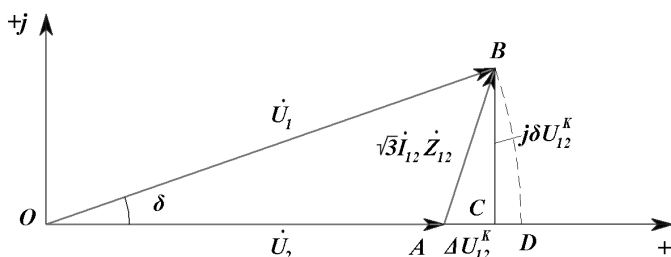


Рис. 1.3 – Векторная диаграмма напряжений в начале и в конце линии при расчете по данным конца

Поперечная составляющая падения напряжения δU_{12}^K – это проекция падения напряжения на мнимую ось, $\delta U_{12}^K =$ СВ на рис. 1.3. Таким образом:

$$\dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \sqrt{3}\dot{I}_{12}\dot{Z}_{12} = \Delta U_{12}^K + j\delta U_{12}^K. \quad (1.15)$$

Часто используют понятие «потеря напряжения» – это алгебраическая разность между модулями напряжений начала и конца линий. На рис. 1.3 $U_1 - U_2 = AD$. Если поперечная составляющая δU_{12}^K мала (например, в сетях $U_{\text{ном}} \leq 110$ кВ), то можно приближенно считать, что потеря напряжения равна продольной составляющей падения напряжения.

Расчет режимов электрических сетей ведется в мощностях,

поэтому выразим падение напряжения и его составляющие через поток мощности в линии.

Известны мощность и напряжение в конце линии (расчет напряжения в начале линии по данным конца). Выразим ток в линии $\dot{I}_{12}$ в (1.15) через мощность в конце продольной части линии $\dot{S}_{12}^K$ и напряжение $\dot{U}_2$:

$$\dot{I}_{12} = \frac{\dot{S}_{12}^{*K}}{\sqrt{3}\dot{U}_2^*}. \quad (1.16)$$

В результате получим:

$$\begin{aligned} \frac{P_{12}^K - Q_{12}^K}{U_2} (r_{12} + jx_{12}) &= \frac{P_{12}^K r_{12} + Q_{12}^K x_{12}}{U_2} + j \frac{P_{12}^K x_{12} - Q_{12}^K r_{12}}{U_2} = \\ &= \Delta U_{12}^K + j\delta U_{12}^K = \frac{P_{12}^K r_{12} + Q_{12}^K x_{12}}{U_2} + j\delta U_{12}^K \end{aligned} \quad (1.17)$$

Приравняв в (1.17) действительные и мнимые части, получим выражения продольной и поперечной составляющих падения по данным конца:

$$\Delta U_{12}^K = \frac{P_{12}^K r_{12} + Q_{12}^K x_{12}}{U_2}, \quad (1.18)$$

$$\delta U_{12}^K = \frac{P_{12}^K x_{12} - Q_{12}^K r_{12}}{U_2}. \quad (1.19)$$

Напряжение в начале линии:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \Delta U_{12}^K + j\delta U_{12}^K = \dot{U}_2 + \Delta U_{12}^K + j \frac{P_{12}^K x_{12} - Q_{12}^K r_{12}}{U_2}. \quad (1.20)$$

где $\dot{U}_2$ известно; $\Delta U_{12}^K, \delta U_{12}^K$ определяем из 1.18 и 1.19.

Соответственно модуль и фаза напряжения в начале линии (рис. 1.3).

$$\dot{U}_1 = \sqrt{(\dot{U}_2 + \Delta U_{12}^K)^2 + (\delta U_{12}^K)^2}; \quad (1.21)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\delta U_{12}^K}{\dot{U}_2 + \Delta U_{12}^K}. \quad (1.22)$$

Определение напряжения в начале линии по данным конца по выражениям (1.20), а также (1.18), (1.19) эквивалентно использованию закона Ома.

Известны мощность и напряжение в начале линии (расчет напряжения в конце линии по данным начала). Направим $\dot{U}_1$ по действительной оси, то есть примем, что $\dot{U}_1 = \dot{U}$ (рис. 1.4).

На рис. 1.4 изменилось положение осей в сравнении с рис. 1.3. Продольная составляющая падения напряжения $\Delta U_{12}^H = BC'$ – это проекция падения напряжения на действительную ось или на $\dot{U}_1$.

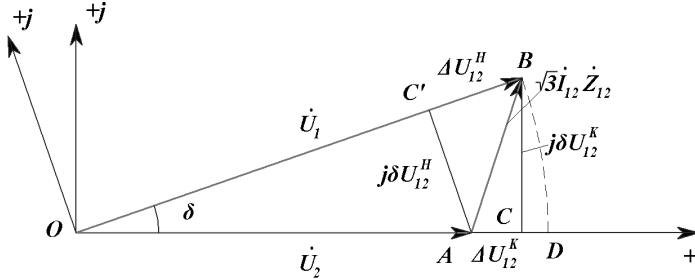


Рис. 1.4 – Векторная диаграмма линейных напряжений в начале и в конце линии при расчете по данным начала

Поперечная составляющая падения напряжения $\delta U_{12}^H = AC'$ – это проекция падения напряжения $\overline{AB}$ проектируется на различные оси. Поэтому:

$$\Delta U_{12}^H \neq \Delta U_{12}^K, \delta U_{12}^H \neq \delta U_{12}^K.$$

Если выразить ток в линии $\dot{I}_{12}$ аналогично (1.16) через известные в данном случае мощность в начале продольной ветви линии $\dot{S}_{12}^H$ и $\dot{U}_1$, то получим выражения, аналогичные (1.18), (1.19):

$$\Delta U_{12}^H = \frac{P_{12}^H r_{12} + Q_{12}^H x_{12}}{U_1}, \quad (1.23)$$

$$\delta U_{12}^K = \frac{P_{12}^H x_{12} - Q_{12}^H r_{12}}{U_1}. \quad (1.24)$$

Напряжение в конце линии:

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 - \Delta U_{12}^H - j\delta U_{12}^H \quad (1.25)$$

где $\dot{U}_1$ известно; $\Delta U_{12}^H, \delta U_{12}^H$ определяются из (1.23), (1.24). Модуль и фаза $\dot{U}_2$ равны:

$$\dot{U}_2 = \sqrt{(\dot{U}_1 - \Delta U_{12}^H)^2 - (\delta U_{12}^H)^2}; \quad (1.26)$$

$$tg\delta = \frac{\delta U_{12}^H}{\dot{U}_1 - \Delta U_{12}^H}. \quad (1.27)$$

Определение напряжения в конце линии по данным начала по выражениям (1.25), а также (1.23), (1.24) эквивалентно применению закона Ома в виде (1.13).

1.3.4. Расчет сети из двух последовательных линий при заданных мощностях нагрузки и напряжений в конце

Известны (рис. 1.5) мощности нагрузок $\dot{S}_2, \dot{S}_3$ напряжение в конце второй линии $\dot{U}_3$, сопротивления и проводимости линий 12 и 23 $\dot{Z}_{12} = r_{12} + jx_{12}, \dot{Z}_{23} = r_{23} + jx_{23}; b_{12}, b_{23}$. Надо определить неизвестные напряжения в узлах $\dot{U}_2, \dot{U}_1$, потоки и потери мощности в линиях $\dot{S}_{23}^K, \dot{S}_{23}^H, \dot{S}_{12}^K, \dot{S}_{12}^H, \Delta \dot{S}_{23}, \Delta \dot{S}_{12}$ и мощность $\dot{S}_1$, текущую от узла 1 в линию 12 (мощность источника питания).

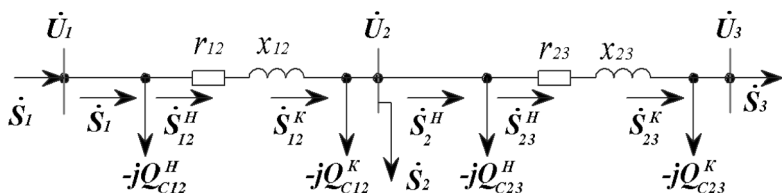


Рис. 1.5 – Схема замещения разомкнутой питающей сети

Расчет двух линий сводится к двум последовательным расчетам одной линии. От конца к началу каждой линии определяют потоки мощности и напряжения по первому закону Кирхгофа и закону Ома. Сначала рассчитывается по данным концам линии 23 (рис. 1.6).

Используются выражения (1.1)–(1.7) и определяются

$\dot{S}_{23}^K, \dot{S}_{23}^H, \Delta \dot{S}_{23}$, а также мощность $\dot{S}_2^H$, текущая от узла 2 в линию 23, и напряжение $\dot{U}_2$. Мощность $\dot{S}_2^H$, текущая от узла 2 в линию 23 (рис. 1.5), по первому закону Кирхгофа равна алгебраической сумме мощности в начале продольной ветви линии 23 и емкостной мощности в начале линии:

$$\dot{S}_2^H = \dot{S}_{23}^H - j\dot{Q}_{C23}^H. \quad (1.28)$$

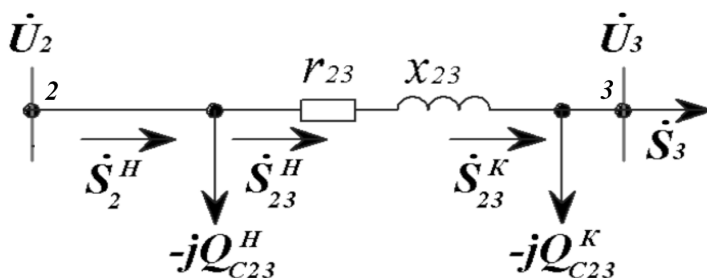


Рис. 1.6 – Схема замещения линии

Далее (рис. 1.7) рассчитывается линия 12 по данным конца, то есть по напряжению $\dot{U}_2$ и мощности $\dot{S}_2 + \dot{S}_2^H$.

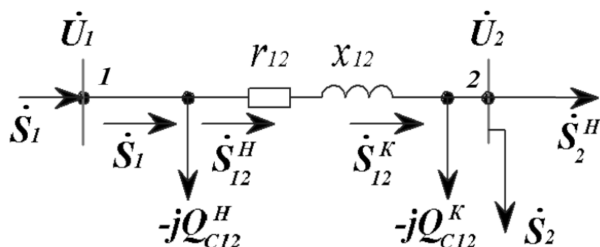


Рис. 1.7 – Схема замещения линии

В результате определяются потоки и потери мощности $\dot{S}_{12}^K, \dot{S}_{12}^H, \Delta \dot{S}_{12}$, напряжение $\dot{U}_1$ и мощность $\dot{S}_1$, текущая от узла 1 в линию 12. Векторная диаграмма (рис. 1.8) строится последовательно для линии 23 и 12.

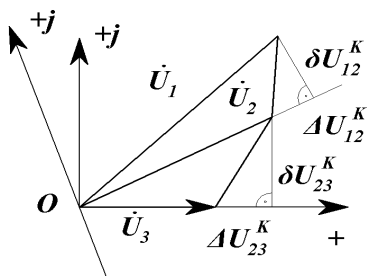


Рис. 1.8 – Векторная диаграмма напряжений при разомкнутой питающей сети

1.4. Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд представляет собой набор корпусов с лицевой панелью. Каждый из них является натурной моделью определенного элемента электросистемы (источник питания, нагрузки, ЛЭП и т. д.). На лицевой панели каждого корпуса, в зависимости от его назначения, нанесены мнемосхема соединений его элементов (источник питания, нагрузки, ЛЭП и т. д.), гнезда для присоединения внешних устройств и защитного заземления и рукоятки для изменения величин параметров.

Рассмотрим схему натурального моделирования фазы с одно-сторонним питанием (рис. 1.9).

Приведем перечень аппаратуры используемый в схеме (табл. 1.1).

Источник G1 моделирует питающую электрическую систему.

Трансформаторы в блоке A1 соединены параллельно и моделируют однофазный трансформатор, связывающий электрическую систему с сетью.

Линейный реактор A2 и модели A3, A4 линий электропередачи моделируют включенные последовательно однофазные линии электропередачи.

Нагрузки A5 ... A7 моделируют однофазные активную индуктивную и емкостную нагрузку в конце линий электропередачи.

Коммутатор A8 позволяет без переборки схемы производить измерение потоков активной и реактивной мощностей измерителем P1 в пяти точках электрической сети.

Блок мультиметров P2 позволяет без переборки схемы одновременно производить измерение напряжения в трех точках электрической сети.

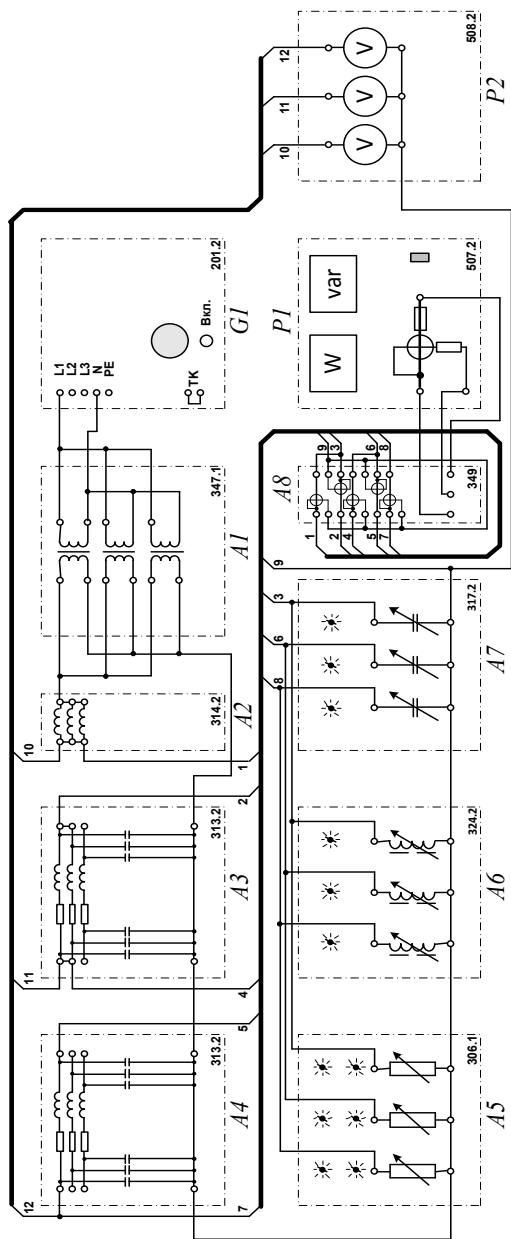


Рис. 1.9 – Электрическая схема соединений лабораторной работы № 1

Таблица 1.1 – Перечень аппаратуры лабораторной работы № 1

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Трехфазный источник питания	201.2	400 В~; 16 А
A1	Трехфазная трансформаторная группа	347.1	3×80 В·А; 242, 235, 230, 126, 220,133,127 В/230 В (звезда)
A2	Линейный реактор	314.2	0,5 А; 3×0,3 Гн/ 8 Ом
A3, A4	Модель линии электропередачи	313.2	400 В~; 3×0,5 А
A5	Активная нагрузка	306.1	220/380 В; 50 Гц,3×50 Вт
A6	Индуктивная нагрузка	324.2	220/380 В; 50 Гц,3×40 ВАр
A7	Емкостная нагрузка	317.2	220/380 В; 50 Гц,3×40 ВАр
A8	Коммутатор измерителя мощности	349	Пять положений
P1	Измеритель мощности	507.2	15; 60;150; 300; 600 В, 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 А
P2	Блок мультиметров	508.2	Три мультиметра 0 ... 1000 В; 0 ... 10 А; 0 ... 20 МОм

1.5. Порядок выполнения лабораторной работы

1.5.1. Убедиться, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

1.5.2. Соединить гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» источника G1.

1.5.3. Соединить аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений (рис. 1.9). Для наглядности преобразуем схему к следующему виду.

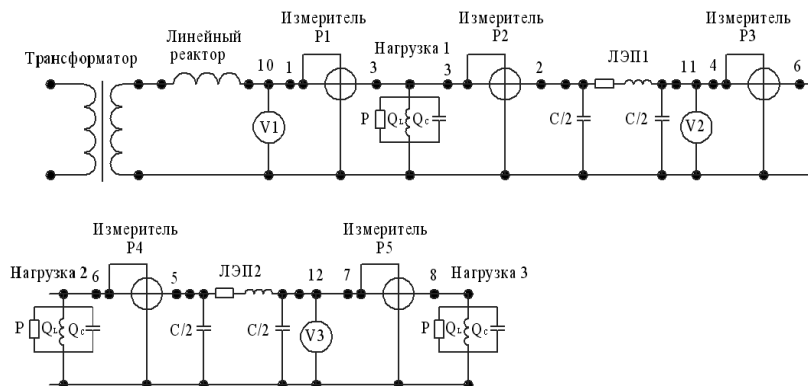


Рис. 1.10 – Упрощенная схема замещения

1.5.4. Установить переключателем заданные по вариантам (табл. 1.2) значения напряжения $U_{\text{ин}}$ вторичных обмоток трансформаторов блока А1, а значение напряжения первичной обмотки – 230 В.

1.5.5. Установить переключателями заданные по вариантам (табл. 1.2) значения параметров моделей А3, А4 линий электропередачи и нагрузок А5... А7.

1.5.6. Включить выключатели «СЕТЬ» измерителя мощностей Р1 и блока мультиметров Р2.

1.5.7. Включить источник G1. О наличии напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

1.5.8. С помощью мультиметров, включенных как вольтметры, блока Р2 измерить напряжение в точках включения нагрузки.

1.5.9. Меняя положение переключателя коммутатора А8, с помощью измерителя Р1 определить величины потоков активной и реактивной мощностей в началах и концах линий электропередачи.

1.5.10. По завершении эксперимента отключить источник G1 и выключатели «СЕТЬ» измерителя мощностей Р1 и блока мультиметров Р2.

1.6. Расчетная часть

1.6.1. Установить по вариантам значения активных, индуктивных и емкостных нагрузок, параметров ЛЭП и напряжения источника питания (табл. 1.2, см. стр. 19).

1.6.2. Используя показания последнего мультиметра, значения полных мощностей нагрузок $\dot{S}_1, \dot{S}_2, \dot{S}_3$, сопротивления и проводимости линий 12 и 23 $\dot{Z}_{12} = r_{12} + jx_{12}$, $\dot{Z}_{23} = r_{23} + jx_{23}$; b_{12}, b_{23}^u вышеприведенные формулы произвести расчет остальных параметров, а именно неизвестных напряжений в узлах $\dot{U}_2, \dot{U}_1$, потоки и потери мощности в линиях $\dot{S}_{23}^K, \dot{S}_{23}^H, \dot{S}_{12}^K, \dot{S}_{12}^H, \Delta \dot{S}_{23}, \Delta \dot{S}_{12}$ и мощность источника питания $\dot{S}_{\text{ИП}}$ (рис. 1.11).

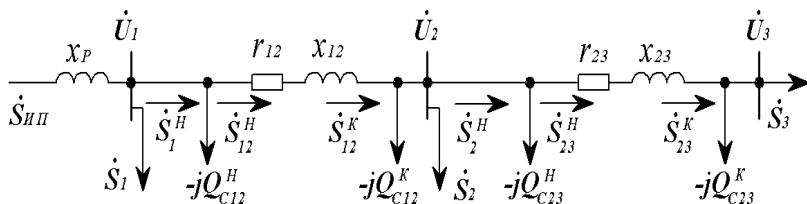


Рис. 1.11 – Схема замещения для расчета

1.6.3. Сравнить полученные значения $\dot{S}_{\text{ИП}}, \dot{S}_{23}^K, \dot{S}_{23}^H, \dot{S}_{12}^K, \dot{S}_{12}^H$ с показателями измерителей мощностей и ввести в таблицу 1.3.

Сравнение полученных значений расчетным и экспериментальным путем (табл. 1.3).

Таблица 1.3 – Результаты лабораторной работы № 1

	$\dot{S}_{\text{ИП}}$	$\dot{S}_{23}^K$	$\dot{S}_{23}^H$	$\dot{S}_{12}^K$	$\dot{S}_{12}^H$	$\dot{U}_2$	$\dot{U}_1$
Расчетное значение							
Экспериментальное значение							

1.6.4. Сделать соответствующие выводы.

Таблица 1.2 – Данные на расчетную часть лабораторной работы № 1

№ вар.	Параметры первой линии			Параметры второй линии			Параметры нагрузки 1			Параметры нагрузки 2			Параметры на- грузки 3			Уип, В
	R, Ом	L/RL, Гн/ Ом	C/2, мкФ	R, Ом	L/RL, Гн/ Ом	C/2, мкФ	P, %	QC, %	QL, %	P, %	QC, %	QL, %	P, %	QC, %	QL, %	
1	50	1,2/32	0,18	100	0,6/16	0,4	10	75	100	70	25	75	90	50	50	133
2	100	0,9/24	0,4	50	0,3/8	0,18	20	50	75	80	100	50	100	100	25	220
3	150	0,6/16	0,58	100	0,9/24	0,18	30	100	50	90	75	25	10	75	75	225
4	200	0,3/8	0,4	150	1,2/32	0,4	40	75	25	100	100	25	20	50	50	230
5	150	1,2/32	0,58	200	0,9/24	0,58	50	50	75	10	75	75	30	25	25	235
6	200	0,9/24	0,18	150	0,6/16	0,4	60	25	50	20	50	50	40	100	25	240
7	150	0,6/16	0,4	200	0,3/8	0,58	70	100	25	30	25	100	90	75	100	245
8	100	0,6/16	0,18	100	1,2/32	0,18	80	75	75	40	25	75	100	50	75	220
9	50	0,3/8	0,18	100	0,6/16	0,18	90	100	50	50	75	50	10	25	100	230
10	100	0,9/24	0,4	200	1,2/32	0,18	100	75	100	40	50	25	10	75	75	240
11	150	1,2/32	0,58	150	0,9/24	0,4	10	50	75	50	100	100	20	50	50	133
12	200	0,9/24	0,4	100	0,6/16	0,58	20	25	50	60	75	75	30	25	25	225
13	150	0,6/16	0,58	50	0,3/8	0,4	30	75	25	70	50	100	40	75	50	235
14	200	0,3/8	0,18	100	1,2/32	0,58	40	50	100	80	25	75	50	50	25	245
15	100	1,2/32	0,18	150	0,9/24	0,18	50	25	75	90	100	50	60	100	75	220

1.7. Контрольные вопросы

1. В чем отличие разомкнутой и замкнутой сетей?
2. В чем состоит различие между падением и потерей напряжения? Проиллюстрируйте это различие с помощью векторной диаграммы напряжений.
3. Чем различаются продольная и поперечная составляющие падения напряжения и как они выражаются через потоки мощности в линии?
4. Как построить векторную диаграмму напряжений для линии 110 кВ с тремя нагрузками вдоль нее?
5. Как рассчитать в два этапа режим линии из двух участков при заданном напряжении в начале первого участка?
6. Как рассчитать в два этапа режим линии из двух участков при заданном напряжении в конце второго участка?

1.8. Литература

1. Герасименко, А. А. Передача и распределение электрической энергии : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки 140400 «Электроэнергетика и электротехника» [Текст] / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. – 4-е изд., стер. – М. : КНОРУС, 2014. – 645 с.
2. Евдокунин, Г. А. Электрические системы и сети [Текст] : учебное пособие / Г. А. Евдокунин. – 3-е изд., испр. и доп. – СПб. : Синтез Бук, 2011. – 286 с.
3. Карапетян, И. Г. Справочник по проектированию электрических сетей [Текст] / И. Г. Карапетян, Д. Л. Файбисович, И. М. Шапиро ; под ред. Д. Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : ЭНАС, 2012. – 374 с.
4. Кудрин, Б. И. Электроснабжение [Текст] : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника» / Б. И. Кудрин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : изд. центр «Академия», 2012. – 350 с.
5. Неклепаев, Б. Н. Электрическая часть электростанций и подстанций [Текст] : справочные материалы для курсового и дипломного проектирования / Б. Н. Неклепаев, И. П. Крючков. –

5-е изд., стер. – СПб. : БХВ-Петербург, 2013. – 607 с.

6. Правила устройства электроустановок [Текст] / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному контролю. – 7-е и 6-е изд. – СПб. : ДЕАН, 2014. – 1164 с.

7. Рожкова, Л. Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций [Текст] : учебник для использования в учебном процессе образовательных учреждений, реализующих программы среднего профессионального образования / Л. Д. Рожкова, Л. К. Карнеева, Т. В. Чиркова. – 8-е изд., стер. – М. : Академия, 2012. – 446 с.

8. Хорольский, В. Я. Эксплуатация систем электроснабжения [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника» / В. Я. Хорольский, М. А. Таранов. – М. : ФОРУМ, 2013. – 287 с.

Лабораторная работа № 2. **«Натурное моделирование установившегося** **режима работы фазы электрической сети** **с двусторонним питанием»**

2.1. Цель работы

Изучение принципа работы лабораторного стенда, моделирующего фазу электрической сети с двусторонним питанием, и закрепление при этом теоретических знаний по разделу «Расчет параметров режимов электрических сетей с двусторонним питанием».

2.2. Программа работы

Изучение принципа работы однофазной линии и определение ее параметров режима.

Ознакомление с лабораторным стендом и изучение его схемы и принципа действия для данной лабораторной работы.

Сборка схемы модели фазы электрической сети с двусторонним питанием.

Измерение параметров режима в соответствии с указаниями по проведению эксперимента.

Анализ результатов и выводы.

2.3. Теоретическая часть

2.3.1. Основные определения и области применения

Существенным недостатком разомкнутых (радиальных) сетей является то, что в случае выхода из работы какого-либо участка этих сетей значительная часть потребителей лишается электроснабжения. Поэтому для обеспечения надежного электроснабжения ответственных потребителей, не терпящих длительных перерывов в электроснабжении, применяют замкнутые сети. Замкнутыми сетями называются сети, в которых электроэнергия к потребителям подается не менее чем с двух сторон. Различают простые замкнутые сети, в которых присоединенные к ним нагрузки питаются не более чем с двух сто-

рон, и сложные замкнутые сети, к узловым точкам которых электроэнергия может подаваться не менее чем с трех сторон.

Простая замкнутая сеть может иметь либо один источник питания, и тогда она выполняется в виде замкнутого кольца и называется кольцевой сетью, либо два источника питания, питающих линию с двух сторон, и тогда она называется сетью с двусторонним питанием.

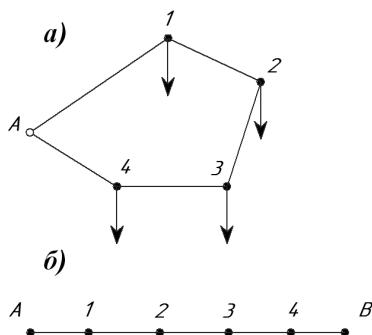


Рис. 2.1 – Схемы простых замкнутых сетей:
а – кольцевая сеть; б – сеть с двусторонним питанием замкнутой сети.

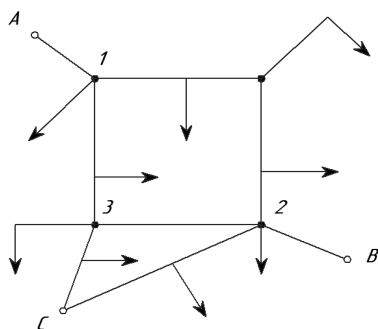


Рис. 2.2 – Схема сложной замкнутой сети

На рис. 2.1 а представлена замкнутая кольцевая сеть с одним источником питания **A**, а на рис. 2.1 б – сеть с двусторонним питанием от источников **A** и **B**.

Легко видеть, что кольцевую сеть можно превратить в сеть

с двусторонним питанием, «разрезав» ее по источнику питания. Пример сложной замкнутой сети с тремя источниками питания **А**, **В** и **С** и тремя узловыми точками 1, 2 и 3 изображен на рис. 2.2. Такая сеть не может быть превращена указанным выше способом в сеть с двусторонним питанием и требует сложных преобразований.

В местных сетях применяют преимущественно простые замкнутые сети – кольцевые или двустороннего питания, а также двухцепные линии, по существу являющиеся частным случаем кольцевого питания.

Область применения сложных замкнутых схем в местных сетях ограничена так называемой «замкнутой сеткой» низкого напряжения. Этот вид сетей применяют в крупных городах для питания городской коммунальной нагрузки на напряжении 400/230 В. Схема такой сети представляет собой линии, расположенные по улицам города, смыкающиеся на перекрестках и питающиеся параллельно от нескольких источников (рис. 2.3).

В практических расчетах замкнутую сетку условно разрезают в точках, равноудаленных от точек питания (см. штриховые линии на рис. 3), превращая ее таким образом в разомкнутую сеть, которую рассчитывают обычными методами, например методом минимума расхода металла и допустимой потери напряжения. Этот прием дает достаточно точные результаты, так как места разделения сети большей частью близко совпадают с точками раздела нагрузок.

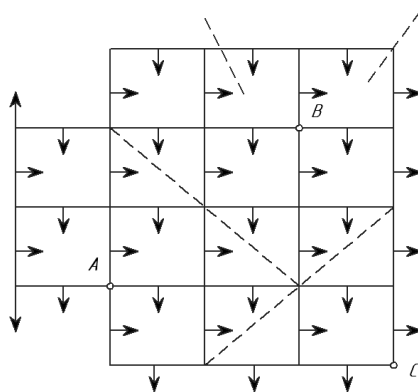


Рис. 2.3 – Схема «замкнутой сетки»

2.3.2. Расчет линии с двусторонним питанием

Рассмотрим методику расчета линий с двусторонним питанием, являющуюся общим случаем расчета простых замкнутых сетей, поскольку кольцевая сеть легко приводится к схеме двустороннего питания. Схема такой сети для трех нагрузок изображена на рис. 2.5. Здесь s_1, s_2 и s_3 – нагрузки в точках 1, 2 и 3, включающие в себя часть зарядной мощности в линии и потери в трансформаторах (рис. 2.4).

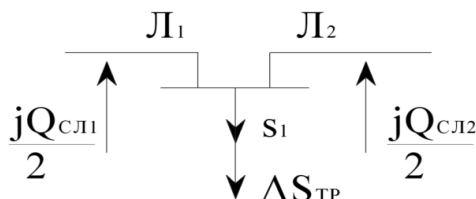


Рис. 2.4 – Узел электрической сети

На рис. 4: S_1, S_2, S_3 и S_4 – полные мощности на участках линии; $Z_{0-1}, Z_{1-2}, Z_{2-3}$ и Z_{3-4} , l_1, l_2, l_3 и l_4 – соответственно полные сопротивления и длины участков; А и В – источники питания; U_A и U_B – напряжения источников питания.

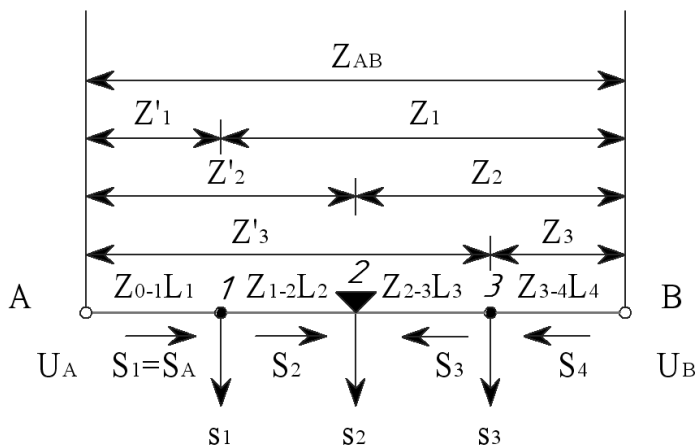


Рис. 2.5 – Схема сети с двусторонним питанием

Падение линейного напряжения на любом участке линии между нагрузками:

$$\Delta \dot{U}_i = \sqrt{3} \dot{I}_i Z_i, \quad (2.1)$$

где $\dot{I}_i$ – ток на данном участке; Z_i – сопротивление этого участка.

Поскольку:

$$\dot{S}_i = \sqrt{3} \dot{I}_i \dot{U}_i^* \quad (2.2)$$

$$\Delta \dot{U}_i = \frac{\dot{S}_i}{\dot{U}_i^*} Z_i, \quad (2.3)$$

где $\dot{U}_i^*$ – сопряженный вектор напряжения в данной точке сети.

Полагая вектор $\dot{U}_i^*$ ориентированным по вещественной оси, получим:

$$\Delta \dot{U}_i = \frac{\dot{S}_i}{U_i} Z_i, \quad (2.4)$$

где S_i и U_i взяты для одной и той же точки участка.

Вектор напряжения U_i изменяется вдоль линии по мере удаления от источника питания. Напряжение потоков мощности на отдельных участках схемы принято условно. Действительное напряжение определяется в результате расчета. Пренебрегая потерями мощности в линии, то есть исходя из постоянства напряжения вдоль каждого участка и полагая $U_1 = U_2 = \dots = U_N$ (что для сетей местного значения вполне допустимо), можем на основании второго закона Кирхгофа написать следующее равенство для падений напряжения между точками А и В:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{S}_1 Z_{0-1}}{U_H} + \frac{\dot{S}_2 Z_{1-2}}{U_H} + \frac{\dot{S}_3 Z_{2-3}}{U_H} + \frac{\dot{S}_4 Z_{3-4}}{U_H} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B \\ \dot{S}_1 Z_{0-1} + \dot{S}_2 Z_{1-2} + \dot{S}_3 Z_{2-3} + \dot{S}_4 Z_{3-4} &= (\dot{U}_A - \dot{U}_B) U_H \end{aligned} \quad (2.5)$$

где U_H – номинальное напряжение сети.

Одновременно, пользуясь первым законом Кирхгофа для точек 1, 2, 3 и исходя из принятого допущения об отсутствии потерь мощности в сети, можно составить следующие равенства:

$$\dot{S}_1 - \dot{s}_1 = \dot{S}_2; \dot{S}_1 - \dot{s}_1 - \dot{s}_2 = \dot{S}_3; \dot{S}_1 - \dot{s}_1 - \dot{s}_2 - \dot{s}_3 = \dot{S}_4 \quad (2.6)$$

Подставив эти выражения в уравнение (2.5), получим:

$$\begin{aligned} & \dot{S}_1 Z_{0-1} + (\dot{S}_1 - \dot{s}_1) Z_{1-2} + (\dot{S}_1 - \dot{s}_1 - \dot{s}_2) Z_{2-3} + \\ & + (\dot{S}_1 - \dot{s}_1 - \dot{s}_2 - \dot{s}_3) Z_{3-4} = (\dot{U}_A - \dot{U}_B) U_H \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} & \dot{S}_1 (Z_{0-1} + Z_{1-2} + Z_{2-3} + Z_{3-4}) - \dot{s}_1 (Z_{1-2} + Z_{2-3} + Z_{3-4}) - \\ & - \dot{s}_2 (Z_{2-3} + Z_{3-4}) - \dot{s}_3 Z_{3-4} = (\dot{U}_A - \dot{U}_B) U_H \end{aligned} \quad (2.8)$$

Отсюда искомая мощность головного участка А-1 равна:

$$\begin{aligned} \dot{S}_1 = \dot{S}_A = & \frac{\dot{s}_1 (Z_{1-2} + Z_{2-3} + Z_{3-4}) + \dot{s}_2 (Z_{2-3} + Z_{3-4})}{Z_{0-1} + Z_{1-2} + Z_{2-3} + Z_{3-4}} + \\ & + \frac{\dot{s}_3 Z_{3-4} + (\dot{U}_A - \dot{U}_B) U_H}{Z_{0-1} + Z_{1-2} + Z_{2-3} + Z_{3-4}}. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Обозначив сопротивления от пункта В до нагрузок 1, 2, 3 соответственно через Z_1 , Z_2 и Z_3 , а полное сопротивление линии между пунктами А и В через Z_{AB} и подставив эти величины в формулу (2.9), получим:

$$\dot{S}_A = \frac{\dot{s}_1 Z_1 + \dot{s}_2 Z_2 + \dot{s}_3 Z_3}{Z_{AB}} + \frac{(\dot{U}_A - \dot{U}_B) U_H}{Z_{AB}} \quad (2.10)$$

или в общем виде для n нагрузок:

$$\dot{S}_A = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{s}_i Z_i}{Z_{AB}} + \frac{(\dot{U}_A - \dot{U}_B) U_H}{Z_{AB}}. \quad (2.11)$$

Аналогичную формулу можно вывести и для нагрузки головного участка В-3.

Второй член в выражении (2.11) представляет собой уравнительную мощность, протекающую по линии АВ вследствие разности напряжений между этими пунктами. Эта мощность не зависит от нагрузок линии, так как она будет иметь место и при $s_1, s_2, \dots, s_N$

$$\dot{S}_4 = \dot{S}_B = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{s}_i Z'_i}{Z_{AB}} + \frac{(\dot{U}_B - \dot{U}_A) U_H}{Z_{AB}}. \quad (2.12)$$

где Z_i, Z'_i – сопротивления от пункта B и A до места подключения каждой нагрузки:

$$\begin{aligned} Z_1 &= Z_{1-2} + Z_{2-3} + Z_{3-4}, \\ Z_2 &= Z_{2-3} + Z_{3-4}, \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} Z_3 &= Z_{3-4}, \\ Z'_3 &= Z_{0-1} + Z_{1-2} + Z_{2-3}, \\ Z'_2 &= Z_{0-1} + Z_{1-2}, \\ Z'_1 &= Z_{0-1}. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Z_{AB} – полное сопротивление между пунктами A и B

$$Z_{AB} = Z_{0-1} + Z_{1-2} + Z_{2-3} + Z_{3-4} \quad (2.15)$$

Остальные нагрузки по участкам, зная Z'_i , легко найти, пользуясь выражениями (2.6), а так как на схеме рис. 5 за положительное направление мощностей было условно принято направление от A к B , то часть нагрузок на участках, прилегающих к источнику питания B , получится с отрицательным знаком, что будет указывать на их обратное направление. Определение потоков мощности в линии – это первый этап расчета режима этой линии. На втором этапе определяются потери мощностей и напряжения в узловых точках. В некоторой точке окажется, что мощности к ней притекают с двух сторон (рис. 2.6).

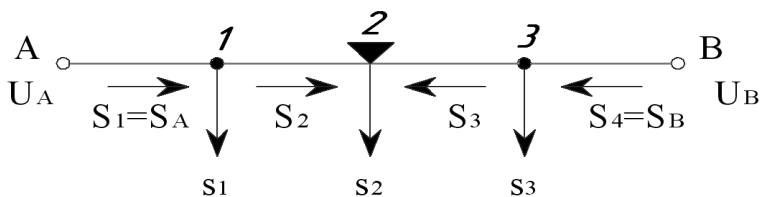


Рис. 2.6 – Найденное распределение мощностей в сети с двухсторонним питанием

В данном случае такой точкой является точка 2. Эта точка называется точкой потоко раздела и обозначается заштрихованным треугольником. Если схему «разрезать» по точке потоко раздела, то получим две разомкнутые схемы (рис. 2.7).

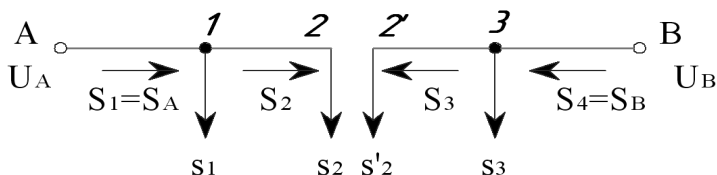


Рис. 2.7 – Расчетная схема сети с двусторонним питанием

Схема, изображенная на рис. 2.7, состоит из двух независимых частей, каждая из которых характеризует разомкнутую сеть с заданными и напряжениями на шинах источника питания. Причем в точке 2 считается включенной нагрузка с потребляемой мощностью $\dot{S}_2$, а в точке 2' считается включенной нагрузка с мощностью $\dot{S}_3$. Следовательно, дальнейший расчет режима схемы должен осуществляться так же, как для разомкнутых сетей «по заданным параметрам на передающем конце». Может оказаться, что первый этап расчета кольцевой сети выявит две точки потокоораздела: одну для активной, а другую для реактивной мощности (рис. 2.8).

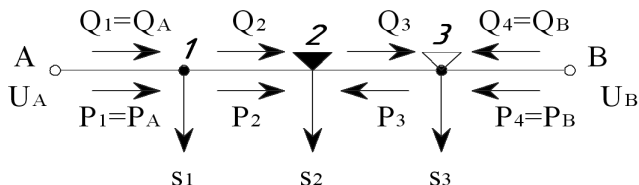


Рис. 2.8 – Сеть с двумя точками потокоораздела при двустороннем питании

Точка 2 – точка потокоораздела для активной мощности, а точка 3 – точка потокоораздела для реактивной мощности. В этом случае кольцевая сеть разделена на две разомкнутые линии (рис. 2.9).

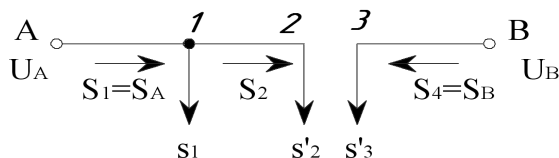


Рис. 2.9 – Расчетная схема сети с двумя точками потокоораздела

Потери мощности на участке между точками потокоораздела определяются по формуле:

$$\Delta P_3 = \frac{P_3^2 + Q_3^2}{U_{\text{НОМ}}^2} r_3 \quad (2.16)$$

$$\Delta Q_3 = \frac{P_3^2 + Q_3^2}{U_{\text{НОМ}}^2} x_3 \quad (2.17)$$

Если принять, что в точке 2 включена нагрузка

$$\dot{s}'_2 = p'_2 + jq'_2 = P_2 + j(Q_2 + \Delta Q_3), \quad (2.18)$$

а в точке 3 включена нагрузка

$$\dot{s}'_3 = p'_3 + jq'_3 = P_4 + \Delta P_3 + jQ_4, \quad (2.19)$$

то при дальнейшем расчете можно рассматривать две разомкнутые линии.

При равенстве напряжений в точках питания или при кольцевой схеме (когда точки A и B совмещены) $U_A = U_B$, второй член в правой части равенства (2.11) пропадает и формула для определения мощности головного участка А-1 принимает вид:

$$\dot{s}_A = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{s}_i Z_i}{Z_{AB}}. \quad (2.20)$$

При расчете местных сетей обычно пользуются формулой (20), считая напряжения источников питания одинаковыми.

Таким образом, для того чтобы определить мощность, поступающую от одного источника питания, необходимо определить сумму моментов нагрузок относительно другого источника и разделить ее на полное сопротивление всего участка сети с двусторонним питанием.

При одинаковых напряжениях на источниках питания или при расчете кольцевых схем падение напряжения от обоих источников питания до точки раздела одинаково. Поэтому в этой точке сеть может быть условно «разрезана» и потери напряжения определены для любой из половин как для сети с односторонним питанием.

Чтобы определить с помощью полученных выше формул, как распределяются мощности в линиях с двусторонним питанием, в общем случае подсчет производят в комплексной форме:

$$\dot{S}_A = P_A + jQ_A = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i + jq_i)(R_i + jX_i)}{R_{AB} + jX_{AB}} \quad (2.21)$$

В некоторых случаях расчеты можно упростить, перейдя к раздельному определению распределения активной и реактивной мощностей и заменив в формуле (20) сопротивление Z_{AB} соответствующей проводимостью:

$$Y = \frac{1}{Z_{AB}} = G_{AB} - jB_{AB}, \quad (2.22)$$

$$G_{AB} = \frac{R_{AB}}{R_{AB}^2 + X_{AB}^2} \text{ и } B_{AB} = \frac{X_{AB}}{R_{AB}^2 + X_{AB}^2}. \quad (2.23)$$

Подставив эти величины в формулу (20), получим:

$$\dot{S}_1 = (G_{AB} - jB_{AB}) \sum_{i=1}^n \dot{S}_i Z_i \quad (2.24)$$

$$\dot{S}_1 = (G_{AB} - jB_{AB}) \sum_{i=1}^n (p_i + jq_i)(R_i + jX_i) \quad (2.25)$$

Произведя все действия и разделив вещественные и мнимые члены, получим:

$$\begin{aligned} P_A &= G_{AB} \sum_{i=1}^n (p_i R_i - q_i X_i) + B_{AB} \sum_{i=1}^n (p_i X_i + q_i R_i) \\ Q_A &= G_{AB} \sum_{i=1}^n (p_i X_i + q_i R_i) - B_{AB} \sum_{i=1}^n (p_i R_i - q_i X_i) \end{aligned} \quad (2.26)$$

Формулы (26) позволяют вести расчет в отдельности для активной и реактивной нагрузок, пользуясь абсолютными значениями вещественных и мнимых составляющих нагрузок и сопротивлений. Эти формулы можно использовать для расчета потокораспределения в сетях двустороннего питания и с *разными уровнями напряжения* источников питания. Однако в этом случае на полученный по формулам (2.26) результат потокораспределения необходимо наложить уравнительную мощность, равную второму слагающему выражения (2.11).

В случае, если напряжения источников питания совпадают по фазе, уравнительная мощность, протекающая от одного источника питания к другому, будет определяться

$$\dot{S}_{\text{уп}} = \frac{(U_A - U_B)U_H(R_{AB} - jX_{AB})}{R_{AB}^2 + X_{AB}^2}. \quad (2.27)$$

Необходимость в подобных расчетах возникает тогда, когда в целях перераспределения реактивной мощности для оптимального использования линий замкнутой сети на одном из источников питания устанавливают вольтодобавочные трансформаторы.

Определив, как в линии двустороннего питания распределяются нагрузки, переходят к подсчету потерь напряжения обычным способом.

2.3.3. Частные случаи расчета сетей с двусторонним питанием

В некоторых частных случаях выведенные выше формулы расчета сетей с двусторонним питанием могут быть значительно упрощены. Рассмотрим эти случаи.

2.3.3.1. Однородная линия

Если на всей длине линии провода расположены на опорах одинаково и имеют теоретически постоянное соотношение реактивного и активного сопротивления, т. е.

$$\frac{X}{R} = m = \text{const}, \quad (2.28)$$

то формулу (20) можно преобразовать следующим образом:

$$\dot{S}_A = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{S}_i Z_i}{Z_{AB}} = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{S}_i (R_i + jX_i)}{Z_{AB}} \quad (2.29)$$

и, подставив $X = R \cdot m$ и $X_{AB} = R_{AB} m$, получить

$$\dot{S}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (1 + jm) R_i}{(1 + jm) R_{AB}} = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{S}_i R_i}{R_{AB}} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i R_i}{R_{AR}} + j \frac{\sum_{i=1}^n q_i R_i}{R_{AR}} \quad (2.30)$$

т. е. в этом случае расчет можно вести по активным сопротивлениям, производя его отдельно для вещественной и мнимой частей:

$$P_1 = \frac{\sum_{i=1}^n p_i R_i}{R_{AB}} \text{ и } Q_1 = \frac{\sum_{i=1}^n q_i R_i}{R_{AB}}. \quad (2.31)$$

2.3.3.2. Однородная линия с постоянным сечением проводов

При одинаковом сечении проводов однородной линии по

всей длине, т. е. при $r_o = const$, что практически встречается довольно часто, мы можем, заменив в формуле (30) $Ri = r_o \cdot Li$ и $R_{AB} = r L_{AB}$, где Li – расстояния от соответствующих нагрузок до пункта B , а L_{AB} – длина всей линии, получить:

$$\begin{aligned} \dot{S}_1 &= \frac{\sum_{i=1}^n p_i r_o L_i}{r_o L_{AB}} + j \frac{\sum_{i=1}^n q_i r_o L_i}{r_o L_{AB}} \\ P_1 &= \frac{\sum_{i=1}^n p_i L_i}{L_{AB}} \text{ и } Q_1 = \frac{\sum_{i=1}^n q_i L_i}{L_{AB}}. \end{aligned} \quad (2.32)$$

В этом случае расчет можно вести по длинам, определяя распределение отдельно активных и отдельно реактивных нагрузок.

2.3.3.3. Линии с нагрузками, имеющими одинаковый коэффициент мощности

Если $\cos\varphi$ всех нагрузок одинаков и линии однородны, то расчет можно вести по формуле (30), подставляя в нее величины полных мощностей. При чисто активной нагрузке ($\cos\varphi = 1$) в эту формулу подставляются активные нагрузки.

2.4. Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд представляет собой набор корпусов с лицевой панелью. Каждая из них является натурной моделью определенного элемента электросистемы (источник питания, нагрузки, ЛЭП и т. д.). На лицевой панели каждого корпуса, в зависимости от его назначения, нанесены мнемосхема соединений его элементов (источник питания, нагрузки, ЛЭП и т. д.), гнезда для присоединения внешних устройств и защитного заземления и рукоятки для изменения величин параметров.

Рассмотрим схему натурального моделирования фазы с двусторонним питанием (рис. 2.10).

Источник G1 моделирует питающую электрическую систему.

Трансформаторы в блоках А1, А9 соединены параллельно и моделируют однофазные трансформаторы, связывающие электрическую систему с сетью.

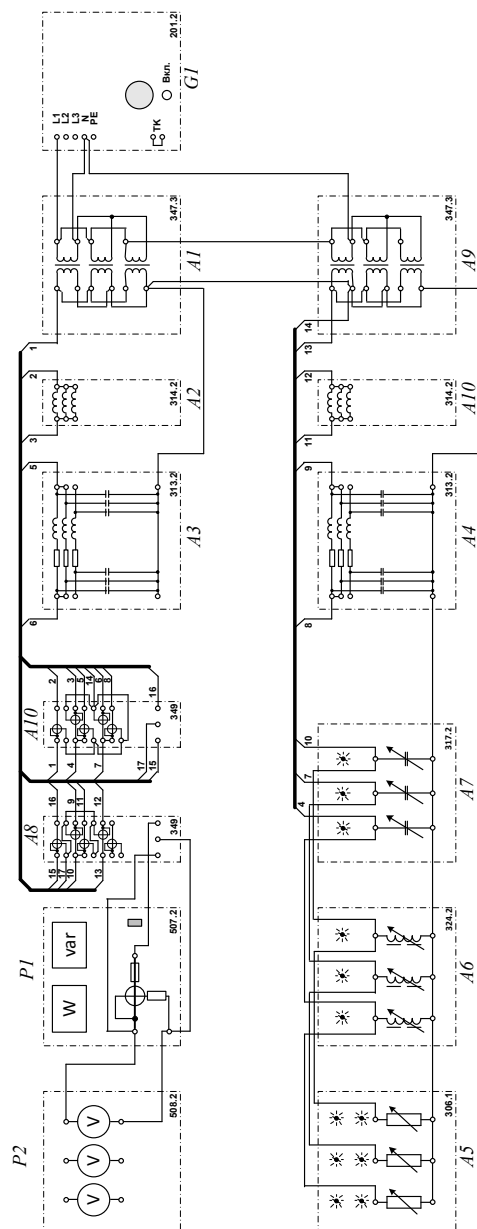


Рис. 2.10 – Электрическая схема соединений лабораторной работы № 2

Линейные реакторы А2, А10 и модели А3, А4 линий электропередачи моделируют включенные последовательно однофазные линии электропередачи.

Нагрузки А5...А7 моделируют однофазные активную, индуктивную и емкостные нагрузки в конце линий электропередачи.

Коммутаторы А8 и А10 позволяют без переборки схемы производить измерение потоков активной и реактивной мощностей измерителем Р1, а также напряжений мультиметром блока Р2 в восьми точках электрической сети.

Перечень аппаратуры, используемой в схеме, представлен в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Перечень аппаратуры лабораторной работы № 2

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Трехфазный источник питания	201.2	400 В~; 16 А
A1, A9	Трехфазная трансформаторная группа	347.1	3×80 В·А; 242, 235, 230, 126, 220,133,127 В/230 В (звезда)
A2, A10	Линейный реактор	314.2	0,5 А; 3×0,3 Гн/ 8 Ом
A3, A4	Модель линии электропередачи	313.2	400 В~; 3×0,5 А
A5	Активная нагрузка	306.1	220/380 В; 50 Гц,3×50 Вт
A6	Индуктивная нагрузка	324.2	220/380 В; 50 Гц,3×40 ВАр
A7	Емкостная нагрузка	317.2	220/380 В; 50 Гц,3×40 ВАр
A8, A10\$	Коммутатор измерителя мощности	349	Пять положений
P1	Измеритель мощности	507.2	15; 60; 150; 300; 600 В, 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 А
P2	Блок мультиметров	508.2	Три мультиметра 0 ... 1000 В; 0 ... 10 А; 0 ... 20 МОм

2.5. Порядок выполнения лабораторной работы

2.5.1. Убедиться, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

2.5.2. Соединить гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» источника G1.

2.5.3. Соединить аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений (рис. 2.10). Для наглядности преобразуем схему к следующему виду (рис. 2.11).

2.5.4. Установить переключателями заданное по вариантам (табл. 2.2) значение напряжений вторичных обмоток трансформаторов блоков A1, A9, а значения напряжений первичных обмоток – 230 В.

2.5.5. Установить переключателями заданное по вариантам (табл.2) значение параметров моделей A3, A4 линий электропередачи и нагрузок A5...A7.

2.5.6. Включить выключатели «СЕТЬ» измерителя мощностей P1 и блока мультиметров P2.

2.5.7. Включить источник G1. О наличии напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

2.5.8. Установить переключатель блока A8 в положение «P1».

2.5.9. Меняя положение переключателя коммутатора A10, определить величины потоков активной и реактивной мощностей в первых пяти началах и концах линий электропередачи, а также величины напряжений в этих точках.

2.5.10. Меняя положение переключателя коммутатора A8 с «P2» до «P4», определить величины потоков активной и реактивной мощностей в четырех оставшихся началах и концах линий электропередачи, а также величины напряжений в этих точках.

2.5.11. Отключить источник G1.

По завершении эксперимента отключить источник G1 и выключатели «СЕТЬ» измерителя мощностей P1 и блока мультиметров P2.

2.6. Расчетная часть

2.6.1. Установить по вариантам значения активных, индуктивных и емкостных нагрузок, параметров ЛЭП и напряжение источника питания (табл. 2.2).

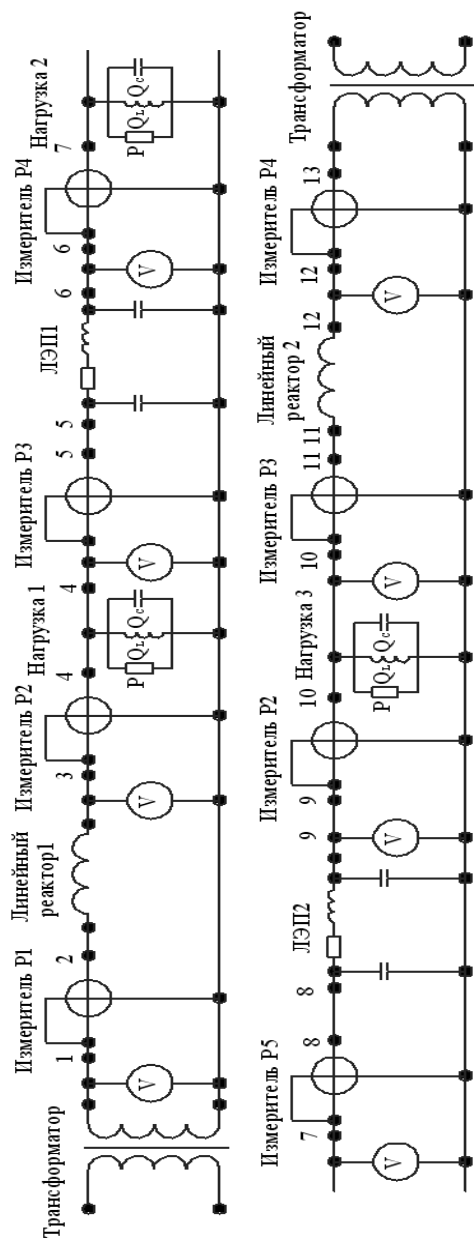


Рис. 2.11 – Упрощенная схема замещения

Таблица 2.2 – Данные на расчетную часть лабораторной работы № 2

№ вар.	Параметры 1-й линии			Параметры 2-й линии			Параметры нагрузки 1			Параметры нагрузки 2			Параметры нагрузки 3			U_B B	U_A B
	R , Ом	L/R_L , Гн/Ом	$C/2$, мкФ	R , Ом	L/R_L , Гн/ Ом	$C/2$, мкФ	R , %	Q_C , %	Q_L , %	R , %	Q_C , %	Q_L , %	R , %	Q_C , %	Q_L , %		
1	50	1,2/32	0,18	100	0,6/16	0,4	10	75	100	70	25	75	90	50	50	240	133
2	100	0,9/24	0,4	50	0,3/8	0,18	20	50	75	80	100	50	100	100	25	245	220
3	150	0,6/16	0,58	100	0,9/24	0,18	30	100	50	90	75	25	10	75	75	220	225
4	200	0,3/8	0,4	150	1,2/32	0,4	40	75	25	100	100	25	20	50	50	230	230
5	150	1,2/32	0,58	200	0,9/24	0,58	50	50	75	10	75	75	30	25	25	240	235
6	200	0,9/24	0,18	150	0,6/16	0,4	60	25	50	20	50	50	40	100	25	133	240
7	150	0,6/16	0,4	200	0,3/8	0,58	70	100	25	30	25	100	90	75	100	240	245
8	100	0,6/16	0,18	100	1,2/32	0,18	80	75	75	40	25	75	100	50	75	133	220
9	50	0,3/8	0,18	100	0,6/16	0,18	90	100	50	50	75	50	10	25	100	225	230
10	100	0,9/24	0,4	200	1,2/32	0,18	100	75	100	40	50	25	10	75	75	235	240
11	150	1,2/32	0,58	150	0,9/24	0,4	10	50	75	50	100	100	20	50	50	245	133
12	200	0,9/24	0,4	100	0,6/16	0,58	20	25	50	60	75	75	30	25	25	220	225
13	150	0,6/16	0,58	50	0,3/8	0,4	30	75	25	70	50	100	40	75	50	133	235

2.6.2. Сравнить полученные значения

$S_A, S_B, S_2^K, S_2^H, S_1^K, S_1^H, U_1, U_2, U_3$ с показателями измерителей мощностей и ввести в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Сравнение полученных значений расчетным и экспериментальным путем

	$\dot{S}_A$	$\dot{S}_B$	$\dot{S}_2^K$	$\dot{S}_2^H$	$\dot{S}_1^K$	$\dot{S}_1^H$	U_1	U_2	U_3
Расчетное значение									
Экспериментальное значение									

2.6.3. Сделать соответствующие выводы.

2.7. Контрольные вопросы

1. При каком допущении определяются потоки мощности на головных участках кольцевой сети или сети с двусторонним питанием?
2. Какие параметры при расчете используются в качестве исходных данных?
3. Что называется точкой потокораздела в сети с двусторонним питанием?
4. Как выполняется расчет сети, если точки потокораздела по активной и реактивной мощности не совпадают?
5. Какие существуют упрощения для частных случаев расчета сетей с двусторонним питанием?

2.8. Литература

1. Герасименко, А. А. Передача и распределение электрической энергии [Текст] : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки 140400 «Электро-

энергетика и электротехника» / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. – 4-е изд., стер. – М. : КНОРУС, 2014. – 645 с.

2. Евдокунин, Г. А. Электрические системы и сети [Текст] : учебное пособие / Г. А. Евдокунин. – 3-е изд., испр. и доп. – СПб. : Синтез Бук, 2011. – 286 с.

3. Карапетян, И. Г. Справочник по проектированию электрических сетей [Текст] / И. Г. Карапетян, Д. Л. Файбисович, И. М. Шапиро ; под ред. Д. Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : ЭНАС, 2012. – 374 с.

4. Кудрин, Б. И. Электроснабжение [Текст] : учебник для студентов высших учебных заведений, обуч. по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника» / Б. И. Кудрин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : изд. центр «Академия», 2012. – 350 с.

5. Неклепаев, Б. Н. Электрическая часть электростанций и подстанций [Текст] : справочные материалы для курсового и дипломного проектирования / Б. Н. Неклепаев, И. П. Крючков. – 5-е изд., стер. – СПб. : БХВ-Петербург, 2013. – 607 с.

6. Правила устройства электроустановок [Текст] / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному контролю. – 7-е и 6-е изд. – СПб. : ДЕАН, 2014. – 1164 с.

7. Рожкова, Л. Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций [Текст] : учебник для использования в учебном процессе образовательных учреждений, реализующих программы среднего профессионального образования / Л. Д. Рожкова, Л. К. Карнеева, Т. В. Чиркова. – 8-е изд., стер. – М. : Академия, 2012. – 446 с.

8. Хорольский, В. Я. Эксплуатация систем электроснабжения [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника» / В. Я. Хорольский, М. А. Таранов. – М. : ФОРУМ, 2013. – 287 с.

Лабораторная работа № 3.

«Натурное моделирование установившегося режима работы трехфазной электрической сети с односторонним питанием»

3.1. Цель работы

Изучение принципа работы лабораторного стенда, моделирующего трехфазную электрическую сеть с односторонним питанием, и укрепление при этом теоретических знаний по дисциплине «Электропитающие системы и электрические сети».

3.2. Программа работы

1. Изучение принципа работы трехфазной линии и определение ее параметров режима.
2. Ознакомление с лабораторным стендом и изучение его схемы и принципа действия для данной лабораторной работы.
3. Сборка схемы модели работы трехфазной электрической сети с односторонним питанием.
4. Измерение параметров режима в соответствии с указаниями по проведению эксперимента.
5. Анализ результатов и выводы.

3.3. Теоретическая часть

3.3.1. Основные понятия и определения

Одним из основных показателей качества электроэнергии является отклонение напряжения.

Отклонение напряжения – разность между действительным и номинальным значениями напряжения:

или

$$\delta U = U - U_{\text{ном}} \text{ (В, кВ)} \quad (3.1)$$
$$\delta U = \frac{U - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100 \text{ (\%)} \quad (3.1)$$

Действительное значение напряжения U в электрических сетях однофазного тока определяют как действующее значе-

ние напряжения основной частоты $U_{(1)}$ без учета гармонических составляющих, в сетях трехфазного тока – как действующее значение напряжения прямой последовательности основной частоты $U_{1(1)}$.

$$U_{1(1)} = [U_{AB(1)} + U_{CB(1)} + U_{AC(1)}]/3,$$

где $U_{AB(1)}$, $U_{CB(1)}$, $U_{AC(1)}$ – междуфазные напряжения прямой последовательности основной частоты.

Принципиальная схема питания нагрузки и схема замещения питающей сети приведены на рис. 3.1. Суммарное сопротивление питающей сети представлено приведенными к одной ступени напряжения индуктивным X_Σ и активным R_Σ сопротивлениями.

При известных напряжениях питающей системы U_c и нагрузках потребителей S_1 , S_2 можно определить напряжения U_1 и аналогично U_2 :

$$\begin{aligned} U_1 &= U_c - \sqrt{3}(I_1 + I_2)(R_\Sigma + jX_\Sigma) = U_c - \\ &\sqrt{3}(I_a + I_p)(R_\Sigma + jX_\Sigma) = U_c - \sqrt{3}(I_a R_\Sigma + I_p X_\Sigma) - j\sqrt{3}(I_a X_\Sigma + I_p R_\Sigma) \quad (3.2) \\ &= U_c - \delta U - j\Delta U = U_c - \delta U_M \end{aligned}$$

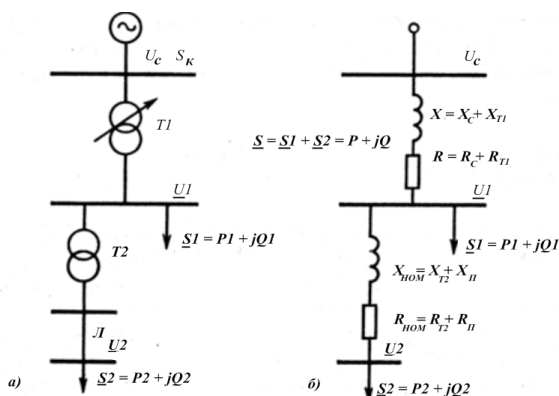


Рис. 3.1 – Принципиальная схема (а) и схема замещения (б): где P , Q – активная и реактивная нагрузки, протекающие через элемент системы электро-снабжения, на котором определяется падение напряжения

Из (3.1) получаем выражение для определения падения напряжения через его продольную δU и поперечную ΔU составляющую:

$$\begin{aligned} \delta U = \delta U + j\Delta U &= \frac{PR_{\Sigma} + QX_{\Sigma}}{U_1} + j \frac{PX_{\Sigma} + QR_{\Sigma}}{U_1} \\ &\approx \frac{PR_{\Sigma} + QX_{\Sigma}}{U_{\text{ном}}} + j \frac{PX_{\Sigma} + QR_{\Sigma}}{U_{\text{ном}}} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Для практических расчетов отклонений и колебаний напряжений промышленных сетей можно считать разницу между падением и потерей напряжения несущественной и потерю напряжения определять по формуле:

$$\delta U = \frac{PR_{\Sigma} + QX_{\Sigma}}{U_{\text{ном}}} \quad (3.4)$$

Верхний (нижний) предел отклонения напряжения в характерных точках системы электроснабжения приемника электроэнергии, допускаемый ГОСТ 13109-97, %:

$$\delta U_{\text{В(Н)}} = \delta U_{+(-)} + \delta U - U_{\text{д}} \quad (3.5)$$

δU – потери напряжения на участке от рассматриваемого узла сети до зажимов приемников электроэнергии, %;

$U_{\text{д}}$ – добавка напряжения средствами, где $\delta U_{+(-)}$ – верхний (нижний) предел отклонений напряжения на зажимах регулирования напряжения, %.

Отклонения напряжения необходимо проверять на совместимость в различных режимах нагрузки с учетом условия, чтобы при минимальных нагрузках отклонения напряжения не превышали отклонения напряжения при максимальных; если это условие не соблюдается, необходимо изменять добавку напряжения $U_{\text{д}}$.

Электроэнергия, поставляемая потребителям, должна иметь определенные качественные показатели, регламентируемые ГОСТ 13109-97. Основные показатели качества электроэнергии связаны с режимом частоты и напряжения электрической сети, которое наряду с качеством электроэнергии определяет

экономичность работы электрической сети и электроснабжения потребителей.

Непрерывное изменение электрических нагрузок приводит к непрерывному изменению падений напряжения в элементах электрической сети и, следовательно, к непрерывному изменению отклонения напряжения U от его номинального значения $U_{\text{ном}}$ в различных узлах электрической сети. Нормально допустимые и предельно допустимые значения установившегося отклонения напряжения на выводах приемников электрической энергии, регламентируемые ГОСТ 13109-97, равны соответственно $+5\%$ и $\pm 10\%$.

В нормальном режиме работы электрической сети значения отклонения напряжения δU на выводах приемников электроэнергии в течение суток не должны превышать предельно допустимые значения, при этом с вероятностью 95% значения δU не должны превышать нормально допустимые значения.

В послеаварийном режиме работы электрической сети значения δU на выводах приемников электрической энергии не должны превышать предельно допустимые значения. При аварийных нарушениях в электрической сети допускается кратковременный выход значений δU за предельно допустимые значения с последующим их восстановлением до значений, установленных для послеаварийного режима.

Учет надежности при рассмотрении режима напряжения заключается в том, что в любых нормальных и послеаварийных режимах напряжения в любых точках электрической сети не должны превышать или быть ниже определенного допустимого значения.

Наибольшие рабочие напряжения электрических сетей $U_{\text{раб max}}$, определяемые надежностью работы изоляции, нормируются ГОСТ 721-77 в следующих пределах от номинального напряжения электрической сети $U_{\text{ном}}$:

$$\begin{array}{ll} U_{\text{ном}} = 6, 10 \text{ кВ} & U_{\text{раб max}} = 1,2 U_{\text{ном}} \\ U_{\text{ном}} = 35, 110 \text{ кВ} & U_{\text{раб max}} = 1,15 U_{\text{ном}} \\ U_{\text{ном}} = 220, 330 \text{ кВ} & U_{\text{раб max}} = 1,1 U_{\text{ном}} \\ U_{\text{ном}} = 500 \text{ кВ} & U_{\text{раб max}} = 1,05 U_{\text{ном}} \end{array}$$

Наименьшие рабочие напряжения электрических сетей 110 кВ и выше, определяемые, главным образом, устойчивостью параллельной работы генераторов и узлов нагрузки, ограничиваются на уровне $(0,8 \dots 0,9) U_{\text{ном}}$.

Потери в продольных активных сопротивлениях линий и трансформаторов обратно пропорциональны квадрату напряжения. Поэтому повышение уровня напряжения является одним из основных средств уменьшения потерь мощности и энергии в электрических сетях напряжением до 220 кВ включительно.

Из изложенного следует, что для обеспечения требуемых технико-экономических показателей режимов работы электрических сетей необходимо регулировать напряжение. Для различных электрических сетей цели регулирования напряжения различаются между собой.

Основной целью регулирования напряжения в распределительных сетях напряжением 6–20 кВ, находящихся в непосредственной электрической близости от потребителей, является содержание отклонений напряжения в пределах, установленных ГОСТ 13109-97.

Основной целью регулирования напряжения в распределительных сетях напряжением 110–220 кВ является обеспечение экономичного режима их работы за счет уменьшения потерь мощности и энергии.

Основной целью регулирования напряжения в системообразующих сетях напряжением 330 кВ и выше является ограничение внутренних перенапряжений для обеспечения надежной работы изоляции оборудования таких сетей, предельное рабочее напряжение которых составляет $1,05 U_{\text{ном}}$.

Регулирование напряжения осуществляется на шинах генераторов электростанций, шинах высшего и среднего напряжения крупных узловых подстанций в системообразующих сетях, шинах центров питания распределительных электрических сетей.

Регулирование напряжения осуществляется с помощью специальных технических средств, называемых регулирующими устройствами. Все эти регулирующие устройства условно можно разделить на два типа: *узловые* и *линейные*. Узловые

устройства изменяют режимные параметры сети – напряжение и реактивную мощность в точке подключения к сети. Это генераторы электростанций, синхронные компенсаторы, батареи конденсаторов, нерегулируемые и регулируемые реакторы и статические регулируемые источники реактивной мощности.

Линейные устройства изменяют схемные параметры сети – коэффициенты трансформации, реактивное сопротивление. Это трансформаторы, автотрансформаторы с устройствами регулирования напряжения под нагрузкой РПН, специальные регулировочные трансформаторы, конденсаторные установки для продольной компенсации индуктивного сопротивления сети.

Основное назначение генераторов электростанций – это выдача в электрическую сеть заданного значения активной мощности. Кроме того, генераторы являются основными источниками реактивной мощности в ЭЭС. Изменение выдаваемой генератором реактивной мощности и изменение напряжения на его выходе осуществляются за счет регулирования тока возбуждения генератора. Напряжение на выходе генератора U_T изменяется в пределах $(0,95 \dots 1,05) U_{\text{НОМ}}$.

Увеличение регулировочного диапазона по напряжению, например до $1,1 \cdot U_{\text{НОМ}}$, потребует увеличения тока возбуждения генератора и, следовательно, увеличения выдаваемой генератором реактивной мощности. При номинальной нагрузке генератора полной мощностью и увеличении выдаваемой генератором реактивной мощности его активную мощность необходимо снижать во избежание перегрузки генератора. Последнее условие противоречит основному назначению генераторов – выдавать заданную активную мощность.

Повышающие трансформаторы на электростанциях или вообще не имеют регулировочного диапазона по напряжению, или этот диапазон ограничен пределами $\pm 2 \times 2,5 \% U_{\text{НОМ}}$.

Реальные потери напряжения в электрических сетях значительно больше диапазона регулирования напряжения генераторами и повышающими трансформаторами электростанций. Потери напряжения в линиях электропередачи зависят от их протяженности, нагрузки и напряжения и могут достигать 10 % в сети одного напряжения. Такой же порядок имеют потери напряжения при каждой трансформации.

Из приведенных данных видно, что регулирования напряжения за счет генераторов и трансформаторов электростанций явно недостаточно для покрытия потерь напряжения в электрической сети. Поэтому генераторы и трансформаторы электростанций в общем случае являются лишь вспомогательным средством регулирования напряжения в электрической сети. Генераторы могут служить основным средством регулирования напряжения лишь для потребителей, получающих питание непосредственно с шин генераторного напряжения.

Для регулирования напряжения в электрической сети используются трансформаторы и автотрансформаторы подстанций электрической сети, снабженные устройствами регулирования напряжения, и другие средства, которые рассматриваются ниже.

3.3.2. Регулирование напряжения на подстанциях

Одним из основных средств регулирования напряжения в электрических сетях является изменение коэффициентов трансформации трансформаторов (автотрансформаторов) на подстанциях электрических сетей. Коэффициент трансформации определяется отношением числа витков первичной w_1 ко вторичной w_2 обмоток трансформатора или отношением номинальных первичного (высшего) $U_{\text{вн}}$ и вторичного (низшего) $U_{\text{нн}}$ напряжений трансформатора при его холостом ходе:

$$k = w_1 / w_2 = U_{\text{вн}} / U_{\text{нн}}.$$

Трансформаторы (автотрансформаторы) имеют специальные ответвления от обмоток, позволяющие изменять коэффициент трансформации и, следовательно, регулировать напряжение. Переключение ответвлений может осуществляться устройством переключения без возбуждения (ПВВ) при отключении трансформатора от сети или устройством регулирования под нагрузкой (РПН) без отключения трансформатора от сети.

Регулировочные ответвления двух- и трехобмоточных трансформаторов выполняют в обмотке высшего напряжения со стороны нейтрали. Ток в обмотке высшего напряжения меньше, чем в других обмотках, следовательно, условия работы РПН легче, его массогабаритные показатели лучше.

Для двухобмоточных трансформаторов регулируется коэффициент трансформации между обмотками высшего и низшего напряжений $k_{\text{ВН}}$. Для трехобмоточных трансформаторов одновременно и зависимо регулируются коэффициенты трансформации $k_{\text{ВН}}$ между обмотками высшего и низшего напряжений и $k_{\text{ВС}}$ между обмотками высшего и среднего напряжений.

Регулировочные ответвления автотрансформаторов выполняются со стороны нейтрали общей обмотки или в линейном выводе обмотки среднего напряжения. В первом случае одновременно и зависимо регулируются коэффициенты $k_{\text{ВН}}$ и $k_{\text{ВС}}$, во втором регулируется только коэффициент $k_{\text{ВС}}$.

Рассмотрим основные принципы регулирования коэффициентов трансформации. С целью упрощения трансформаторы и устройства регулирования будем рассматривать в однофазном исполнении. На рис. 3.2 приведена принципиальная схема трансформатора с устройством ПБВ. Первичная обмотка $U_{\text{В}}$ имеет нулевое ответвление и четыре регулировочных ответвления: +2,5 и -5 %. Вторичная обмотка $U_{\text{В}}$ имеет неизменное число витков.

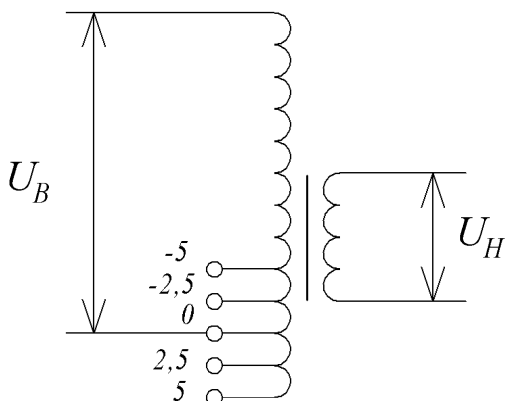


Рис. 3.2 – Принципиальная схема трансформатора с устройством ПБВ

Нулевое ответвление ПБВ соответствует номинальному коэффициенту трансформации $k_{\text{Т}} = w_1/w_2 = U_{\text{ВН}} / U_{\text{НН}}$. Другие

ответвления ПБВ соответствуют изменению коэффициента трансформации до величин, указанных в табл.1.

Таблица 3.1 – Ответвления ПБВ

Ответвление первичной обмотки, %	+5	+2,5	0	-2,5	-5
Коэффициент трансформации	1,05 кТ	1,025 кТ	кТ	0,975 кТ	0,95 кТ

Для переключения регулировочных ответвлений необходимо отключать трансформатор от сети. Эти переключения производятся редко, например, при сезонном изменении нагрузки. Такие трансформаторы не могут использоваться для регулирования напряжения при изменении нагрузки в течение суток.

Принципиальная схема трансформатора с РПН приведена на рис. 3.3. Первичная обмотка имеет нерегулируемую (а) и регулируемую (б) части. Количество ответвлений на регулируемой части первичной обмотки таких трансформаторов больше, чем у трансформаторов с ПБВ. Например, для трансформаторов с номинальным первичным напряжением $U_{\text{ВН}} = 115 \text{ кВ}$ диапазон регулирования напряжения составляет $\pm 9 \times 1,78 \% U_{\text{ВН}}$. Эти трансформаторы имеют, кроме нулевого, еще 18 ответвлений.

Нулевое ответвление РПН соответствует номинальному коэффициенту трансформации $k_T = U_{\text{ВН}} / U_{\text{НН}}$. Другие ответвления соответствуют изменению коэффициента трансформации до величины $k_T = (1 \pm 0,0178i)$, где i – номер ответвления.

Из рис. 3.2 видно, что для ответвлений -1, +2, ... витки регулируемой обмотки включены согласно с нерегулируемой обмоткой. При работе на этих ответвлениях коэффициент трансформации увеличивается. Для ответвлений -1, -2, ... витки регулируемой обмотки включены встречно с нерегулируемой обмоткой. При работе на этих ответвлениях коэффициент трансформации уменьшается.

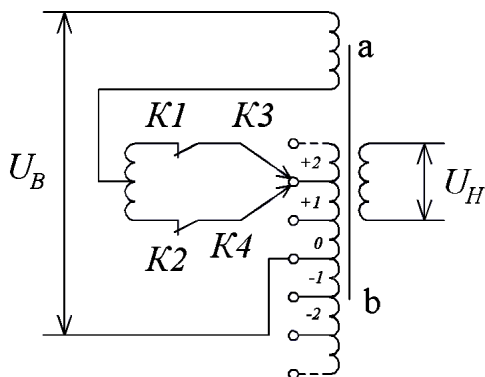


Рис. 3.3 – Принципиальная схема трансформатора с устройством РПН

Рассмотрим работу переключающего устройства РПН, состоящего из неподвижных контакторов K1 и K2, подвижных контактов K3 и K4 и токоограничивающего реактора LR, в среднюю точку которого включен вывод нерегулируемой обмотки трансформатора. При работе трансформатора на любом ответвлении ток нагрузки первичной обмотки распределяется поровну между двумя частями реактора. Токи в разных частях реактора текут встречно, результирующий магнитный поток и индуктивное сопротивление реактора практически равны нулю.

Пусть по условиям регулирования напряжения требуется переключиться с ответвления +2 на ответвление +1. Для этого отключается контактор K1, а подвижный контакт K3 переключается на ответвление +1. Контакт K1 включается. Секция обмотки между ответвлениями +1 и +2 оказывается замкнутой на реактор LR. Токи замыкания в обеих частях реактора совпадают по направлению, результирующий магнитный поток и индуктивное сопротивление реактора увеличиваются, чем достигается эффективное ограничение тока замкнутой части обмотки.

Далее отключается контактор K2. Подвижный контакт K4 переключается на ответвление +1, после чего контактор K2 замыкается.

Трансформаторы с устройством РПН позволяют регулировать напряжение при изменении нагрузки в течение суток. Такие трансформаторы оборудуются автоматическими регуляторами напряжения (АРН), которые реагируют на изменения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, давая команды на переключение ответвлений РПН согласно заданному закону регулирования напряжения.

Для повышения надежности работы РПН следует исключить его срабатывания при незначительных отклонениях напряжения, а также при значительных, но кратковременных отклонениях напряжения. Для этого АРН имеет зону нечувствительности, несколько большую половины одной ступени регулирования. В этом случае АРН выдает сигнал на переключение, если напряжение ближе к следующей ступени регулирования, чем к той, на которой в данный момент работает трансформатор.

Для отстройки РПН от срабатывания при кратковременных отклонениях напряжения в АРН предусматривается выдержка времени 1...3 минуты.

Устройство РПН автотрансформаторов работает аналогично. Принципиальные схемы включения РПН в нейтраль общей обмотки и линейный вывод обмотки среднего напряжения показаны на рис. 3.4. В первом случае одновременно и независимо регулируются коэффициенты $k_{ВН}$ и $k_{ВС}$, во втором – только коэффициент $k_{ВС}$.

Регулировочные трансформаторы ТЛ вводят добавочное напряжение в основную обмотку трансформатора (автотрансформатора) и применяются в следующих случаях:

а) для регулирования напряжения на подстанциях с трансформаторами без РПН при групповом (рис. 3.5, а) или индивидуальном (рис. 3.5, б) регулировании;

б) для регулирования напряжения на подстанциях с трансформаторами с РПН, от которых питаются потребители с разным характером нагрузки (рис. 3.5, б); характер нагрузки потребителя 3 значительно отличается от характера нагрузки потребителей 1 и 2; для регулирования низшего напряжения на подстанциях с автотрансформаторами, снабженными устройствами РПН в обмотке среднего напряжения (рис. 3.5, г).

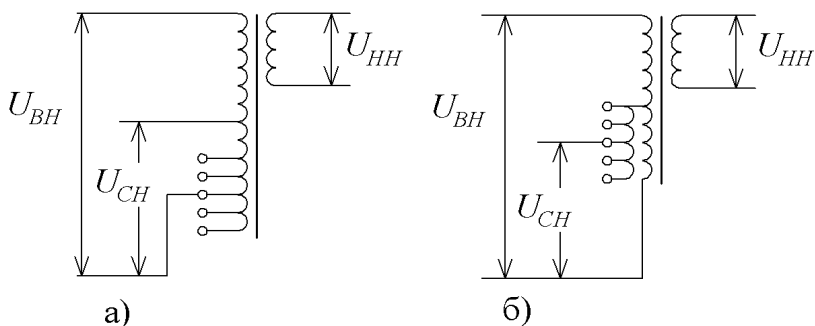


Рис. 3.4 – Принципиальные схемы включения РПН в автотрансформаторах

Принципиальная схема одной фазы линейного регулирующего трансформатора ТЛ показана на рис. 6. Этот регулировочный трансформатор состоит из последовательного трансформатора Т1, который вводит добавку напряжения ΔU в обмотку основного трансформатора Т, и регулировочного автотрансформатора Т2, который за счет отвлений меняет величину этой добавки.

Векторная диаграмма напряжений показана на рис. 3.6, б. Напряжения без регулирования U_{a1} , U_{b1} , U_{c1} отличаются от напряжений U_{a2} , U_{b2} , U_{c2} , полученных в результате регулирования на величину добавки напряжения ΔU .

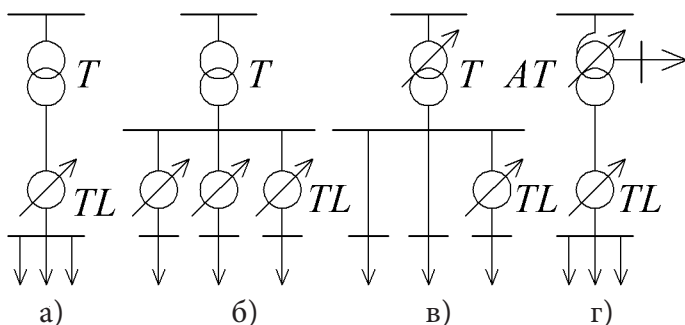


Рис. 3.5 – Принципиальная схема включения регулировочных трансформаторов

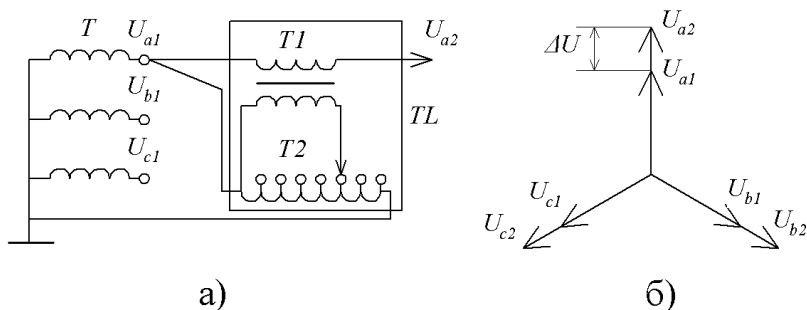


Рис. 3.6 – Принципиальная схема включения регулировочного трансформатора (а) и векторная диаграмма напряжений (б)

3.3.3. Выбор регулировочных ответвлений трансформаторов

Задача выбора регулировочных ответвлений трансформаторов заключается в том, чтобы при любых возможных изменениях напряжения в электрической сети обеспечить на шинах вторичного напряжения трансформатора требуемое напряжение.

Рассмотрим простейшую схему электрической сети (рис. 3.7, а). От ЦП, представленного шинами неизменного напряжения $U_C = \text{const}$, через линию электропередачи W и трансформатор T питается нагрузка мощностью $S_H = P_H + jQ_H$. Напряжения на первичной и вторичной обмотках трансформатора равны соответственно U_B и U_H . Трансформатор имеет устройство РПН.

В схеме замещения сети (рис. 3.5) линия представлена сопротивлением Z_W , трансформатор представлен приведенным к первичному напряжению сопротивлением Z_T и идеальным трансформатором T без потерь мощности и напряжения, изменяющим напряжение в соответствии с коэффициентом трансформации k_T . Вторичное напряжение, приведенное к обмотке высшего напряжения, обозначено U'_H . Действительное вторичное напряжение составляет $U''_H = U'_H / k_T$

Изначально полагаем, что контакты РПН находятся на нулевом ответвлении $U_{\text{отв } 0}$. Номинальный коэффициент трансформации может изменяться за счет РПН.

$$k = w_1 / w_2 = U_{\text{ВН}} / U_{\text{НН}} = U_{\text{отв } 0} / U_{\text{НН}} = U'_H / U''_H \quad (3.6)$$

Эпюра напряжения в сети показана на рис. 3.7, в. Напряжение на первичной обмотке трансформатора U_B отличается от напряжения системы U_C на величину потерь напряжения в сопротивлении Z_W :

$$U_B = U_C - \Delta U_{ZW}. \quad (3.7)$$

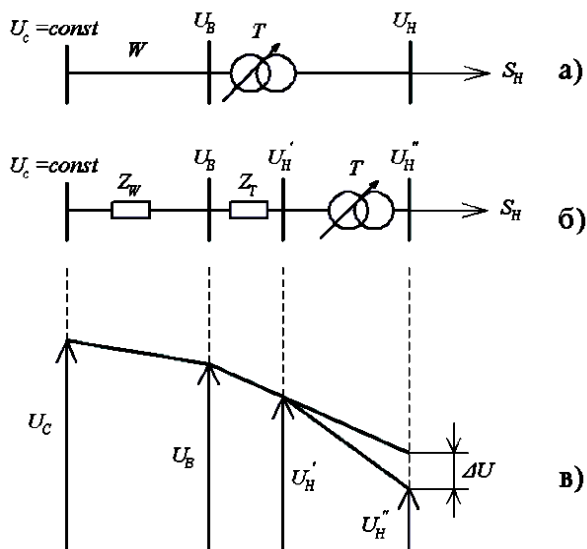


Рис. 3.7 – Схема электрической сети (а), схема замещения (б) и эпюра напряжения (в)

Напряжение на выводах вторичной обмотки трансформатора, приведенное к обмотке высшего напряжения, отличается от напряжения U_B на величину потерь напряжения в сопротивлении трансформатора Z_T .

$$U'_H = U_B - \Delta U_{ZT}. \quad (3.8)$$

Действительное напряжение на вторичной обмотке составляет:

$$U''_H = U'_H / k_T = U'_H U_{HH} / U_{BH} = U'_H U_{HH} / U_{OTB0}. \quad (3.9)$$

Пусть действительное напряжение U''_H отличается от требуемого напряжения U''_{HT} . Необходимо переключить РПН с нулевого ответвления U_{OTB0} на требуемое ответвление U_{OTBT} обеспечивающее на вторичной обмотке трансформатора напряжение:

$$U''_{HT} = U'_H U_{HH} / U_{OTBT}. \quad (3.10)$$

Из последнего выражения определяется напряжение требуемого регулировочного ответвления:

$$U_{OTBT} = U'_H U_{HH} / U''_{HT}. \quad (3.11)$$

Полученное напряжение требуемого регулировочного ответвления округляется до стандартного значения U_{OTB} и определяется действительное напряжение на вторичной обмотке трансформатора после регулирования:

$$U_d = U'_H U_{HH} / U_{OTB}. \quad (3.12)$$

После регулирования напряжение на вторичной обмотке трансформатора изменится до требуемого значения. Из эпюры напряжения, показанной на рис. 3.7, в, видно, что регулирование напряжения эквивалентно введению дополнительного напряжения ΔU в схему электрической сети.

Определение стандартных напряжений регулировочных ответвлений поясним на конкретном примере. Для большинства трансформаторов с номинальным первичным напряжением $U_{BH} = 115$ кВ диапазон регулирования напряжения составляет $\pm 9 \times 1,78$ %. Для таких трансформаторов стандартные напряжения ответвлений определяются как:

$$U_{\text{отв } i} = U_{\text{BH}} \pm i \cdot 1,78 \cdot U_{\text{BH}} / 100, \quad (3.13)$$

где $\pm i = \pm(0, 1, 2, \dots, 9)$ – номера ответвлений.

Для повышения напряжения на вторичной обмотке трансформатора его коэффициент трансформации необходимо уменьшить, что соответствует знаку минус в выражении (3.7). Для понижения напряжения на вторичной обмотке трансформатора – наоборот.

Задача оптимизации режима напряжений в распределительных сетях напряжением 6–20 кВ является весьма важной, поскольку эти сети находятся в непосредственной электрической близости от потребителей. В таких сетях, называемых еще сетевыми районами, электроэнергия к потребителям распределяется от ЦП, под которыми понимаются шины распределительных устройств вторичного напряжения (6...20 кВ) понижающих подстанций ЭЭС.

Схема сетевого района представляет собой разомкнутую радиально-магистральную или петлевую сеть. Трансформация электроэнергии на низшую ступень напряжения 0,4 кВ осуществляется через распределительные трансформаторы с устройствами ПБВ.

Возможности активного воздействия на режим напряжения в сетевом районе оказываются весьма ограниченными. Одной из причин такой ограниченности является массовость сетевых районов. В одной региональной ЭЭС насчитываются десятки сетевых районов, тысячи подстанций 6...20/0,4 кВ. Поэтому в сетевых районах целесообразны трансформаторы с ПБВ и нерегулируемые батареи конденсаторов.

Другой причиной является отсутствие точной исходной информации о параметрах режимов сетей. Такая информация может быть получена либо в результате наблюдения эксплуатационным персоналом за показывающими и регистрирующими приборами, либо автоматически от устройств телемеханики. Оба способа получения информации от сотен узлов сетевого района не представляются реальными.

Регулирование напряжения в ЦП распределительной сети называется централизованным регулированием напряжения. Регулирование, при котором напряжение на шинах ЦП в пери-

од наибольших нагрузок повышается, а в период наименьших нагрузок уменьшается, называется встречным регулированием напряжения.

Рассмотрим подробнее принцип встречного регулирования напряжения в ЦП сетевого района. На рис. 3.8 показана упрощенная схема сетевого района. От шин ЦП через распределительный трансформатор с сопротивлением $Z_{РТ}$ получают питание ближние потребители электроэнергии БП. От шин ЦП отходит линия сопротивлением $Z_{Л}$, в конце которой через распределительный трансформатор с сопротивлением $Z_{РТ}$ подключены дальние потребители электроэнергии ДП.

Напряжение у ближнего потребителя БП составляет:

$$U_B = U_{ЦП} - \Delta U_{РТ}, \quad (3.14)$$

где $U_{ЦП}$ – напряжение в ЦП;

ΔU – потери напряжения в распределительном трансформаторе.

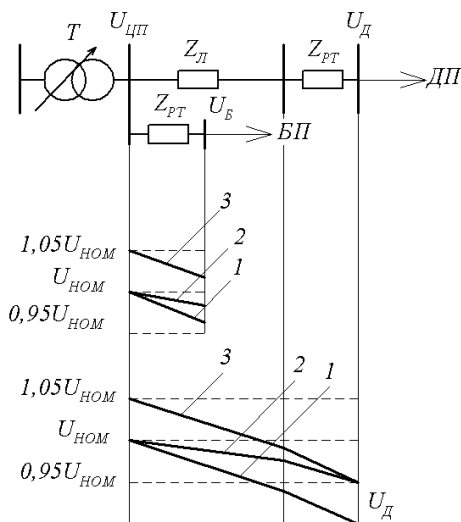


Рис. 3.8 – Схема сети и эпюры напряжений, поясняющие принцип встречного регулирования напряжения

Напряжение у дальнего потребителя ДП составляет:

$$U_{\text{д}} = U_{\text{цп}} - \Delta U_{\text{рт}} - \Delta U_{\text{л}}, \quad (3.15)$$

где $\Delta U_{\text{л}}$ – потеря напряжения в сопротивлении $Z_{\text{л}}$.

Согласно ГОСТ 13109-97, нормально допустимые значения отклонений напряжения у потребителей находятся в диапазоне $\pm 5\%$ от $U_{\text{ном}}$. При поддержании в ЦП напряжения, равного номинальному $U_{\text{цп}} = U_{\text{ном}}$, изменения напряжения от ЦП до БП и ДП, вычисленные по (3.14) и (3.15), характеризуются эпюрами 1 для режима максимальной нагрузки и эпюрами 2 для режима минимальной нагрузки. Из этих эпюр видно, что напряжение у БП в режимах минимальной и максимальной нагрузок находится в допустимых пределах. В режиме минимальной нагрузки напряжение у ДП находится в допустимых пределах. В режиме максимальной нагрузки напряжение у ДП ниже допустимого значения.

Для поддержания допустимого уровня напряжения у дальних потребителей в режиме максимальной нагрузки необходимо повысить напряжение в ЦП. При увеличении напряжения в ЦП до значения $U_{\text{цп}} = 1,05 \cdot U_{\text{ном}}$ изменения напряжений в сети до ближнего и дальнего потребителей характеризуются эпюрами 3. В этом случае напряжения у дальнего и ближнего потребителей находятся в допустимых пределах.

Таким образом, напряжение на шинах ЦП в режиме максимальной нагрузки необходимо поддерживать не ниже $1,05 \cdot U_{\text{ном}}$, а в режиме минимальной нагрузки – на уровне $U_{\text{ном}}$.

В ряде случаев централизованное встречное регулирование не может обеспечить требуемый уровень напряжения. Это обусловлено различными параметрами линий, отходящих от ЦП, и неоднородностью графиков нагрузки различных потребителей. В таких случаях необходимо использовать *местное регулирование напряжения* у потребителей, для которых не обеспечивается требуемый уровень напряжения.

В качестве средств местного регулирования напряжения могут использоваться регулировочные трансформаторы, компенсирующие устройства, установки продольной компенсации. Выбор того или иного средства регулирования напряже-

ния должен быть обоснован технико-экономическими расчетами.

Для местного регулирования напряжения у мощных и удаленных нагрузок целесообразно использовать компенсирующие устройства Q_k (рис. 3.9, б). Установка компенсирующего устройства разгружает сеть от реактивной мощности, уменьшает потерн напряжения в сети и, как следствие, улучшает режим напряжения не только у удаленного потребителя, но и во всей сети.

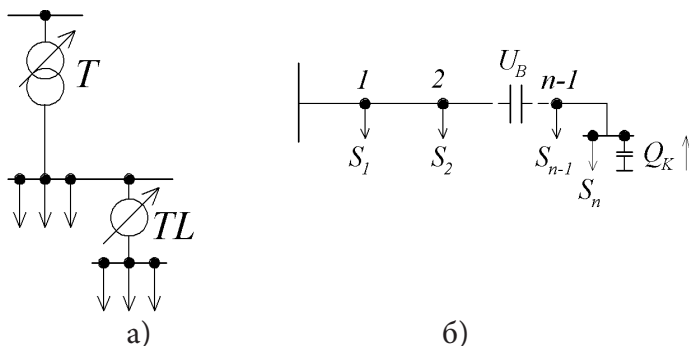


Рис. 3.9 – Схема местного регулирования напряжения

Использование продольной компенсации, т. е. конденсаторов, включаемых в рассечку линии (рис. 3.9, б), позволяет скомпенсировать индуктивное сопротивление линий X_L , за счет этого уменьшить потерн напряжения и улучшить режим напряжения в сети.

Результирующее реактивное сопротивление линий при продольной компенсации составляет:

$$X = X_L - X_C. \quad (3.16)$$

Такое средство регулирования напряжения в распределительных сетях применяется редко, поскольку установки продольной компенсации являются достаточно дорогими, сложными в эксплуатации, нуждаются в специальной защите от токов короткого замыкания.

3.4. Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд представляет собой набор корпусов с лицевой панелью. Каждый из них является натурной моделью определенного элемента электросистемы (источник питания, нагрузки, ЛЭП и т. д.). На лицевой панели каждого корпуса, в зависимости от его назначения, нанесены мнемосхема соединений его элементов (источник питания, нагрузки, ЛЭП и т. д.), гнезда для присоединения внешних устройств и защитного заземления и рукоятки для изменения величин параметров.

Рассмотрим схему натурального моделирования работы трехфазной электрической сети с односторонним питанием (рис. 3.10).

Приведем перечень аппаратуры, используемой в схеме (табл. 3.2).

Таблица 3.2 – Приведем перечень аппаратуры используемой в схеме

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Трехфазный источник питания	201.2	400 В ~; 16 А
A1, A0	Трехфазная трансформаторная группа	347.1	3 х 80 ВА; 242, 235, 230, 126, 220, 133, 127 В/230 В (звезда)
A3	Модель линии электропередачи	313.2	400 В ~; 3 х 0.5 А
A5	Активная нагрузка	306.1	220/380 В; 50 Гц 3х50 Вт;
A6	Индуктивная нагрузка	324.2	220/380 В; 50 Гц 3х40 ВАр
A7	Емкостная нагрузка	317.2	220/380 В; 50 Гц 3х40 ВАр
A8	Коммутатор измерителя мощностей	349	Пять положений
P1	Измеритель мощностей	507.2	15; 60; 150; 300; 600 В, 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 А
P2	Блок мультиметров	508.2	Три мультиметра 0...1000В-; 0...10 А~; 0...20 МОм

G1 моделирует питающую электрическую систему.

Трансформаторы в блоке A1 соединены в трехфазную группу Y-о / Y-о и моделируют трансформатор, связывающий электрическую систему с сетью. Трансформаторы в блоке A9 соединены в трехфазную группу Y-о / А и моделируют понижающий трансформатор.

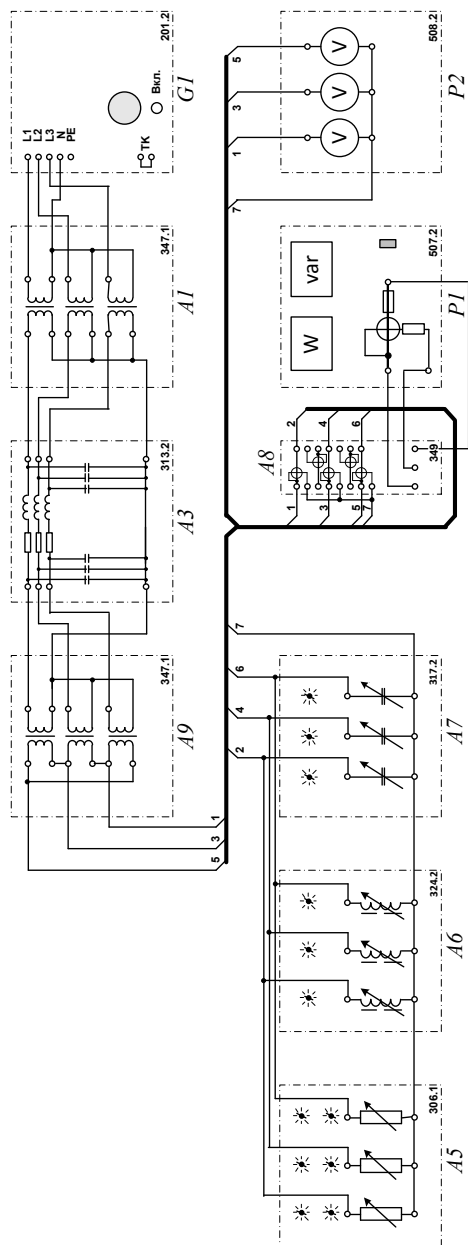


Рис. 3.10 – Электрическая схема замещения лабораторной работы № 3

Модель А3 линии электропередачи моделирует трехфазную линию электропередачи.

Нагрузки А5...А7 моделируют трехфазные активную, индуктивную и емкостные нагрузки.

Коммутатор А8 позволяет без переборки схемы производить измерение потоков активной и реактивной мощностей измерителем Р1 в трех фазах комплексной нагрузки.

Блок мультиметров Р2 позволяет без переборки схемы одновременно производить измерение напряжения трех фаз комплексной нагрузки.

3.5. Порядок выполнения лабораторной работы

3.5.1. Убедиться, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

3.5.2. Соединить гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» источника G1.

3.5.3. Соединить аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.

3.5.4. Установить переключателем заданные по вариантам (табл. 3.3) значения напряжений вторичных обмоток трансформаторов блоков А1, А9.

3.5.5. Установить переключателями заданные по вариантам (табл. 3.3) значения параметров моделей А3 линий электропередачи.

3.5.6. Установить переключателями заданные по вариантам (табл.3) параметры (одинаковые или разные в фазах) нагрузок А5...А7.

3.5.7. Включить выключатели «СЕТЬ» измерителя мощностей Р1 и блока мультиметров Р2.

3.5.8. Включить источник G1. О наличии напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

3.5.9. С помощью мультиметров, включенных как вольтметры, блока Р2 измерить напряжения фаз комплексной нагрузки.

3.5.10. Меняя положение переключателя коммутатора А8, с помощью измерителя Р1 определить величины активной и реактивной мощностей, потребляемые фазами комплексной нагрузки.

Таблица 3.3 – Данные на расчетную часть лабораторной работы № 3

№ вар.	Параметры линии			Параметры нагрузки			Уип, В
	R, Ом	L/R _L , Гн/Ом	C/2, мкФ	P, %	Q _C , %	Q _L , %	
1	50	1,2/32	0,18	10	75	100	133
2	100	0,9/24	0,4	20	50	75	220
3	150	0,6/16	0,58	30	100	50	225
4	200	0,3/8	0,4	40	75	25	230
5	150	1,2/32	0,58	50	50	75	235
6	200	0,9/24	0,18	60	25	50	240
7	150	0,6/16	0,4	70	100	25	245
8	100	0,6/16	0,18	80	75	75	220
9	50	0,3/8	0,18	90	100	50	230
10	100	0,9/24	0,4	100	75	100	240
11	150	1,2/32	0,58	10	50	75	133
12	200	0,9/24	0,4	20	25	50	225
13	150	0,6/16	0,58	30	75	25	235
14	200	0,3/8	0,18	40	50	100	245
15	100	1,2/32	0,18	50	25	75	220

3.5.11. По завершении эксперимента отключить источник G1 и выключатели «СЕТЬ» измерителя мощностей P1 и блока мультиметров P2.

3.6. Расчетная часть

3.6.1. Установить по вариантам значения активных, индуктивных и емкостных нагрузок, параметров ЛЭП и напряжение источника питания (табл. 3.3).

3.6.2. Используя значения напряжений источников питания $\dot{U}_{\text{ип}} = \dot{U}_{\text{вн1}}$, полной мощности нагрузки (симметричный режим) S_{Σ} , сопротивлений линий $Z = R + jX$, вышеприведенные формулы, произвести расчет отклонения напряжения (рис. 3.11).

Здесь $\dot{U}_2$ – напряжение на вводах второго трансформатора, $\dot{U}_{\text{вн1}}$ – напряжение на вторичной обмотки первого трансформатора.

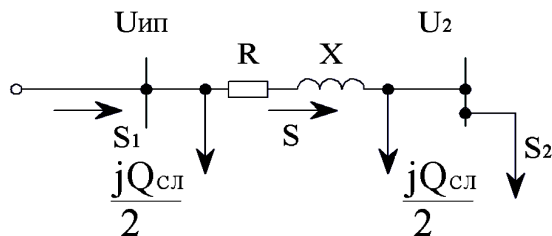


Рис. 3.11 – Схема замещения для расчета

3.6.3. Сравнить полученные значения с показателями измерителей мощностей и ввести в таблицу 4.

Таблица 3.4 – Результаты лабораторной работы № 3

	U_2	δU
Расчетное значение		
Экспериментальное значение		

3.6.4. Сделать соответствующие выводы.

3.7. Контрольные вопросы

1. Каковы нормально допустимые и предельно допустимые значения отклонения напряжения на выводах приемников электрической энергии?
2. Каковы наибольшие и наименьшие рабочие напряжения электрических сетей и чем они обусловлены?
3. Дайте классификацию устройств регулирования напряжения.
4. Изобразите принципиальную схему трансформатора с ПБВ и РПН.
5. Поясните последовательность работы РПН.
6. В какой обмотке трансформаторов устанавливается РПН?
7. Как выбираются требуемые регулировочные ответвления?

3.8. Литература

1. Герасименко, А. А. Передача и распределение электрической энергии [Текст] : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки 140400 «Электроэнергетика и электротехника» / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. – 4-е изд., стер. – М. : КНОРУС, 2014. – 645 с.

2. Евдокунин, Г. А. Электрические системы и сети [Текст] : учебное пособие / Г. А. Евдокунин. – 3-е изд., испр. и доп. – СПб. : Синтез Бук, 2011. – 286 с.

3. Карапетян, И. Г. Справочник по проектированию электрических сетей [Текст] / И. Г. Карапетян, Д. Л. Файбисович, И. М. Шапиро; под ред. Д. Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : ЭНАС, 2012. – 374 с.

4. Кудрин, Б. И. Электроснабжение [Текст] : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника» / Б. И. Кудрин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : изд. центр «Академия», 2012. – 350 с.

5. Неклепаев, Б. Н. Электрическая часть электростанций и подстанций [Текст]: справочные материалы для курсового и дипломного проектирования / Б. Н. Неклепаев, И. П. Крючков. – 5-е изд., стер. – СПб. : БХВ-Петербург, 2013. – 607 с.

6. Правила устройства электроустановок [Текст] / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному контролю. – 7-е и 6-е изд. – СПб. : ДЕАН, 2014. – 1164 с.

7. Рожкова, Л. Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций [Текст] : учебник для использования в учебном процессе образовательных учреждений, реализующих программы среднего профессионального образования / Л. Д. Рожкова, Л. К. Карнеева, Т. В. Чиркова. – 8-е изд., стер. – М. : Академия, 2012. – 446 с.

8. Хорольский, В. Я. Эксплуатация систем электроснабжения [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника» / В. Я. Хорольский, М. А. Таранов. – М. : ФОРУМ, 2013. – 287 с.

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

Учебное издание

МАКСИМОВ Виктор Петрович,
МИНЕРВИН Игорь Георгиевич,
ФЕДОРОВ Олег Анатольевич

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ

Учебно-методическое пособие для выполнения
лабораторных работ

**Корректор В. А. Яковлева.
Верстка Г. С. Лосева.**



Подписано в печать 02.11.2015. Бумага «PaperOne».
Гарнитура «Times New Roman». Формат 60х84^{1/16}.
Тираж 500 (1-й завод 1–100 экз.). Объем 4,25 п. л. усл. п. л. Заказ № 770-14.

Сахалинский государственный университет
693008, Южно-Сахалинск, ул. Ленина, 290, каб. 32.
Тел. (4242) 45-23-16, факс (4242) 45-23-17.
E-mail: polygraph@sakhgu.ru,
izdatelstvo@sakhgu.ru